

Provoz distribučních soustav

Petr Toman | Jiří Drápela | Stanislav Mišák |
Jaroslava Orságová | Martin Paar | David Topolánek a kol.



Provoz distribučních soustav

Petr Toman

Jiří Drápela

Stanislav Mišák

Jaroslava Orságová

Martin Paar

David Topolánek

a kol.



České vysoké učení technické v Praze

Praha 2011

Publikace byla zpracována za finanční podpory Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2011 – část A – Program EFEKT.



MINISTERSTVO
PRŮMYSLU A OBCHODU



© Petr Toman, Jiří Drápela, Stanislav Mišák Jaroslava Orságová,
Martin Paar, David Topolánek, Jaromír Bok, Jan Novotný, Jan Škoda, 2011
ISBN 978-80-01-04935-8

Vážení čtenáři,

čas, kdy tato publikace vznikla, je ve znamení pokračujících dynamických změn v energetice. Energetika jako celek, nejen výroba, přenos a distribuce elektřiny, na které se zaměřuje tato edice odborných publikací, je ovlivňována zásadními událostmi. Plně se otevřel trh s elektřinou a plynem, stále narůstá podíl obnovitelných zdrojů na výrobě elektřiny, mění se a vyhraňují postoje k jaderné energetice. V rámci Evropy se stále více diskutuje o využití primárních zdrojů i paliv, rostou nároky na přenosovou soustavu.

Celý rozvoj energetického odvětví by však nebyl možný bez dostatku kvalitních lidských zdrojů. Proto považuji za akutní problém zajištění dostatečného počtu odborníků pro budoucí činnost v této náročné technické oblasti. Předpokladem pro přípravu kvalitních odborníků jsou kvalitní odborné základy a já věřím, že právě tato publikace je dokáže poskytnout.



Celá edice odborných publikací je svým způsobem výjimečná, neboť po delší době opět věnuje pozornost jednotlivým oblastem elektroenergetiky a velmi kvalitně standardizuje poznatky z tohoto náročného oboru. Je jisté, že tato edice může přispět k větší konsolidaci a spolupráci v oboru technického vzdělávání, vědy a výzkumu, aby se opět zvýšila prestiž technických oborů. Ministerstvo průmyslu a obchodu, které významně podpořilo vznik této ediční řady, chce tímto způsobem přispět k zajištění konkurenceschopnosti hospodářství na území České republiky, které bylo vždy založeno na kvalitní technické produkci.

Řada publikací vznikla ve spolupráci kolektivů autorů technických vysokých škol České republiky. Rád bych závěrem poděkoval autorům za jejich profesionální přístup při přípravě publikace a také mým kolegům z ministerstva za zajištění realizace projektu. Všem uživatelům přeji, aby jim publikace napomohla při jejich vzdělávání a práci a stala se nedílnou součástí knihovny, ke které se budou pravidelně vracet.

Ing. Roman Portužák, CSc.

ředitel odboru elektroenergetiky

Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky

Obsah

1.	Úvod.....	12
1.1.	Základní pojmy	12
1.2.	Elektrizační soustava	16
1.3.	Uspořádání distribuce	17
1.3.1	Principiální řešení elektrických sítí z hlediska uspořádání	17
1.3.2	Řešení soustav různých napětí z hlediska spojení uzlů vinutí transformátorů	20
1.3.3	Rozvoj transformačních vazeb PS/110 kV	21
1.3.3.1	Stanovení minimálního i maximálního počtu a limitní vytíženosti transformátorů v transformační stanici PS/110 kV	21
1.4.	Charakteristiky napětí.....	23
1.4.1	Kmitočet sítě	23
1.4.2	Velikost napájecího napětí	24
1.4.2.1	Rychlé změny napětí (flickr)	24
1.4.2.2	Krátkodobé poklesy a přerušení napětí	24
1.4.2.3	Příčiny poklesů napětí a krátkých přerušení napětí	25
1.4.2.4	Dočasná a přechodná přepětí	25
1.4.3	Harmonická napětí	26
1.4.3.1	Úrovně napětí signálů v napájecím napětí	26
1.4.4	Nesymetrie napětí	27
1.4.4.1	Nesymetrie distribučních sítí	27
1.4.4.2	Závislost napěťové nesymetrie na jednofázovém výkonu	28
1.4.4.3	Nesymetrie jednofázové elektrické trakce.....	29
1.5.	Literatura	33
2.	Distribuční sítě velmi vysokého napětí.....	35
2.1.	Provozování sítí.....	35
2.2.	Poruchy	35
2.2.1	Zkratý.....	35
2.2.1.1	Příčiny vzniku zkratu	35
2.2.1.2	Nebezpečné děje při zkratu.....	36
2.2.2	Časové průběhy zkratových proudů.....	37
2.2.3	Řešení nesouměrných zkratů.....	39
2.2.4	Metoda souměrných složek.....	40
2.2.5	Odvození rovnic pro jednotlivé druhy zkratů	42
2.2.5.1	Trojfázový souměrný zkrat	43
2.2.5.2	Jednofázový zkrat	44
2.2.5.3	Dvoufázový zkrat.....	46
2.2.5.4	Dvoufázový zemní zkrat	48
2.2.6	Vliv oblouku při zkratu	50
2.2.7	Metoda výpočtu	52
2.2.7.1	Metoda ekvivalentního napěťového zdroje	52
2.2.8	Zjednodušující předpoklady	54
2.2.9	Výpočet maximálního zkratového proudu	55
2.2.10	Výpočet minimálního zkratového proudu	55

2.2.11	Postup výpočtu	55
2.2.12	Zkratové impedance elektrických zařízení	56
2.2.12.1	Vztahy pro přepočítání zkratové impedance	56
2.3.	Chránění	57
2.4.	Literatura	58
3.	Distribuční sítě vysokého napětí	59
3.1.	Sítě s izolovaným uzlem	65
3.1.1.1	Netočivé složky proudu a napětí během zemního spojení v izolované soustavě	71
3.2.	Kompenzované sítě	74
3.2.1	Zhášecí tlumivka a rezonanční křivka	76
3.2.1.1	Ladění zhášecích tlumivek	79
3.2.2	Charakteristika zemního spojení v kompenzovaných sítích	87
3.2.3	Provoz kompenzovaných sítí s automatikou přepínání odporů	91
3.2.4	Netočivé složky proudu a napětí během zemního spojení v kompenzované soustavě	94
3.2.5	Lokalizace poruchy v kompenzovaných a izolovaných soustavách	98
3.2.5.1	Statické metody	99
3.2.5.2	Dynamické metody	106
3.2.6	Základní prostředky pro lokalizaci poruchy	108
3.2.6.1	Indikace postiženého vývodu	109
3.2.6.2	Lokalizace poruchy	110
3.2.7	Způsoby praktického určení kapacitního proudu analyzovaných vn soustav	113
3.2.8	Sítě uzemněné přes odpor	114
3.2.9	Detekce poruch v sítích uzemněných přes odpor	121
3.2.10	Lokalizace poruchy v sítích provozovaných přes odpor	123
3.3.	Literatura	124
4.	Distribuční sítě nízkého napětí	126
4.1.	Typy sítí nn	126
4.1.1	Sítě paprskové	126
4.1.2	Sítě okružní	126
4.1.3	Zjednodušená mřížová síť	126
4.1.4	Klasická mřížová síť	127
4.2.	Výpočtové zatížení sítí nn	130
4.2.1	Výpočtové zatížení pro výrobní provoz, objekt nebo závod jako celek	130
4.2.2	Výpočtové zatížení pro jednu skupinu spotřebičů	131
4.2.3	Výpočtové zatížení několika skupin spotřebičů	132
4.2.4	Výpočtové zatížení pro jeden spotřebič	132
4.2.5	Výpočtový proud	133
4.2.6	Výpočtové zatížení pro bydlení a občanskou vybavenost	134
4.2.6.1	Výpočtové zatížení pro bytovou zástavbu	134
4.2.6.2	Výpočtové zatížení pro nebytové odběry	135
4.3.	Literatura	135

5.	Prvky distribučních sítí.....	136
5.1.	Vedení	136
5.1.1	Venkovní vedení.....	136
5.1.1.1	Vedení 110 kV	136
5.1.1.2	Vedení vn	136
5.1.1.3	Vedení nn	140
5.1.2	Parametry venkovních vedení vvn a vn	143
5.1.3	Kabelová vedení.....	145
5.1.3.1	Vedení 110 kV	145
5.1.3.2	Vedení 22 kV	145
5.1.3.3	Vedení 400 V	147
5.2.	Transformátory	147
5.2.1	Parametry transformátorů	148
5.2.1.1	Jmenovitý výkon	148
5.2.1.2	Převod transformátoru	149
5.2.1.1	Ztráty transformátoru	150
5.2.1.2	Napětí nakrátko	150
5.2.1.3	Proud naprázdno	151
5.2.1.4	Spojení vinutí.....	152
5.2.1.5	Hodinový úhel.....	154
5.2.2	Úbytek napětí na transformátoru	154
5.2.3	Stanoviště transformátorů	157
5.2.3.1	Umístění v transformátorových komorách	158
5.2.3.2	Chlazení transformátorů umístěných v komorách.....	158
5.2.3.3	Venkovní transformátory	158
5.2.3.4	Výpočet chlazení transformátoru.....	158
5.3.	Provoz transformátorů.....	160
5.3.1	Krátkodobé přetížení transformátoru	160
5.3.1.1	Paralelní chod transformátorů	161
5.3.2	Stanovení instalovaného výkonu transformovny.....	165
5.4.	Uzemnění	166
5.4.1	Teorie uzemnění	166
5.4.2	Odpor a rozložení povrchového potenciálu typických provedení uzemnění.....	168
5.4.3	Soustavy zemniců	169
5.4.3.1	Vodorovné zemniče.....	169
5.4.3.2	Svislé tyčové zemniče	171
5.4.4	Měření rezistivity půdy.....	173
5.4.5	Měření zemního odporu uzemnění	174
5.4.6	Napětí na uzemňovací soustavě	176
5.4.7	Proudová zatížitelnost zemniců.....	177
5.4.8	Typy zemniců	177
5.4.8.1	Strojený základový zemnič.....	178
5.4.8.2	Strojený zemnič pro vyrovnání potenciálu	178
5.4.9	Mechanická a korozní odolnost.....	179
5.4.10	Uzemnění v distribučních transformovnách	180
5.4.10.1	Oddělená uzemnění	180
5.4.10.2	Spojená uzemnění	181
5.5.	Literatura	183

6.	Přepětí v distribučních sítích	185
6.1.	Klasifikace přepětí jako přechodného děje a podmínky jeho řešení.....	185
6.2.	Spínací přepětí	187
6.2.1	Atmosférická přepětí	190
6.3.	Vlnové pochody na vedeních	191
6.3.1	Jednofázové bezztrátové vedení	191
6.4.	Vlnové šíření výkonu a energie.....	197
6.5.	Vliv impedančního rozhraní na proudové a napěťové vlny.....	197
6.5.1	Vedení konečné délky zatížené vlnovou impedancí $Z_{v2} = Z_{v1}$	199
6.5.2	Rozhraní venkovní vedení – kabel	199
6.5.3	Rozhraní kabel – venkovní vedení	201
6.5.4	Vedení konečné délky naprázdno	201
6.5.5	Vedení konečné délky nakrátko	202
6.5.6	Odpor napříč	203
6.5.7	Kapacita napříč	204
6.5.8	Kapacita podélně.....	205
6.6.	Bergeronova metoda pro řešení vlnových pochodů na vedení	206
6.6.1	Příklad použití Bergeronovy grafické metody	207
6.7.	Ochrany před přepětím	209
6.7.1	Druhy přepětiových ochran.....	210
6.7.1.1	Ochranná jiskřiště.....	210
6.7.1.2	Vyfukovací bleskojistky	210
6.7.1.3	Svodiče přepětí s nelineárními odpory.....	210
6.7.1.4	Umístění svodičů přepětí	214
6.8.	Literatura	217
7.	Řízení distribučních sítí.....	218
7.1.	Struktura, dispečerský řád	218
7.1.1	Příprava provozu distribuční soustavy	218
7.1.2	Operativní řízení provozu distribuční soustavy	219
7.1.3	Hodnocení provozu distribuční soustavy	221
7.2.	Systémové a podpůrné služby DS	222
7.2.1	Systémové služby DS	222
7.2.2	Podpůrné služby DS.....	222
7.2.3	Stanovení parametrů služby a její certifikace	223
7.2.4	Způsoby měření parametrů služby.....	224
7.3.	Automatizovaný systém dispečerského řízení PDS	224
7.4.	Hromadné dálkové ovládání	225
7.4.1	Využití HDO ze strany PDS	225
7.4.2	Přidělování povelů HDO.....	226
7.5.	Omezování spotřeby v mimořádných situacích	226
7.5.1	Snížení odběru a zajištění regulačního plánu v rámci DS	227
7.5.2	Přerušování dodávky podle vypínacího plánu	228
7.5.3	Stanovení bezpečnostního minima	228
7.6.	Regulace napětí	229
7.6.1	Úbytek napětí v rozvodech k motorickým spotřebičům.....	230
7.6.2	Eliminace odchylek napětí	231
7.6.2.1	Regulace transformátorů 110 kV/vn.....	231

7.6.2.2	Nastavení převodu distribučních transformátorů vn/nn	232
7.6.2.3	Charakteristický (kontrolní) bod.....	233
7.6.2.4	Kompenzace parametrů vedení	235
7.6.2.5	Kompenzace jalového výkonu.....	237
7.7.	Bezpečnost zařízení DS.....	238
7.8.	Bezpečnost elektrických zařízení a činností na elektrických zařízeních.....	239
7.8.1	Rozdělení činností na elektrických zařízeních a základní pojmy	240
7.8.2	Oprávnění osob (pracovníků) pro činnosti na EZ a elektrotechnická kvalifikace	244
7.8.3	Základní principy provádění činností na elektrických zařízeních	252
7.8.4	Běžné provozní postupy	252
7.8.4.1	Provozní činnosti	253
7.8.4.2	Kontroly funkčního stavu	253
7.8.5	Pracovní postupy	254
7.8.5.1	Práce bez napětí	255
7.8.5.2	Práce v blízkosti živých částí.....	256
7.8.5.3	Práce pod napětím	257
7.8.6	Příkaz „B“, „B-PPN“	258
7.8.6.1	Podmínky a požadavky pro příkaz „B“	259
7.8.6.2	Podmínky a požadavky pro příkaz „B-PPN“	261
7.9.	Literatura	262

Použité zkratky

Zkratka	Význam
ASDŘ	automatizovaný systém dispečerského řízení
ČEPS	ČEPS, a.s. – provozovatel přenosové soustavy ČR
ČR	Česká republika
DS	distribuční soustava
DT	distribuční transformátor
DTS	distribuční transformační stanice
ERÚ	Energetický regulační úřad
ES	elektrizační soustava
HDO	hromadné dálkové ovládání
MPO	Ministerstvo průmyslu a obchodu České republiky
PDS	provozovatel distribuční soustavy
PLDS	provozovatel lokální distribuční soustavy
PPDS	Pravidla provozování distribuční soustavy
PPPS	Pravidla provozování přenosové soustavy
PPS	provozovatel přenosové soustavy
PS	přenosová soustava
ŘPÚ	řád preventivní údržby
ZS	zemní spojení

Ostatní symboly a zkratky se vyskytují v textu s jejich okamžitým vysvětlením.

1. Úvod

Problematika provozování distribučních soustav patří k základním znalostem absolventa vysokoškolského studia v oboru Elektroenergetika. Publikace seznámí čtenáře s základní koncepcí distribuční soustavy, se základními charakteristikami sítí jednotlivých napěťových úrovní a s nejčastějšími poruchami, které se v sítích vyskytují. Další významná část je věnována základním prvkům sítí, tedy vedením, transformátorům a uzemňovacím soustavám. Následuje část pojednávající o přepětí a přepětových ochranách a o řízení distribučních sítí a bezpečnosti při práci na zařízeních distribučních sítí.

Provoz distribuční sítě zajišťuje Provozovatel distribuční soustavy, který se řídí zejména Pravidly provozování distribuční soustavy schvalovanými Energetickým regulačním úřadem a další platnou legislativou.

1.1. Základní pojmy

Tato kapitola vychází z [1] a klade si za cíl sjednocení pojmů s platnou legislativou.

Diagram zatížení je časový průběh specifikovaného odebíraného výkonu (činného, jalového ...) během specifikované doby (den, týden ...).

Elektrická stanice je soubor staveb a zařízení elektrizační soustavy, který umožňuje transformaci, kompenzaci, přeměnu nebo přenos a distribuci elektřiny, včetně prostředků nezbytných pro zajištění jejich provozu.

Elektrizační soustava (ES) je vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek a přímých vedení, a systémů měřicích, ochranných, řídicích, zabezpečovacích, informačních a telekomunikačních technik. Základní uspořádání elektrizační soustavy je na Obr. 1.1 [4].

Energetický zákon (EZ) je zákon č. 458/2000 Sb. ze dne 28.11.2000 o podmínkách podnikání a o výkonu státní správy v energetických odvětvích a o změně některých zákonů ve znění pozdějších předpisů.

Hromadné dálkové ovládání (HDO) je soubor zařízení sloužící k řízení elektrických spotřebičů, měření, případně jiným službám s využitím přenosu řídicích signálů tónovým kmitočtem po sítích DS.

Dispečerské řízení PS, DS je řízení provozu PS, DS technickým dispečinkem provozovatele PS, DS, definované ve vyhlášce [5].

Distribuční soustava (DS) je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 110 kV (s výjimkou vybraných vedení a zařízení 110 kV, která jsou součástí přenosové soustavy) a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV a 35 kV, sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území ČR (Obr. 1.2), včetně systémů měřicích, ochranných, řídicích, zabezpečovacích, informačních a telekomunikačních technik; DS jsou zřizovány a provozovány ve veřejném zájmu.

Posláním DS je bezpečně a hospodárně zásobovat odběratele elektřinou v požadovaném množství a kvalitě v daném čase a poskytovat distribuční služby uvnitř i vně soustavy provozovatele DS. Kromě toho zajišťuje systémové a podpůrné služby na úrovni DS.

Normální stav je stav soustavy, kdy jsou všechny provozní hodnoty systémových veličin v dovozených mezích, kdy je splněno pro vedení 110 kV a přípojnice stanic 110 kV/vn napájejících distribuční sítě kritérium N-1 a v sítích vn a nn není pro poruchu, revizi nebo údržbu omezena doprava elektřiny odběratelům nebo výrobcům.

Plánovací a připojovací předpisy pro DS poskytnou uživatelům informace o standardech dodávky elektřiny nabízené DS, o zásadách jejího rozvoje i o technických požadavcích, které musí k ní připojení uživatelé splňovat. Zvláště jsou definovány požadavky na připojení výroben. Dále umožňuje tato část pravidel příslušnému uživateli získat od provozovatele DS přehled o distribučních a výrobních kapacitách, zatížení a některé další informace o DS.

Plánování rozvoje DS je souhrn činností zajišťujících technicky i ekonomicky optimální rozvoj DS dle přijatých standardů rozvoje DS ve vazbě na rozvoj všech jejích současných i budoucích uživatelů.

Pravidla provozování distribuční soustavy (PPDS) je soubor veřejně dostupných dokumentů specifikujících zásady působnosti provozovatele a uživatelů DS, schválený ERÚ.

PPDS definují technické aspekty provozních vztahů mezi provozovatelem DS a všemi dalšími uživateli připojenými k DS. Ustanovení PPDS jsou společná a závazná pro všechny provozovatele a uživatele DS. Kromě Pravidel provozování DS musí provozovatelé DS plnit své závazky vyplývající z licence, z obecných právních předpisů a z PPPS.

Protože PPPS specifikují všechny technické aspekty požadavků na rozhraní mezi PS a DS, nejsou již v Pravidlech provozování DS práva a povinnosti provozovatele PS podrobně uváděny.

PPPS a PPDS jsou nezbytná k tomu, aby společně zajistila rozčlenit:

- celkově efektivní provoz ES,
- přiměřenou prakticky dosažitelnou míru zabezpečení zákazníka elektřinou a kvality dodávek,
- průhledná a nediskriminační pravidla přístupu všech uživatelů k sítím.

PPDS však neobsahují úplně všechny předpisy, které mají uživatelé připojení k DS dodržovat. Tito uživatelé musí dále respektovat i ostatní příslušné právní předpisy a technické normy, bezpečnostní předpisy, předpisy požární ochrany, ochrany životního prostředí a předpisy pro dodávku elektřiny.

PPDS sestávají ze dvou hlavních částí:

- plánovacích a připojovacích předpisů pro DS,
- provozních předpisů pro DS.

PPDS se vztahují na:

- provozovatele DS,
- provozovatele PS,
- provozovatele lokálních DS,
- provozovatele výroben připojených do DS,
- obchodníky s elektřinou,
- zákazníky.

Některé části PPDS se vztahují jen na určité kategorie uživatelů DS, a to podle typu připojení nebo charakteru užívání DS. Všichni uživatelé však musí znát a respektovat ta ustanovení pravidel, která se jich týkají.

Pravidla provozování PS (PPPS) definují technické aspekty provozních vztahů mezi provozovatelem PS a všemi dalšími uživateli připojenými k PS. Některá jeho ustanovení se vztahují i na výrobu elektřiny ve výrobnách připojených do DS.

Provozní předpisy pro DS obsahují provozní záležitosti, které ovlivňují uživatele a vyžadují jeho součinnost, jako ustanovení o odhadech předpokládané poptávky, o plánování odstávek DS a výroben, o hlášení provozních změn a událostí, o bezpečnosti zařízení DS a o postupech při mimořádných událostech.

Požadavky na poskytování informací provozovateli DS ze strany uživatelů jsou shrnuty v předpisech pro registraci údajů o soustavě. Provozovatel DS je potřebuje zejména pro plánování provozu a rozvoje DS. Tyto informace jsou důvěrné a je možné je zpřístupnit pouze za okolností stanovených ve všeobecných podmínkách DS, upravujících v Pravidlech provozování DS především záležitosti právní povahy.

Při provozování DS jsou provozovatelé DS povinni zajistit nediskriminační přístup k DS všem oprávněným uživatelům.

Užívání DS může mít různý charakter:

a) dodávku elektřiny do DS (přes vstupní místa připojení):

- z PS,
- z výroby připojené do DS,
- z jiné DS,
- mezistátní,

b) dodávku elektřiny z DS do PS,

c) odběr elektřiny z DS (přes výstupní místa připojení),

- k zařízení zákazníka,
- do jiné DS,
- mezistátní,

- d) distribuci elektřiny po DS mezi vstupními a výstupními místy připojení,
- e) zajištění systémových a podpůrných služeb (např. regulace výkonu a napětí), pohotovostních dodávek a krytí spotřeby odběratele ze strany provozovatele DS tam, kde došlo k výpadku vlastního zdroje odběratele nebo tento zdroj odběrateli nepostačuje nebo došlo k výpadku dodávky od smluvního dodavatele.

Různé druhy užívání DS vyžadují různé typy smluv mezi provozovatelem DS a uživateli, které případně upravují i technické řešení míst připojení. Vždy však musí zajistit dodržování příslušných ustanovení PPDS. Pokud některý druh užívání DS předpokládá současně i užívání PS, musí uživatel uzavřít smlouvu i s provozovatelem PS a respektovat PPPS.

Provozovatel DS (PDS) je fyzická či právnická osoba, která je držitelem licence na distribuci elektřiny; na částech vyjmutých z vymezeného území provozovatele velké regionální DS mohou působit provozovatelé lokálních DS s vlastním vymezeným územím. Provozovatel DS odpovídá za její bezpečný a spolehlivý provoz způsobem přiměřeným ochraně životního prostředí a za její rozvoj. Činí tak prostřednictvím svého technického dispečinku provozovatele DS (pokud ho zřídil) a svých provozních a rozvojových útvarů.

Provozovatel DS je povinen na vymezeném území na základě uzavřených smluv umožnit distribuci elektřiny, připojit k DS každého a umožnit distribuci elektřiny každému, kdo o to požádá a splňuje podmínky dané EZ, jeho prováděcími vyhláškami a Pravidly provozování DS (dále jen PPDS). Místo a způsob připojení k DS se určí tak, aby nedošlo k přetížení nebo překročení parametrů žádného prvku sítě.

Přenosová soustava (PS) je vzájemně propojený soubor vedení a zařízení 400 kV, 220 kV a vybraných vedení a zařízení 110 kV, sloužící pro zajištění přenosu elektřiny pro celé území ČR a propojení s elektrizačními soustavami sousedních států, včetně systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky; přenosová soustava je zřizována a provozována ve veřejném zájmu.

Příprava provozu DS je činnost prováděná při dispečerském řízení DS, při které se zpracovává soubor technicko – ekonomických a organizačních opatření v oblasti výroby, distribuce a spotřeby elektřiny, jejímž cílem je zajištění spolehlivého a bezpečného provozu DS při respektování smluvních vztahů mezi účastníky trhu s elektřinou.

Regulační plán je plán snížení výkonu odebíraného odběrateli v souladu s vyhlášenými stupni omezování spotřeby podle platné vyhlášky MPO.

Řízení provozu DS v reálném čase je činnost při dispečerském řízení DS probíhající v reálném čase, při které se uskutečňují záměry stanovené přípravou provozu při současném řešení vlivu nepředvídaných provozních událostí v PS a DS.

Řízení výroby je vydávání dispečerských pokynů výrobnám k zajištění určitých hodnot činného a jalového výkonu v dané době.

Řízení odběru je využívání prostředků používaných v soustavě k ovlivňování velikosti a doby odebraného výkonu.

Sekundární regulace U/Q je lokální udržování zadané velikosti napětí v pilotních uzlech a rozdělování vyráběného jalového výkonu na jednotlivé zdroje pracující do daného uzlu.

Spolehlivost provozu je komplexní vlastnost, která spočívá ve schopnosti ES zajistit dodávku elektřiny při zachování stanovených parametrů, především kmitočtu, výkonu a napětí v daných mezích a v průběhu času podle technických podmínek.

Stav nouze je omezení nebo přerušení dodávek elektřiny na celém území ČR nebo na její části z důvodů a způsobem uvedeným v EZ.

Systémové služby jsou činnosti PPS a PDS pro zajištění spolehlivého provozu ES ČR s ohledem na provoz v rámci propojených elektrizačních soustav.

Vypínací plán je postup pro rychlé a krátkodobé přerušení dodávky elektřiny odběratelům vypnutím vybraných vývodů v rozvodnách velmi vysokého napětí a vysokého napětí.

Výpadek DS je stav, kdy celá DS nebo její významná část je bez napětí.

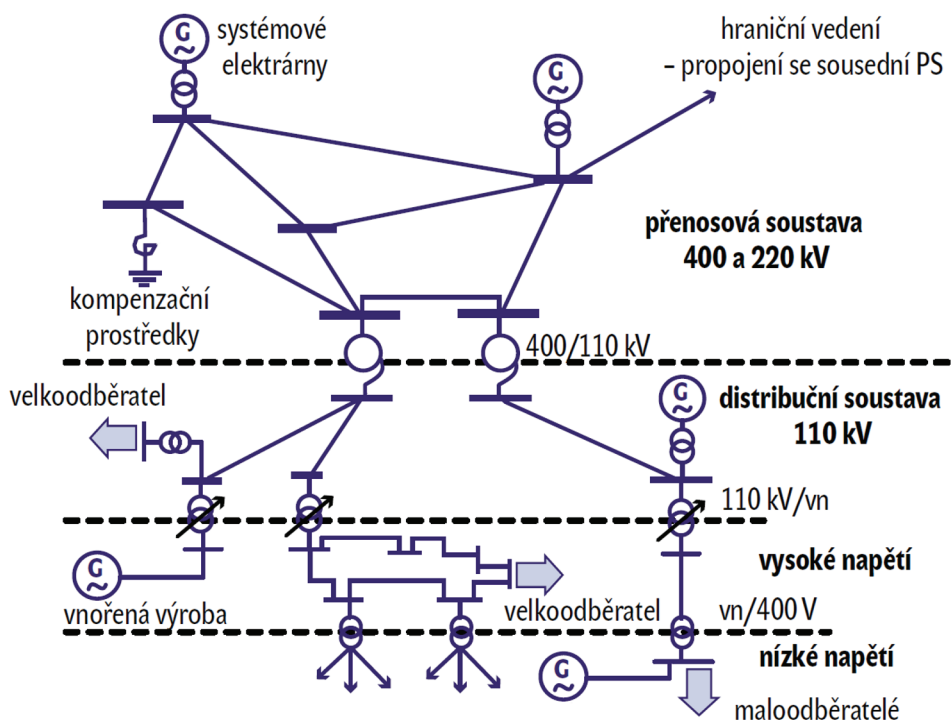
1.2. Elektrizační soustava

Tato soustava se skládá ze zdrojů, sítě a spotřebičů (Obr. 1.1). Základ elektrizační soustavy – jakousi páteř – tvoří přenosová soustava (nazývaná také nadřazená), která je charakterizována [4]:

- sítě o napětí 400 a 220 kV (včetně vybraných vedení 110kV),
- vyvedením výkonu velkých, tzv. systémových elektráren,
- transformační vazbou na napětí 110 kV,
- propojením do soustav sousedních států pomocí hraničních vedení.

Na přenosovou soustavu navazuje distribuční soustava, kterou charakterizuje:

- několik napěťových úrovní od 110 kV až po sítě nízkého napětí (nn),
- sítě jsou radiální nebo okružní,
- zásobování jsou z ní buď velkoodběratelé (z vyšších napěťových hladin), nebo maloodběratelé (ze sítě nízkého napětí 400/230 V),
- vyvedeny jsou do ní zdroje nižšího výkonu (nazývané také distribuovaná nebo rozptýlená, příp. vnořená výroba).



Obr. 1.1: Uspořádání elektrizační soustavy

1.3. Uspořádání distribuce

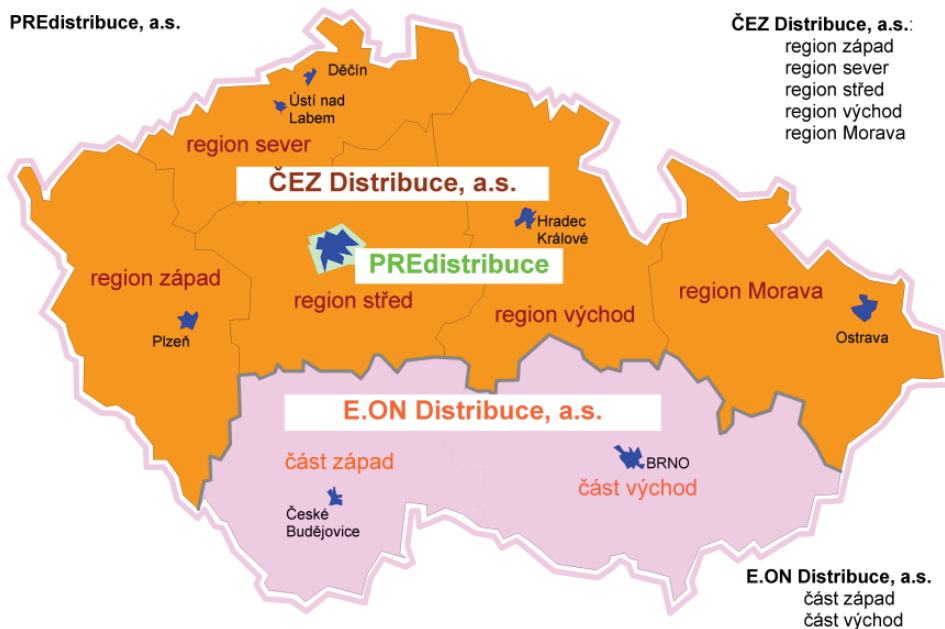
1.3.1 Principiální řešení elektrických sítí z hlediska uspořádání

Sítě mohou být z hlediska uspořádání řešeny jedním ze dvou základních způsobů:

- jako otevřený rozvod, kde je elektrická energie ke spotřebiči dodána jednou cestou,
- jako uzavřený rozvod, kde napájení lze zajistit vždy ze dvou nebo více stran.

K prvnímu způsobu patří paprskový rozvod a průběžný rozvod, ke druhému způsobu patří okružní rozvod a mřížová síť. Výběr vhodného druhu rozvodu záleží na způsobu provozu řešené soustavy, jak z hlediska rozdělování výkonu, tak i z hlediska bezpečnosti a hospodárnosti. Na Obr. 1.3 jsou naznačeny uvedené druhy rozvodu elektrické energie.

Přenosová (nadřazená) soustava 400 kV a 220 kV je řešena okružním rozvodem, do kterého pracují tuzemské zdroje velkých výkonů.



Obr. 1.2: Rozdělení distribučních sítí v ČR [3]

Distribuční soustava 110 kV tvoří základní pilíř distribuční soustavy. Sítě zajišťují tranzit elektřiny z uzlových transformoven zvn/vvn a vvn/vvn do transformoven 110/vn kV. Do těchto sítí je vyveden výkon řady elektráren o výkonech desítek MW, jsou provozovány zpravidla jako okružní a zvolenému způsobu provozu odpovídá i použitý systém chránění distančními ochranami. Sítě se vyznačují spolu s vedeními zvn a vvn přenosové soustavy vysokou spolehlivostí, velice nízkou četností poruch a díky způsobu provozu a zálohování většina poruch při správném působení ochranných systémů nezpůsobí přerušení dodávky elektřiny odběratelům. Vedení jsou nejčastěji konstruována jako dvojítá (dvě vedení na jednom stožáru), nicméně v ČR se vyskytují i vedení jednoduchá, trojitá a čtyřnásobná.

Vlastník	Venkovní vedení [km]	Kabelové vedení [km]	Celkem [km]
PPS	45	0	45
PDS	12 245	13	12 258
Ostatní	439	119	558
Celkem	12 279	132	12 861

Tab. 1.1: Délky tras vedení vvn provozovaných v ČR k 31.12.2010 [2]

Distribuční sítě vn jsou tvořeny venkovními a kabelovými vedeními provozovanými v převážné míře s napětím 22 kV, resp. 35 kV. Z minulosti jsou v provozu sítě s napětím 3, 6 a 10 kV. Tyto sítě ale nejsou dále rozvíjeny a jsou v rámci unifikace nahrazovány napěťovou hladinou 22 kV, resp. 35 kV. V drtivé většině jsou tyto sítě provozovány paprskově případně formou průběžného rozvodu. V městských aglomeracích toto řešení většinou umožňuje řadu propojení do dvojpaprskového nebo okružního rozvodu.

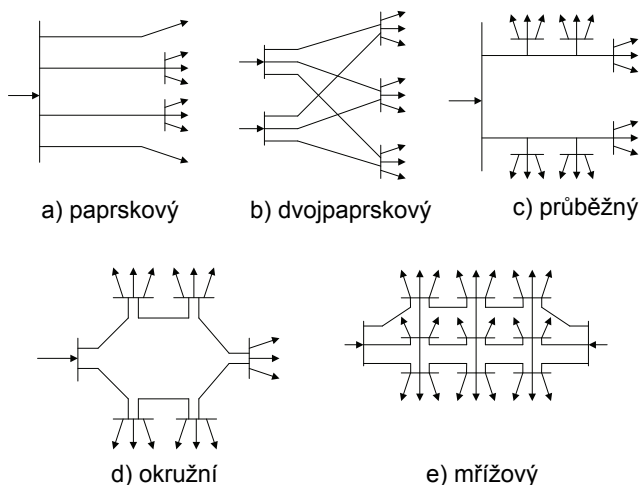
Vlastník	Venkovní vedení [km]	Kabelové vedení [km]	Celkem [km]
PDS	58 734	12 979	71 713
Ostatní	1 154	6 536	7 690
Celkem	59 888	19 515	79 403

Tab. 1.2: Délky vedení vn provozovaných v ČR 31.12.2010 [2]

Distribuční sítě nn jsou provozovány převážně paprskovým a průběžným rozvodem, husté městské sítě jsou provedeny jako mřížové.

Vlastník	Venkovní vedení [km]	Kabelové vedení [km]	Celkem [km]
PDS	65 764	71 706	137 470
Ostatní	774	23 142	23 916
Celkem	66 538	94 848	161 386

Tab. 1.3: Délky vedení nn provozovaných v ČR k 31.12.2010 [2]



Obr. 1.3: Druhy rozvodů

1.3.2 Řešení soustav různých napětí z hlediska spojení uzlů vinutí transformátorů

Způsob spojení uzlu vinutí transformátorů se zemí je též jedním z důležitých, technicko-ekonomických ukazatelů. Tyto uzly se někdy nazývají nulové body soustavy.

Způsob spojení uzlu má vliv na chování sítě během vodivého spojení jedné fáze se zemí a to především na:

- velikost poruchového proudu,
- velikost napětí mezi fázovým vodičem a zemí.

Posuzování velikosti proudu vede k rozhodování o způsobu dimenzování a chránění v soustavě. Velikost napětí mezi vodičem a zemí klade nárok na izolaci. Při souměrném chodu sítě neteče zemí proud. Napětí mezi fázemi je sdružené, mezi fází a uzlem je napětí fázové. Jinak je tomu při spojení jedné nebo více fází se zemí. Nás pro posouzení jednotlivých sítí, jak z dalšího vyplývá, zajímají pouze poměry v síti při spojení jedné fáze (bez jejího přerušení) se zemí. Z tohoto hlediska rozeznáváme dále uvedené druhy sítí:

- účinně uzemněné,
- neúčinně uzemněné,
- izolované.

Obecně lze říci, že každá část rozvodu elektrické energie je charakterizována jmenovitým napětím, uspořádáním a způsobem provozu uzlu napájecího transformátoru. Toto principiální řešení elektrické sítě určuje její vlastnosti a možnosti použití. V následující tabulce je přehledně uvedeno, jak jsou jednotlivé typy sítí použity v elektrizační soustavě ČR.

	Napěťová úroveň	Jmenovité napětí	Uspořádání rozvodu	Spojení uzlu transformátoru
Nadřazená soustava	vvn	400 kV	Okružní	Účinně uzemněný
		220 kV		
Distribuční soustava	vn	110 kV	Okružní, paprskový	Neúčinně uzemněný - většinou kompenzovaný
		22 kV, 35 kV	Průběžný, paprskový, dvojpaprskový (obvykle s možností spojení do okružního)	
		10 kV		Neúčinně uzemněný, nebo izolovaný
		6 kV		
	nn	500 V	Průběžný, paprskový, mřížová síť	Izolovaný
		400/230 V		Účinně uzemněný s vyvedeným středním vodičem

Tab. 1.4: Principiální řešení sítí jednotlivých napěťových úrovní

1.3.3 Rozvoj transformačních vazeb PS/110 kV

Tato kapitola vychází z [5] a zabývá se předacím místem mezi PS a DS, kterým jsou transformátory 400(220)/110 kV. Volba výkonu a počtu těchto transformátorů na jednotlivých předacích místech výrazně ovlivňuje spolehlivost a bezpečnost dodávky elektrické energie.

1.3.3.1 Stanovení minimálního i maximálního počtu a limitní vytíženosti transformátorů v transformační stanici PS/110 kV

Počet a velikost transformátorů v transformační stanici je funkcí řady faktorů, jako jsou zatížení uzlové oblasti a jeho trendu rozvoje, počtu a velikosti elektrárenských bloků do oblasti pracujících, nutné rezervy v transformačním výkonu, zatížení návazných sítí 110 kV apod. Tyto údaje je nutno řádně a v pravidelných intervalech aktualizovat, a tím stanovit optimální postup rozvíjení transformační vazby. Tak je možno udržovat spolehlivost dodávek při obchodování s elektrickou energií [5].

Výchozí pramen, jednotky resp. ukazatele:

- počet kusů transformátorů v předacím místě a jejich jednotkový výkon,
- smluvně stanovený rezervovaný příkon v předacím místě,
- zatížení transformační vazby v předacím místě.

Rozvoj transformační vazby PS/110 kV určují následujícími faktory:

Způsob provozu sítí 110 kV – síť 110 kV se v převážné většině distribučních soustav provozují rozděleny na samostatně pracující oblasti. Každá oblast má vlastní vazbu na PS, která je tvořena jedním, v omezeném počtu případů dvěma, případně třemi transformátory PS/110 kV. Uvedený způsob napájení sítí 110 kV je používán v současné době a je ho nutno uvažovat i ve střednědobém horizontu. Paralelní provoz sítí 110 kV s PS se používá pouze ojediněle, zejména při požadavku zajištěného napájení velkých odběratelů ze sítě 110 kV. Paralelní provoz sebou nese nebezpečí zvýšených přetoků zejména jalových výkonů a pro trvalé provozování sítí 110 kV paralelně s PS by v rámci celé ČR bylo nutno vynaložit značné investice do posílení těchto sítí.

Přenosová schopnost sítí 110 kV PDS mezi jednotlivými samostatně pracujícími oblastmi – schopnost sítě 110 kV přenášet výkon z jedné oblasti do oblastí sousedních je místo od místa rozdílná. V řadě oblastí nelze nahradit výpadek transformátoru PS/110 kV přivedením vypadlého výkonu sítěmi 110 kV ze sousedních transformačních stanic. Vazba mezi sousedními oblastmi sítí 110 kV by měla být dimenzována tak, aby umožnila nahradit výkon jednoho transformátoru ve stanici PS. Otázka, zda posílit transformaci PS/110 kV nebo síťovou vazbu 110 kV je náplní práce společného týmu PPS a příslušného PDS. Ten zkoumá ekonomickou efektivnost a realizovatelnost variantního řešení problematiky.

Velikost zdrojů zapojených do oblasti 110 kV – z hlediska velikosti zdrojů vyvedených do sítí 110 kV lze rozdělit uzlové oblasti do dvou základních kategorií [5]:

- Uzlová oblast čistě spotřební – Rozhodující podíl na napájení oblasti má transformace PS/110 kV. Menší zdroje pracující do oblasti neovlivňují výrazným způsobem její bilanci a případný výpadek některého z nich nezmění podstatným způsobem toky výkonu přes transformátor PS/110 kV.
- Uzlová oblast převážně spotřební – Lokální zdroje pracující do oblasti pokrývají značnou část její spotřeby, spotřeba však stále převažuje nad výrobou. Zbývající část spotřeby je pokrývána transformací PS/110 kV. V oblasti se zpravidla vyskytuje dominantní zdroj, jehož výpadek nebo odstavení výrazným způsobem ovlivní bilanční poměry v oblasti a tím i zatížení transformace PS/110 kV.

V současné době se v transformačních vazbách 400/110 kV využívají stroje s instalovaným výkonem 250 MVA a 350 MVA, v transformačních vazbách 220/110 kV stroje s instalovaným výkonem 200 MVA. Hodnota transformačního výkonu PS/110 kV v jednotlivých předacích místech (transformovnách) vychází ze smluvně potvrzených hodnot rezervovaného příkonu.

Změna transformačního výkonu v předacím místě a případné navýšení rezervovaného příkonu v tomto místě je řešeno v souladu se „Zásadami rozvoje kapacity předávacích míst mezi PS a DS“ [5].

Ke splnění požadovaných hodnot rezervovaného příkonu je využíváno nasazování nových transformátorů, případně výměna stávajících strojů za nové s větším výkonem. Rozhodnutí o realizaci jedné z výše uvedených variant je podmíněno technicko-ekonomickou úvahou a dohodou zúčastněných stran o velikosti transformačních jednotek.

Rozvoj uzlů PS by měl být realizován při dodržování následujících podmínek :

- Všechny uzly PS/110 kV budou osazeny v konečném stavu maximálně třemi transformátory 350 MVA.
- Z důvodu případného paralelního provozu transformátorů v jednom uzlu bude instalován druhý transformátor se stejným výkonem a napětím nakrátko jako stávající.
- Uzly se dvěma stávajícími transformátory budou rozšiřovány o třetí transformátor 350 MVA tak, jak si toto opatření vyžádají bilanční poměry v oblasti.
- Další nárůst transformačního výkonu v uzlech se třemi transformátory bude zajišťován výměnou strojů 250 MVA za nové o výkonu 350 MVA. Impulsem pro výměnu transformátorů budou bilanční nároky oblasti, případně překročení doby životnosti stroje.
- Stanice, kde se v jednom areálu nachází transformace 400/110 a 220/110 kV (Bezděčín, Přeštice, Sokolnice, Výškov) je považována za jednu transformační vazbu a hodnotí se obdobným způsobem, jako v předcházejících bodech.

Před rozhodnutím o zvýšení transformačního výkonu v uzlu PS je nutné zpracovat technicko-ekonomická hodnocení. Výsledkem hodnocení bude návrh technického řešení a optimální časový harmonogram realizace. Podkladem pro hodnocení je rozbor bilančních poměrů v napájené oblasti a rozbor stávajícího stavu zařízení v uzlu PS.

1.4. Charakteristiky napětí

ČSN EN 50160 popisuje a udává hlavní charakteristiky napětí v místech připojení uživatelů z veřejných distribučních sítí nízkého, vysokého a velmi vysokého napětí za normálních provozních podmínek. Za mimořádný provoz se přitom považuje:

- a) dočasné zapojení sítě pro napájení během poruchy nebo údržby či výstavby sítě,
- b) nevyhovující stav instalace uživatele (neodpovídá podmínkám provozování distribuční sítě),
- c) výjimečné situace z důvodů:
 - mimořádných povětrnostních podmínek a přírodních katastrof,
 - cizího zavinění, nařízení úřadů,
 - průmyslové činnosti (např. stávka),
 - vyšší moci,
 - nedostatku výkonu zaviněného vnějšími okolnostmi.

Popis a specifikace charakteristik napájecího napětí se týká jeho:

- kmitočtu,
- velikosti,
- tvaru vlny,
- symetrie třífázových napětí.

Tyto charakteristiky v čase kolísají vlivem změny zatížení, rušením a připojovanými zařízeními a poruchami.

1.4.1 Kmitočet sítě

V sítích nn a vn musí být u systému se synchronním připojením střední hodnota kmitočtu základní harmonické měřená v intervalu 10 s v následujících mezích:

50 Hz $\pm$ 1%,	49,5 – 50,5 Hz	během 99,5% roku
50 Hz+ 4%, 50 Hz - 6%,	47 – 52 Hz	po 100% času

1.4.2 Velikost napájecího napětí

S vyloučením přerušení napájení musí být během každého týdne 95% průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10 min v rozsahu $U_n \pm 10\%$. Pro síť nn dále platí, že všechny průměrné efektivní hodnoty napájecího napětí v měřicích intervalech 10 min musí být v rozsahu $U_n +10\%/-15\%$.

1.4.2.1 Rychlé změny napětí (flikr)

Za normálních provozních podmínek musí být po 95% času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra vjemu flikru $P_{lt} < 1$.

1.4.2.2 Krátkodobé poklesy a přerušení napětí

Poklesy a krátká přerušení napětí jsou nepředvídatelné, většinou náhodné jevy, které se nejlépe popisují statistickým způsobem.

- Pokles napětí je redukce napětí v bodě elektrické sítě následovaná obnovením napětí po krátkém časovém úseku od poloviny periody sítě do několika sekund.
- Krátké přerušení napětí je vymizení napájecího napětí po dobu nepřekračující 1 minutu. Krátké přerušení napětí může být považováno za pokles napětí s hloubkou 100%.
- Hloubka poklesu napětí je definována (viz Obr. 1.4) jako rozdíl mezi napětím během poklesu napětí a jmenovitým napětím sítě. Hloubka se vyjadřuje v procentech jmenovitého napětí.

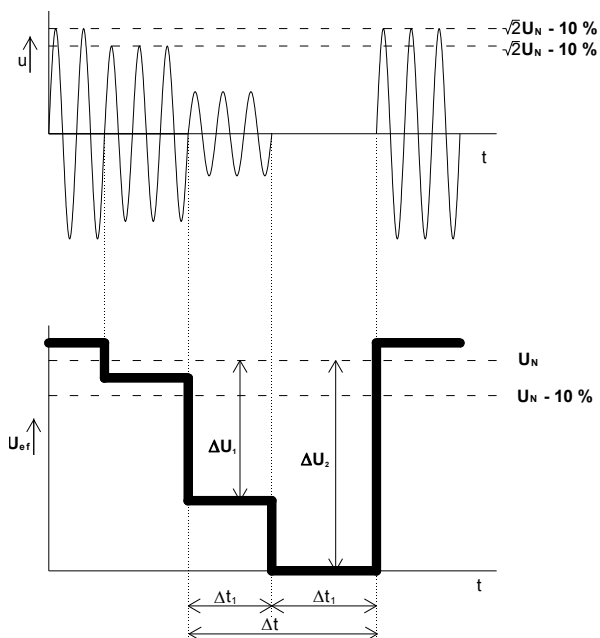
Pokles napětí jehož hloubka je konstantní během jeho trvání může být charakterizována dvěma hodnotami, hloubkou ΔU a trváním Δt .

Několik poklesů napětí může být charakterizováno dvěma nebo více páry hodnot (ΔU , Δt). Takové poklesy komplexního tvaru jsou však poměrně vzácné a pro praktické účely mohou být charakterizovány jejich maximální hloubkou a celkovým trváním.

Změny napětí, které nezmenšují napětí sítě v bodě, který se vyšetřuje, na méně než 90% jmenovitého napětí, nejsou považovány za poklesy napětí. Tyto změny jsou v oblasti odchylek napětí (způsobenými stupňovitými změnami zatížení) a v oblasti kolísání napětí (viz PNE 33 3430-2), způsobeného rychlými a opakujícími se změnami zatížení (viz první změna napětí v obrázku Obr. 1.4).

Dva parametry ΔU a Δt , hloubka a trvání, nemohu být v rozvodných sítích prakticky omezovány pasivními prvky (filtry). Jedinou možností je překlenutí poklesů a krátkých přerušení napětí z náhradního zdroje.

Pro danou síť může být, jako její charakteristická vlastnost, stanovena četnost výskytu poklesů napětí s hloubkami a trváním obsaženými v daném intervalu. Hloubky však nejsou nutně stejné ve všech třech fázích.



Obr. 1.4: Znáznornění poklesu a přerušení napětí [6]

1.4.2.3 Příčiny poklesů napětí a krátkých přerušení napětí

Poklesy a krátká přerušení napětí mohou být způsobeny:

- spínacími operacemi při nichž jsou zapínány velké odběry,
- zkratovými poruchami a následnou funkcí ochran (např. opětovného zapínání). Tyto poruchy mohou pocházet z odběratelských sítí, z veřejných rozvodných sítí nebo mohou být způsobeny atmosférickými vlivy,
- změnami jalového a činného proudu odebíraného zátěží připojenými k síti a tak způsobujícími změny úbytku napětí na impedanci sítě,
- změnami zkratového výkonu sítě, způsobenými změnami ve skladbě generátorů nebo změnami v konfiguraci sítě.

1.4.2.4 Dočasná a přechodná přepětí

Pro síť nn se uvažuje dočasné přepětí 1,5 kV (efektivní) maximálně po dobu 5 s, přechodné přepětí do 6 kV (špičkově).

Pro síť vn je dočasné přepětí do $1,7U_c$ v sítích s uzlem účinně uzemněným nebo uzemněným přes impedanci a do $2U_c$ v soustavách izolovaných nebo

rezonančně uzemněných (uzel transformátoru uzemněn přes kompenzační tlumivku).

Přechodná přepětí nejsou předvídatelná – atmosférická přepětí.

U_c je dohodnuté napájecí napětí.

1.4.3 Harmonická napětí

Pro hodnocení zkreslení průběhu napětí se uvádí tabulky s úrovní jednotlivých harmonických složek vyjádřených v procentech základní harmonické, které nesmí být překročeny v libovolném týdenním období v 95% desetiminutových středních efektivních hodnot.

Navíc celkový číselník harmonického zkreslení THD napájecího napětí podle (1.1) musí být menší nebo roven 8%

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} u_h^2} \quad (1.1)$$

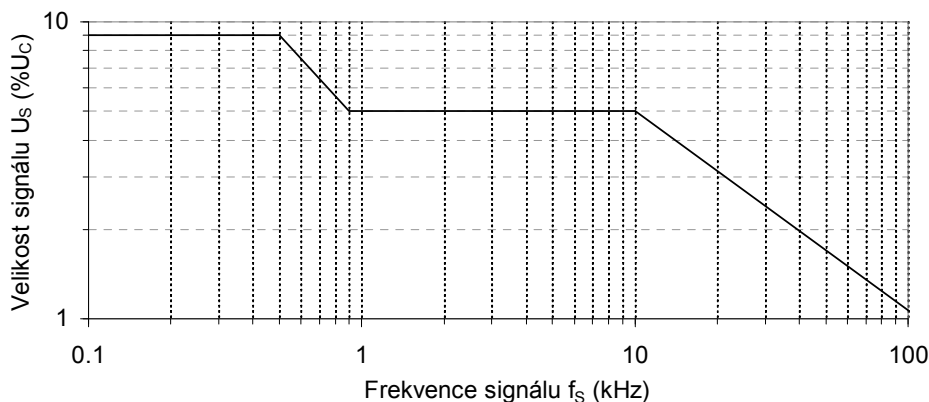
h je řád harmonické

u_h relativní amplituda h -té harmonické vztažená k základní

S rozvojem používání měničů a dalších zařízení řízených prvky výkonové elektroniky se zvyšuje i úroveň zkreslení meziharmonickými složkami. Tyto se zatím nesledují, metodika se připravuje.

1.4.3.1 Úrovně napětí signálů v napájecím napětí

Provozovatelé DS využívají veřejnou distribuční síť k přenosu informací. Střední hodnota napětí signálu měřeného po dobu tří sekund musí být v 99% dne menší nebo rovna hodnotám podle [8].



Obr. 1.5: Úrovně napětí na kmitočtech signálů v procentech U_s ve veřejných distribučních sítích [8]

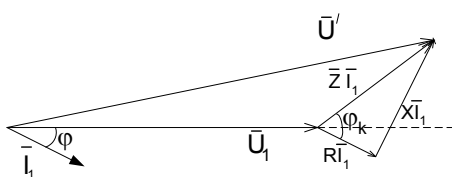
Úroveň přeslechového signálu HDO by neměla při připojených vazbách HDO překročit hodnotu 0,3 % Un.

1.4.4 Nesymetrie napětí

Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95% desetiminutových středních efektivních zpětné složky napájecího napětí v rozsahu 0-2% sousledné složky. Ve výjimečných případech 3%.

1.4.4.1 Nesymetrie distribučních sítí

Zvolme trojfázovou trojvodičovou síť, nesouměrně zatíženou známými složkami proudu $I_1, I_2, I_0 = 0$. Pro souslednou složku napětí zátěže můžeme nakreslit fázorový diagram – Obr. 1.6.



Obr. 1.6: Fázorový diagram pro sousledná složka napětí zátěže

Pro souslednou a zpětnou složku fázového napětí lze tedy psát

$$\bar{U}_1 = \bar{U}' - \bar{I}_1 \bar{Z} \quad (1.2)$$

$$\bar{U}_2 = -\bar{I}_2 \bar{Z} \quad (1.3)$$

kde $\bar{U}'$ je souměrné napětí na začátku vedení

$\bar{Z} = \bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$ je souměrná impedance vedení (sousledná i zpětná složka jsou stejné)

Podílem rovnic (1.2), (1.3) obdržíme

$$\frac{1}{\rho_U} = \frac{\bar{U}_1}{\bar{U}_2} = \frac{\bar{U}' - \bar{I}_1 \bar{Z}}{-\bar{I}_2 \bar{Z}} \quad (1.4)$$

V případě, že $\varphi \approx \varphi_k$, můžeme psát

$$\frac{1}{\rho_U} = \frac{U' - I_1 Z}{-I_2 Z} = \frac{I_1}{I_2} \left(1 - \frac{U'}{I_1 Z} \right) = \rho_1 \left(1 - \frac{I_k}{I_1} \right) \quad (1.5)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_U} = 1 - \frac{I_k}{I_1}$$

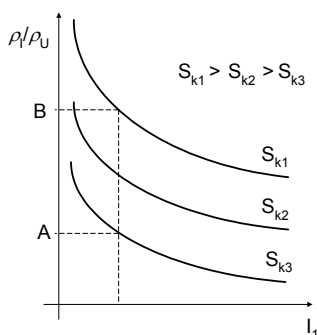
kde $\rho_U = \frac{U_2}{U_1}$ je činitel nesymetrie napětí

$\rho_I = \frac{I_2}{I_1}$ je činitel nesymetrie proudu (zátěže)

$I_k = \frac{U'}{Z}$ je zkratový proud v daném místě sítě

Rovnice (1.4) má zápornou hodnotu – nesymetrie je na obě strany od nuly souměrná. Z rovnice (1.4) lze při známé hodnotě nesymetrie zatížení určit úroveň napěťové nesymetrie v daném místě sítě.

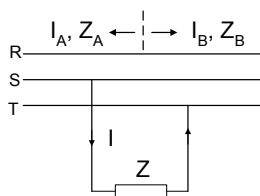
$$\frac{\rho_I}{\rho_U} = 1 - \frac{S_k}{\sqrt{3}U} \frac{1}{I_1} \quad (1.6)$$



Obr. 1.7: Nesymetrie

Napěťová nesymetrie je nepřímo úměrná zkratovému výkonu sítě pro stejnou hodnotu sousledné složky zatížení I_1 (viz body A a B v Obr. 1.7).

1.4.4.2 Závislost napěťové nesymetrie na jednofázovém výkonu



Obr. 1.8

V místě připojení jednofázového spotřebiče (Obr. 1.8) platí podle [10] pro napěťovou nesymetrii vztah (1.7).

$$\rho_U = \frac{Z_2^{AB}}{Z_2^{AB} + Z} \quad (1.7)$$

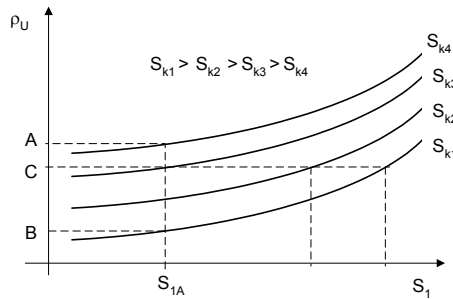
kde $Z_2^{AB} = \frac{Z_2^A Z_2^B}{Z_2^A + Z_2^B}$ je ekvivalentní zpětná impedance větví A a B,

Z je impedance jednofázového spotřebiče o výkonu S_1 .

Za předpokladu, že $Z_2^{AB} = Z_1^{AB} = \frac{U^2}{S_k}$ a $Z = \frac{U^2}{S_1}$, bude platit

$$\rho_U = \frac{\frac{U^2}{S_k}}{\frac{U^2}{S_k} + \frac{U^2}{S_1}} = \frac{S_k S_1}{S_k (S_k + S_1)} \quad (1.8)$$

$$\rho_U = \frac{S_1}{S_1 + S_k} \quad (1.9)$$



Obr. 1.9

Výkon jednofázového spotřebiče S_{1A} způsobí větší napěťovou nesymetrii při menším zkratovém výkonu a naopak (viz hodnoty A a B v Obr. 1.9). Při stanovené hranici ρ_U – bod C je nutno pro vyšší hodnoty S_1 zvětšovat i S_k .

1.4.4.3 Nesymetrie jednofázové elektrické trakce

Napájecí trakční transformovny jsou k síti 110 kV připojeny buď zasmyčkováním, nebo připojením „T“ obvykle ve vzdálenosti 40 až 80 km. Výkony lokomotiv se pohybují mezi 4 až 6 MW.

Nesymetrie při napájení jedním transformátorem (Obr. 1.10)

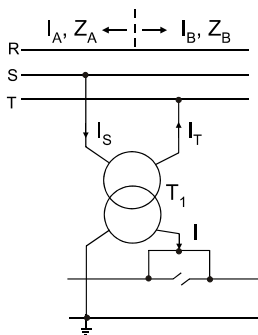
Za předpokladu, že převod transformátoru zvolíme $p = 1$ můžeme pro složky zatížení primární strany transformátoru psát

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_R \\ \bar{I}_S \\ \bar{I}_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I - I \\ (\bar{a} - \bar{a}^2)I \\ (\bar{a}^2 - \bar{a})I \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$\text{kde } \bar{I}_R = 0 \quad \bar{I}_S = I \quad \bar{I}_T = -I$$

$$\text{Potom proudová nesymetrie } \bar{\rho}_I = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = -1 \text{ a napěťová } \rho_U = \frac{S_1}{S_1 + S_k}.$$

Sekundární proud I je dán součtem proudů z obou napájených úseků, tj. nalevo i napravo od napájecí stanice. Tyto proudy budou sice proměnné podle požadavků zatížení, ale vzhledem k tomu, že výsledná sousledná a zpětná složka proudu mají stále stejnou hodnotu pro jakékoliv zatížení, bude proudová nesymetrie vždy 100%. Napěťová nesymetrie bude záviset na zkratovém výkonu v místě připojení a velikosti zatížení trakčního transformátoru S_1 podle (1.9).



Obr. 1.10: Napájení střídavé trakce jednofázovým transformátorem

Nesymetrie při napájení dvěma transformátory spojenými do „V“ (Obr. 1.11)

Napětí:

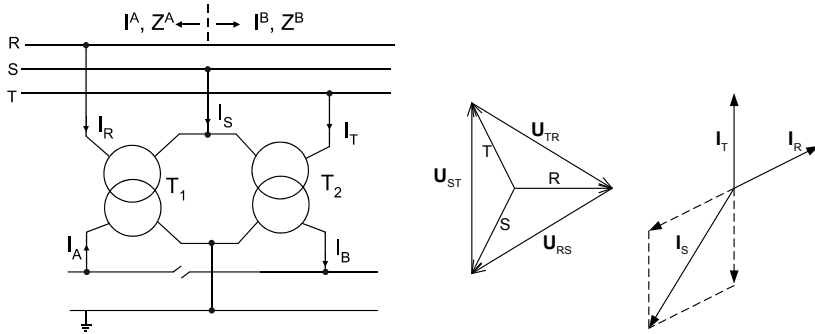
$$\bar{U}_{RS} = U \angle 210^\circ \quad \bar{U}_{ST} = U \angle 90^\circ \quad \bar{U}_{TR} = U \angle -30^\circ$$

Za předpokladu, že $I = I_A = I_B$ a převod transformátorů $p = 1$, platí pro proudy vztah (1.11)

$$\bar{I}_R = -\frac{\bar{U}_{RS}}{\bar{Z}_R} = I \angle (210^\circ - 180^\circ) = I \angle 30^\circ$$

$$\bar{I}_T = \frac{\bar{U}_{ST}}{\bar{Z}_T} = I \angle 90^\circ \quad (1.11)$$

$$\bar{I}_S = -\bar{I}_R - \bar{I}_T = \frac{\bar{U}_{RS}}{\bar{Z}_R} - \frac{\bar{U}_{ST}}{\bar{Z}_T} = -(I \angle 30^\circ + I \angle 90^\circ) = \sqrt{3} \bar{a}^2 I$$



Obr. 1.11: Napájení střídavé trakce dvěma transformátory zapojenými do „V“

Transformace do složek

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) \\ I \bar{a}^2 \sqrt{3} \\ jI \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{3} \left[I \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) + \bar{a} \cdot I \bar{a}^2 \sqrt{3} + \bar{a}^2 jI \right] = \frac{2}{\sqrt{3}} I \quad (1.13)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3} \left[I \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) + \bar{a}^2 \cdot I \bar{a}^2 \sqrt{3} + \bar{a} \cdot jI \right] = \frac{1}{\sqrt{3}} aI$$

$$\bar{\rho}_1 = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \frac{1}{2} \angle 120^\circ \quad (1.14)$$

Proudová nesymetrie při spojení transformátorů do „V“ a rovnoměrném zatížení sekundární strany je 0,5.

Pro obecně různá zatížení $I_A \neq I_B$

$$\begin{aligned}\bar{I}_R &= I_A \angle 30^\circ \\ \bar{I}_T &= I_B \angle 90^\circ\end{aligned}\tag{1.15}$$

$$\bar{I}_S = I_B \angle 270^\circ - I_A \angle 30^\circ$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \frac{1}{3} \left[I_A \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) + a \left(-j I_B - \frac{\sqrt{3}}{2} I_A - j \frac{1}{2} I_A \right) + a^2 j I_B \right] \\ \bar{I}_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} (I_A + I_B)\end{aligned}\tag{1.16}$$

$$\begin{aligned}\bar{I}_2 &= \frac{1}{3} \left[I_A \left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) + a^2 \left(-j I_B - \frac{\sqrt{3}}{2} I_A - j \frac{1}{2} I_A \right) + a \cdot j I_B \right] \\ \bar{I}_2 &= -\frac{1}{\sqrt{3}} (a^2 I_A + I_B)\end{aligned}$$

$$\bar{\rho}_I = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = -\frac{(a^2 I_A + I_B)}{(I_A + I_B)}\tag{1.17}$$

Proudy obou napájených úseků budeme dále uvažovat jako fázory induktivního charakteru $\bar{I}_A = I_A \angle -\varphi_A$, $\bar{I}_B = I_B \angle -\varphi_B$ a potom můžeme souslednou a zpětnou složku primárního proudu psát jako

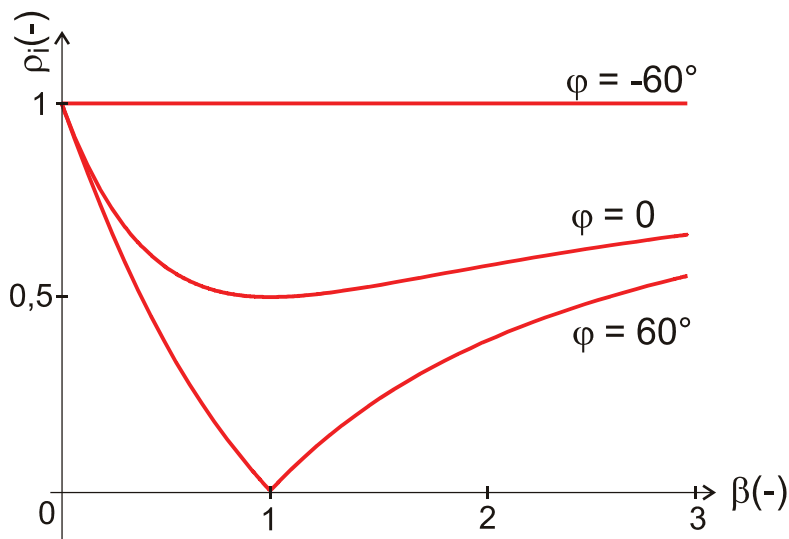
$$\begin{aligned}\bar{I}_1 &= \frac{1}{\sqrt{3}} (I_A \angle -\varphi_A + I_B \angle -\varphi_B) \\ \bar{I}_2 &= -\frac{1}{\sqrt{3}} (a^2 I_A \angle -\varphi_A + I_B \angle -\varphi_B)\end{aligned}\tag{1.18}$$

Dále označíme poměr proudů

$$\frac{I_A \angle -\varphi_A}{I_B \angle -\varphi_B} = \frac{I_A}{I_B} (\varphi_A - \varphi_B) = \beta \angle \Delta \varphi\tag{1.19}$$

$$\bar{\rho}_I = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = -\frac{(1+a) - \beta \angle \Delta \varphi}{1 + \beta \angle \Delta \varphi}\tag{1.20}$$

Po výpočtu absolutní hodnoty proudové nesymetrie ρ_i lze derivováním této funkce podle obou proměnných (β a $\Delta\varphi$) nalézt poměr zatížení způsobující minimální a maximální proudovou nesymetrii (viz [10]).



Obr. 1.12

Pro napěťovou nesymetrii se opět uplatní rovnice (1.9), kde S_1 a S_2 jsou výkony zátěží z obou stran od napájecí stanice, tedy zatížení transformátorů T_1 a T_2

$$\rho_U = \frac{S_1 + S_2}{S_1 + S_2 + S_k} \quad (1.21)$$

Obecně platí, že nesouměrné zatížení transformátoru zvyšuje ztráty a má přímý vliv na jeho využití, proto nejvyšší ze tří hodnot proudu nemá překročit přípustnou jmenovitou hodnotu zátěže.

1.5. Literatura

- [1] Pravidla provozování distribučních soustav [on-line]. 2011 [cit. 2011-11-1]. Dostupné z www.eru.cz
- [2] Zpráva o provozu elektrizační soustavy v roce 2010 [on-line]. 2011 [cit. 2011-11-1]. Dostupné z www.eru.cz
- [3] Zpráva o provozu elektrizační soustavy v roce 2006 [on-line]. 2007 [cit. 2011-10-2]. Dostupné z www.eru.cz
- [4] Máslo, K., Švejnar, P. Stabilita elektrizační soustavy, Vesmír 86, leden 2007, ISSN 1214-4029
- [5] Kodex přenosové soustavy [on-line]. 2011 [cit. 2011-10-2]. Dostupné z www.eru.cz

- [6] PNE 33 3430-7:1999 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě
- [7] Vyhláška MPO 79/2010 Sb. o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení
- [8] ČSN EN 50160 ed. 3:2011 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, Český normalizační institut
- [9] Trojánek, Z. Řízení elektrizačních soustav. Praha: ČVUT, 1982, s. 306
- [10] Hodinka, M. Vybrané problémy z elektrizačních soustav. Praha: SNTL, 1984, s. 184
- [11] Elcom [on-line]. 2009 [cit. 2011-6-13]. Dostupné z www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/145-linkovy-kondicioner.html

2. Distribuční síť velmi vysokého napětí

2.1. Provozování sítí

Distribuční sítě vvn jsou provozovány standardně v oddělených systémech příslušných jednotlivým transformátorům 400/110 kV event. 220/110 kV s maximálně možným zkruhováním jednotlivých síťových celků. Rozpojovací místa jsou volena tak, že z hlediska ztrát se způsob provozu sítě 110 kV blíží paralelnímu chodu.

2.2. Poruchy

Způsob provozování uzlu sítě 110 kV předurčuje, jaký typ poruch se může v této síti vyskytnout. Tato kapitola se omezuje na nejvýznamnější typ poruch, kterým jsou zkratů.

2.2.1 Zkratů

Zkrat je elektromagnetický přechodový děj, který je definován jako náhodné nebo úmyslné spojení dvou nebo více bodů obvodu (vodivé spojení fází, nebo jedné fáze se zemí), které mají při normálním provozu různá napětí, přes poměrně malý odpor nebo impedanci. Při zkratu protékají obvodem zkratové proudy, v blízkosti místa zkratu obvykle několikanásobně převyšující běžné provozní proudy, což má za následek odpojení zkratovaných částí od zdroje. Přirozeným růstem spotřeby elektrické energie a z toho odvozeným růstem elektrických výkonů v nových elektrárnách, spolu se stálým zvětšováním rozsahu elektrických sítí všech napětí, se zvětšují i zkratové proudy ve všech člancích elektrického rozvodu, počínaje napětím vvn a konče napětím nn. Růst zkratových proudů v elektrizační soustavě je evidentně nepříznivý jev.

Vývoj zkratových proudů ovlivňuje parametry rozvodné soustavy, konstrukci mnoha elektroenergetických výrobků a vyžaduje soustavné sledování v provozu. Pro správné dimenzování téměř všech elektroenergetických zařízení je nutné znát nejen velikost, ale i časový průběh zkratů.

Pro projektování a provoz elektrizační soustavy je třeba řešit problém zkratových proudů nejen pro současnou situaci, ale též pro budoucnost, tj. je nutné uvažovat životnost zařízení. Tato okolnost se doposud řeší použitím zařízení s větší zkratovou odolností. Opatření pro omezení zkratových proudů se používá jen tehdy, není-li k dispozici zařízení s potřebnými parametry.

2.2.1.1 Příčiny vzniku zkratu

Různé vady zařízení, zejména nedokonalá izolace – a to z výrobních důvodů (materiály, nevhodná technologie výroby atd.), nebo z důvodu špatné montáže (nepředpisové pokládání kabelů, nedodržení technologie při montáži kabelových spojek a koncovek atd.). K tomu přistupují též poruchy z důvodu zhoršení kvality izolace dlouhodobým přetěžováním kabelových vedení - zrychlené stárnutí izolace způsobené zvýšenou teplotou při nadproudech.

Přepětí - atmosférické nebo i provozní způsobí často porušení izolace a následný zkrat.

Cizí zásahy (lidé, přírodní vlivy) - jedná se o velmi častou příčinu vzniku zkratu, např. překopnutí či přetržení kabelu při zemních pracích všeho druhu, dále sesuvy půdy, působení hlodavců na pláště kabelu, pády stromů do venkovního vedení. Do této kategorie je možné zařadit i narušení plášťů kabelů působením bludných proudů.

Nedostatečná zkratová odolnost zařízení - vyskytuje se u starších, nerekonstruovaných zařízení v soustavách s prudkým nárůstem hodnot zkratových proudů. V důsledku částečného poškození zařízení při zkratu dochází pak k následným poruchám.

Vlivem selhání lidského činitele - chybné manipulace v různých (zvláště složitých) elektrických zařízeních, např. vypnutí přípojnicového odpojovače při zatížení (bez vypnutí předřazeného vypínače) v rozvodech vn a vvn. Dále je to ponechání cizích předmětů (zvláště kovových) v zařízení po předchozí demontáži atd.

2.2.1.2 Nebezpečné děje při zkratu

Tepelné působení - působením zkratových proudů stárne izolace kabelu, dochází ke zmenšování mechanické pevnosti vodičů, narušení mechanické pevnosti různých spojů atd. Zvláště nebezpečné je tepelné působení elektrického oblouku (vznik požárů, těžké popáleniny osob).

Mechanické působení - při zkratu vznikají vlivem elektromagnetického působení zkratového proudu mechanické síly, které způsobují ve formě dynamického rázu těžké mechanické namáhání všech částí elektrického systému (ohýbání pevných vodičů, roztržení podpěrných izolátorů, kývání lanových vodičů, přerušování vinutí elektrických strojů atd.).

Pokles napětí - při zkratu dochází k náhlému poklesu impedance el. obvodu a k mimořádnému poklesu napětí, přičemž do místa poruchy tečou zkratové proudy ze všech zdrojů ES dle jejich výkonů a el. vzdálenosti. Úbytky napětí rostou od místa zdrojů k místu zkratu, takže pokles napětí se projeví různou měrou v celé soustavě. Pokles napětí se nepříznivě projeví na funkci řady elektrických spotřebičů, např. indukčních motorů, kde prudce klesá točivý moment motoru. U světelných spotřebičů dochází ke zmenšení světelného toku (žárovky), popřípadě ke zhasnutí (výbojky, zářivky). Pokles napětí v přenosových soustavách ohrožuje také stabilitu chodu systému.

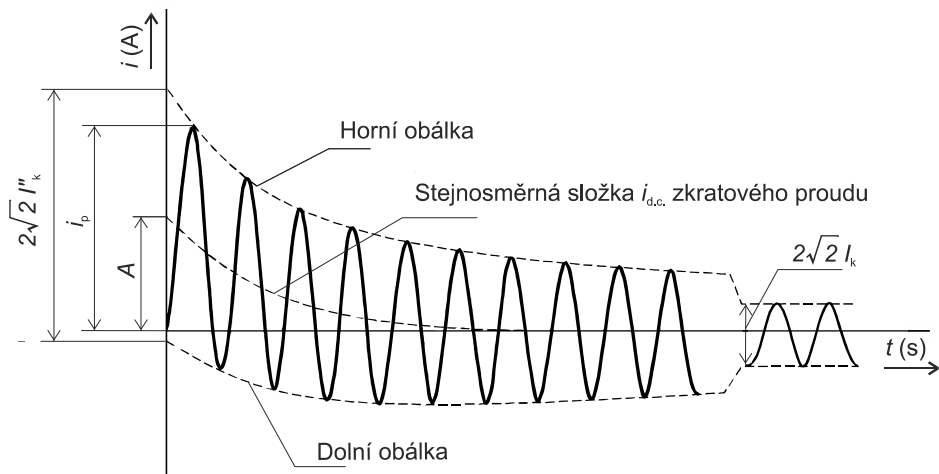
Indukované napětí - zkratové proudy tekoucí silovými vedeními (zemí) ohrožují funkci řady sdělovacích zařízení svým magnetickým polem, a tím i indukovaným napětím na těchto sdělovacích zařízeních.

Přepětí – v souvislosti s vypínáním zkratových proudů vznikají v rozvodech přepětí dosahující hodnoty až dvojnásobku jmenovitého napětí. Vedle toho je třeba věnovat pozornost také velikosti zotaveného napětí po odepnutí zkratu vypínačem. Zotavené napětí může svojí strmostí narušit nejen izolaci el. zařízení, ale také vlastní vypínací proces ve vypínači opětným přeskokem vypínací dráhy

a opětovným zapálením oblouku mezi kontakty vypínače, což může vést i k havárii vypínače.

2.2.2 Časové průběhy zkratových proudů

V důsledku náhlé změny impedance při zkratu probíhá v synchronních strojích a v ostatních prvcích ES přechodný děj. Energie magnetického pole se v těchto prvcích nemůže měnit skokem, a proto má zkratový proud v závislosti na čase neharmonický průběh (Obr. 2.1). Největší hodnoty dosahuje zkratový proud v prvních okamžicích po vzniku zkratu. S rostoucím časem zkratový proud klesá, až se ustálí na harmonickém průběhu [1].



Obr. 2.1: Časový průběh zkratového proudu [3]

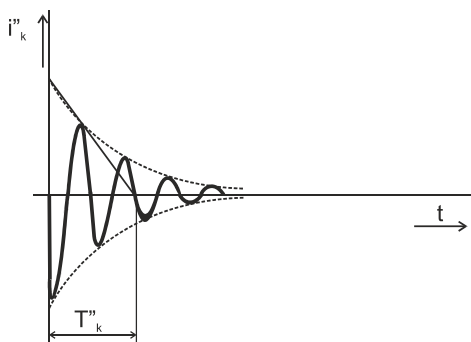
Reálný časový průběh zkratu obsahuje tyto základní složky:

Rázovou (subtranzitní) složku $i_k''(t)$ Obr. 2.2 – má sinusový průběh, frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T_k'' . Projevuje se na začátku zkratu a trvá méně než desetinu sekundy, je to složka rychle doznívající.

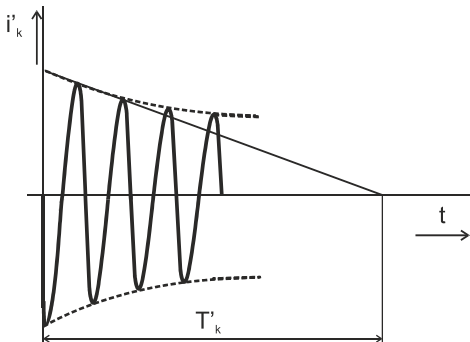
Přechodnou (tranzitní) složku $i_k'(t)$ Obr. 2.3 – má sinusový průběh, frekvenci soustavy a amplituda exponenciálně klesá s časovou konstantou T_k' . Jedná se o složku pomaleji doznívající. Doba zániku bývá zpravidla řádově v sekundách.

Ustálenou složku $i_k(t)$ Obr. 2.4 – má sinusový průběh, frekvenci soustavy a konstantní amplitudu.

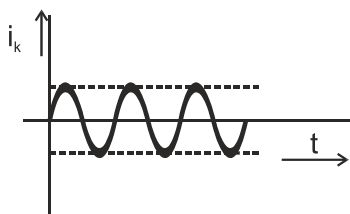
Stejnosměrnou (aperiodickou) složku $i_{d.c.}(t)$ Obr. 2.5 – která představuje exponenciálně klesající stejnosměrný proud s časovou konstantou $T_{d.c.}$.



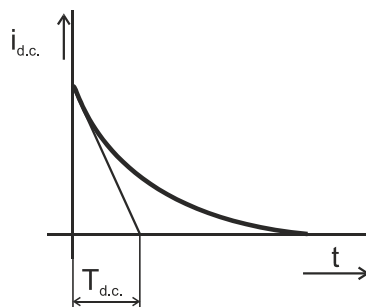
Obr. 2.2: Rázová složka



Obr. 2.3: Přechodná složka



Obr. 2.4: Ustálená složka



Obr. 2.5: Stejnoseměrná složka

Charakteristické hodnoty průběhu zkratového proudu jsou definovány normou [3] a slouží nám k zjednodušení popisu přechodného jevu:

- *počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''* (initial symmetrical short-circuit current) – efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci,
- *nárazový zkratový proud i_p* (peak short-circuit current) - maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu,
- *souměrný zkratový vypínací proud I_b* (symmetrical short-circuit breaking current) – efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení,
- *ustálený zkratový proud I_k* (steady-state short-circuit current) - efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu,
- *ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th}* (thermal equivalent short-circuit current) – efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné

účinky a stejnou dobu trvání jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění,

- *doba trvání zkratu T_k* – doba od počátku vzniku zkratu do okamžiku oddělení kontaktů posledního pólu spínacího zařízení.

Zkraty se dále rozdělují podle způsobu spojení živých částí a země na:

- *jednofázové* (jednopolové) – spojení jedné fáze se zemí, v síti s účinně uzemněným uzlem,
- *dvoufázové* (dvoupolové) – spojení dvou fází,
- *dvoufázové zemní* (dvoupolové zemní) – spojení dvou fází se zemí,
- *trojfázové* (trojpolové) – spojení všech tří fází,
- *trojfázové zemní* (trojpolové zemní) – spojení tří fází se zemí.

2.2.3 Řešení nesouměrných zkratů

Při zkratové poruše dochází většinou k porušení jedné nebo dvou fází, jedná se tedy o zkraty nesouměrné. V tomto případě se neúčastní všechny fáze stejnou mírou na výsledné hodnotě zkratového proudu. Trojfázový zkrat se na vedení vyskytuje jen zřídka, ale jelikož velikost zkratového proudu je při tomto zkratu často nejvyšší, je nutné se tímto druhem zkratu také zabývat, zejména při dimenzování zařízení. Na rozdíl od venkovních vedení se u kabelových vedení trojfázový zkrat vyskytuje mnohem častěji, jelikož oblouk vzniklý při zkratu většinou poruší postupně všechny tři fáze. Pravděpodobnost výskytu jednotlivých typů zkratů na vedení je uvedena v Tab. 2.1 [2].

Druh zkratu	Relativní pravděpodobnost výskytu [%]		
	vn	110 kV	220 kV
Trojfázový	5	0,4	0,9
Dvoufázový	10	4,8	0,6
Dvoufázový zemní	20	3,8	5,4
Jednofázový	65	91	93,1

Tab. 2.1: Pravděpodobnost výskytu jednotlivých zkratů v síti.

Řešení nesouměrných zkratů se dá usnadnit rozkladem proudů a napětí na souměrné složky. Podstatou této metody je rozklad nesouměrného děje na několik jednoduchých souměrných dějů, které podle zákona superpozice můžeme opět složit do celkového děje nesouměrného.

Existuje více způsobů jak tyto rozklady uskutečnit, mezi nejznámější patří [1]:

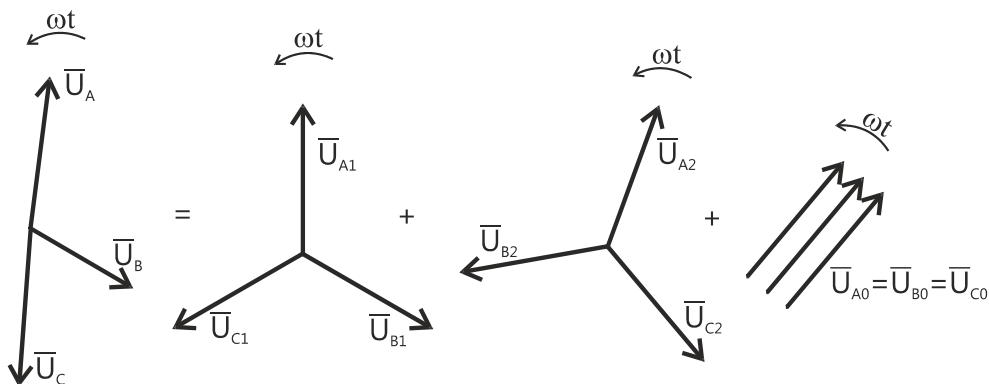
- Metoda symetrických složek (C. L. Fortescue – 1918)

- Metoda diagonálních složek α , β , 0 (E. Clarková – 1938)
- Metoda složek S, D, Z (W. Kimbark - 1939)
- Metoda složek R, S, T (N. Koga - 1956)

Norma ČSN EN 60909 [3] vychází z metody symetrických složek (Fortescuova metoda), proto se dále budeme zabývat pouze touto metodou.

2.2.4 Metoda souměrných složek

V trojfázových soustavách lze každou hvězdičku nesymetrických fázorů nahradit složením symetrických fázorů sousledné, zpětné a netočivé soustavy (Obr. 2.6).



Obr. 2.6: Náhrada nesymetrických fázorů symetrickými fázory

Součet fázorů jednotlivých symetrických vektorů $\bar{U}_{A1}, \bar{U}_{A2}, \bar{U}_{A0}$ je roven původnímu nesymetrickému vektoru $\bar{U}_A$:

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_{A1} + \bar{U}_{A2} + \bar{U}_{A0}, \\ \bar{U}_B &= \bar{U}_{B1} + \bar{U}_{B2} + \bar{U}_{B0}, \\ \bar{U}_C &= \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{C2} + \bar{U}_{C0}.\end{aligned}\tag{2.1}$$

Zvolíme-li za referenční fázi fázi A, přejde soustava rovnic (2.1) v soustavu rovnic

$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0, \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 + \bar{U}_0, \\ \bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 + \bar{U}_0,\end{aligned}\tag{2.2}$$

kde pro operátor $\bar{a}$ platí

$$\begin{aligned}\bar{a} &= e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \\ \bar{a}^2 &= e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}, \\ 1 + \bar{a} + \bar{a}^2 &= 0, \\ \bar{a}^3 &= 1, \quad \bar{a}^4 = \bar{a}.\end{aligned}\tag{2.3}$$

Jestliže označíme nesymetrickou soustavu fázorů napětí $\bar{U}_F$ a symetrickou soustavu fázorů napětí $\bar{U}_S$

$$\bar{U}_F = \begin{bmatrix} \bar{U}_A \\ \bar{U}_B \\ \bar{U}_C \end{bmatrix}, \quad \bar{U}_S = \begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_0 \end{bmatrix},\tag{2.4}$$

pak je možné soustavu rovnic (2.2) přepsat do maticového tvaru

$$\bar{U}_F = \bar{F} \cdot \bar{U}_S,\tag{2.5}$$

kde $\bar{F}$ je desymetrizační transformační matice

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{bmatrix}.\tag{2.6}$$

Jelikož determinant této matice je různý od nuly

$$\begin{aligned}|\bar{F}| &= \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \bar{a}^2 & \bar{a} & 1 \\ \bar{a} & \bar{a}^2 & 1 \end{vmatrix} = \bar{a} + \bar{a}^4 + \bar{a} - \bar{a}^2 - \bar{a}^2 - \bar{a}^2 = \\ &= 3(\bar{a} - \bar{a}^2) = 3j\sqrt{3} \neq 0,\end{aligned}\tag{2.7}$$

lze provést její inverzi a přejít od fázových hodnot k hodnotám souměrných složek

$$\bar{U}_S = \bar{F}^{-1} \cdot \bar{U}_F,\tag{2.8}$$

kde

$$\bar{F}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.9)$$

Maticové rovnici (2.8) odpovídá soustava rovnic

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a} \bar{U}_B + \bar{a}^2 \bar{U}_C), \\ \bar{U}_2 &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{a}^2 \bar{U}_B + \bar{a} \bar{U}_C), \\ \bar{U}_0 &= \frac{1}{3} (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Všechny tři soustavy (sousedná, zpětná a netočivá) lze považovat za samostatné. Sečtením symetrických napětí a symetrických úbytků na jednotlivých zkratových impedancích $\bar{Z}_1, \bar{Z}_2, \bar{Z}_0$ dostaneme jednotlivá symetrická napětí zdroje $\bar{E}_1, \bar{E}_2, \bar{E}_0$

$$\begin{aligned} \bar{E}_1 &= \bar{U}_1 + \bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_1, \\ \bar{E}_2 &= \bar{U}_2 + \bar{I}_2 \cdot \bar{Z}_2, \\ \bar{E}_0 &= \bar{U}_0 + \bar{I}_0 \cdot \bar{Z}_0. \end{aligned} \quad (2.11)$$

V praxi lze považovat napětí generátoru vždy za souměrné. Napětí zdroje má pak pouze souslednou složku ($\bar{E}_2 = \bar{E}_0 = 0$) a rovnice (2.11) můžeme přepsat do tvaru

$$\begin{aligned} \bar{E} &= \bar{U}_1 + \bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_1 \Rightarrow \bar{U}_1 = \bar{E} - \bar{I}_1 \cdot \bar{Z}_1, \\ 0 &= \bar{U}_2 + \bar{I}_2 \cdot \bar{Z}_2 \Rightarrow \bar{U}_2 = -\bar{I}_2 \cdot \bar{Z}_2, \\ 0 &= \bar{U}_0 + \bar{I}_0 \cdot \bar{Z}_0 \Rightarrow \bar{U}_0 = -\bar{I}_0 \cdot \bar{Z}_0. \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.2.5 Odvození rovnic pro jednotlivé druhy zkratů

Při odvozování jednotlivých druhů zkratů vyjdeme ze základních rovnic pro napětí odvozených dříve (2.2) a (2.10).

Podobně můžeme napsat soustavy rovnic pro fázové proudy

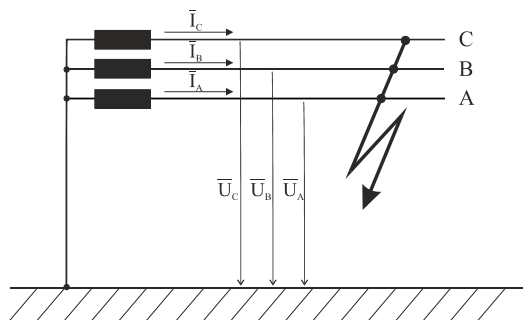
$$\begin{aligned}
 \bar{I}_A &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_0, \\
 \bar{I}_B &= \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{I}_0, \\
 \bar{I}_C &= \bar{a} \bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{I}_0.
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Pro proudy souměrných složek pak platí

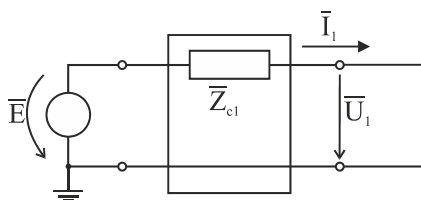
$$\begin{aligned}
 \bar{I}_1 &= \frac{1}{3} (\bar{I}_A + \bar{a} \bar{I}_B + \bar{a}^2 \bar{I}_C), \\
 \bar{I}_2 &= \frac{1}{3} (\bar{I}_A + \bar{a}^2 \bar{I}_B + \bar{a} \bar{I}_C), \\
 \bar{I}_0 &= \frac{1}{3} (\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C).
 \end{aligned}
 \tag{2.14}$$

V neposlední řadě musíme vyjít z rovnice (2.12), která je nutná pro odvození jednotlivých druhů zkratu, při předpokladu souměrného napětí zdroje. Odvození se provede pro trojfázový, dvoufázový, jednofázový a dvoufázový zemní zkrat.

2.2.5.1 Trojfázový souměrný zkrat



Obr. 2.7: Schematické znázornění trojfázového zkratu



Obr. 2.8: Náhradní schéma při trojfázovém souměrném zkratu

Podle Obr. 2.7 se napětí v místě zkratu rovnají 0 ($\bar{U}_A = \bar{U}_B = \bar{U}_C = 0$) a před zkratem je soustava v chodu naprázdno.

Z předpokladu nulových hodnot napětí při zkratu podle (2.2) plyne

$$\begin{aligned}
\bar{U}_A &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 0, \\
\bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 0, \\
\bar{U}_C &= \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 0,
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\Rightarrow \bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0 = 0.$$

Dosazením (2.15) do rovnice (2.12) dostaneme

$$\begin{aligned}
\bar{I}_2 &= \bar{I}_0 = 0, \\
\bar{I}_1 &= \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1},
\end{aligned} \tag{2.16}$$

na základě čehož můžeme nakreslit náhradní schéma Obr. 2.8.

Dosazením souměrných proudů (2.16) do (2.13) dostaneme vztahy pro výpočet proudů v jednotlivých fázích

$$\begin{aligned}
\bar{I}_A &= \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1}, \\
\bar{I}_B &= \bar{a}^2 \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1}, \\
\bar{I}_C &= \bar{a} \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1}.
\end{aligned} \tag{2.17}$$

2.2.5.2 Jednofázový zkrat

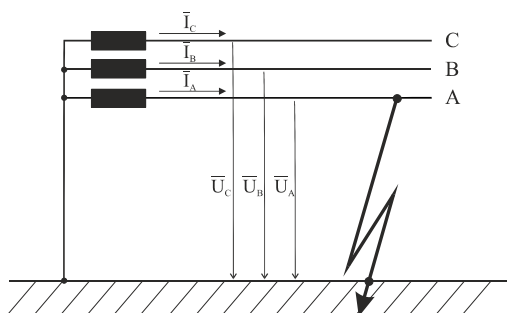
Při tomto typu zkratu budeme vycházet z předpokladu, že $\bar{U}_A = 0$, $\bar{I}_B = \bar{I}_C = 0$ a před zkratem je soustava v chodu naprázdno. Tyto předpoklady jsou zřejmé ze schematického znázornění jednofázového zkratu na Obr. 2.9.

Dosazením $\bar{I}_B = \bar{I}_C = 0$ do (2.14) dostaneme

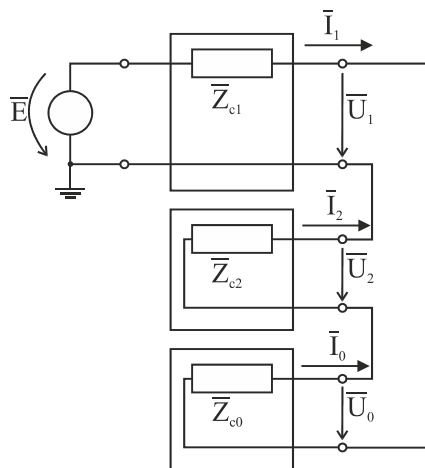
$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_A, \tag{2.18}$$

Dosazením $\bar{U}_A = 0$ do (2.2) a (2.12) získáme

$$\bar{U}_A = \bar{U}_0 + \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = \bar{E} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 - \bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_2 - \bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_0 \tag{2.19}$$



**Obr. 2.9: Schematické znázornění
jednofázového zkratu**



**Obr. 2.10: Náhradní schéma při
jednofázovém zkratu**

Odkud s použitím (2.18) obdržíme vztah pro jednotlivé symetrické složky

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \frac{\bar{E}}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0)}. \quad (2.20)$$

a sečtením složek (2.20) pak vyjádříme výsledný zkratový proud

$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= \frac{3 \cdot \bar{E}}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0)}, \\ \bar{I}_B &= \bar{I}_C = 0. \end{aligned} \quad (2.21)$$

Složková napětí dostaneme dosazením (2.20) do (2.12)

$$\begin{aligned} \bar{U}_1 &= \bar{I}_1 (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0) - \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 = \bar{I}_1 (\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0) = \\ &= \bar{E} \cdot \frac{(\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0)}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0)}, \\ \bar{U}_2 &= -\bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_2 = -\bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_1 = -\bar{E} \cdot \frac{\bar{Z}_2}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0)}, \\ \bar{U}_0 &= -\bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_0 = -\bar{Z}_0 \cdot \bar{I}_1 = -\bar{E} \cdot \frac{\bar{Z}_0}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0)} \end{aligned} \quad (2.22)$$

a fázová napětí dosazením do (2.22) a (2.12)

$$\begin{aligned}
\bar{U}_A &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = \bar{I}_1(-\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 - \bar{Z}_2) = 0, \\
\bar{U}_B &= \bar{U}_0 + \bar{a}^2\bar{U}_1 + \bar{a}\bar{U}_2 = \bar{E} \cdot \frac{(\bar{a}^2 - 1) \cdot \bar{Z}_0 + (\bar{a}^2 - \bar{a}) \cdot \bar{Z}_2}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0)}, \\
\bar{U}_C &= \bar{U}_0 + \bar{a}\bar{U}_1 + \bar{a}^2\bar{U}_2 = \bar{E} \cdot \frac{(\bar{a} - 1) \cdot \bar{Z}_0 + (\bar{a} - \bar{a}^2) \cdot \bar{Z}_2}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0)}.
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Na základě rovnice (2.20) můžeme vzájemně propojit náhradní složková schémata Obr. 2.10.

2.2.5.3 Dvufázový zkrat

Při tomto typu zkratu budeme vycházet z předpokladu, že $\bar{U}_B = \bar{U}_C$, $\bar{I}_B = -\bar{I}_C$, $\bar{I}_A = 0$ a před zkratem je soustava v chodu naprázdno. Tyto předpoklady jsou opět zřejmé ze schematického znázornění dvufázového zkratu na Obr. 2.11.

Dosazením $\bar{I}_B = -\bar{I}_C$, $\bar{I}_A = 0$ do (2.14):

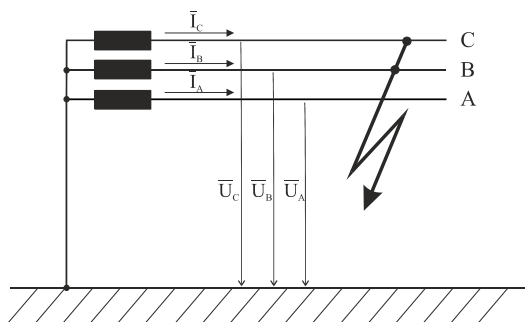
$$\begin{aligned}
\bar{I}_0 &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_B - \bar{I}_B) = 0, \\
\bar{I}_1 &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_A + \bar{a}\bar{I}_B + \bar{a}^2\bar{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot (\bar{a}\bar{I}_B - \bar{a}^2\bar{I}_B) = j \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \bar{I}_B, \\
\bar{I}_2 &= \frac{1}{3} \cdot (\bar{I}_A + \bar{a}^2\bar{I}_B + \bar{a}\bar{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot (\bar{a}^2\bar{I}_B - \bar{a}\bar{I}_B) = -j \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \bar{I}_B.
\end{aligned} \tag{2.24}$$

Dosazením $\bar{U}_B = \bar{U}_C$ do (2.2) dostaneme

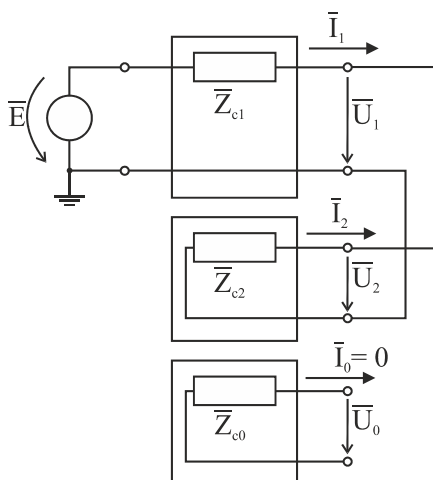
$$\begin{aligned}
\bar{a}^2\bar{U}_1 + \bar{a}\bar{U}_2 &= \bar{a}\bar{U}_1 + \bar{a}^2\bar{U}_2, \\
\bar{U}_1(\bar{a}^2 - \bar{a}) &= \bar{U}_2(\bar{a}^2 - \bar{a}), \\
\bar{U}_1 &= \bar{U}_2.
\end{aligned} \tag{2.25}$$

Dosazením (2.25) do (2.12), kde $\bar{U}_2 = \bar{U}_1$ přičemž z (2.24) vyplývá $\bar{I}_1 = -\bar{I}_2$ dostaneme

$$\bar{E} - \bar{Z}_1\bar{I}_1 = \bar{Z}_2\bar{I}_1 \Rightarrow \bar{I}_1 = -\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)}. \tag{2.26}$$



Obr. 2.11: Schematické znázornění dvoufázového zkratu



Obr. 2.12: Náhradní schéma při dvoufázovém zkratu

A protože lze (2.24) přepsat

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{3} \cdot (-\bar{a}^2 \bar{I}_C + \bar{a} \bar{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot \bar{I}_C (-\bar{a}^2 + \bar{a}) = \frac{j \cdot \sqrt{3}}{3} \cdot \bar{I}_C, \quad (2.27)$$

následovně dosazením (2.26) a (2.27) do (2.24) obdržíme jednotlivé fázové proudy

$$\begin{aligned} \bar{I}_A &= 0, \\ \bar{I}_B &= \frac{3 \cdot \bar{E}}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} = \frac{-j \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{E}}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)}, \end{aligned} \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_C &= -\frac{3 \cdot \bar{E}}{\sqrt{3} \cdot (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} = \frac{j \cdot \sqrt{3} \cdot \bar{E}}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)}, \\ \bar{I}_B &= -\bar{I}_C. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Dosazením (2.26) do (2.12) s použitím vzorce (2.25)

$$\bar{U}_{12} = \bar{E} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 = \bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_1 = \bar{U}_2, \quad (2.30)$$

pak

$$\bar{U}_0 = 0,$$

$$\bar{U} = \bar{E} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{I}_1 = \bar{E} \cdot \frac{\bar{Z}_2}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)}, \quad (2.31)$$

$$\bar{U} = \bar{Z}_2 \cdot \bar{I}_1 = \bar{E} \cdot \frac{\bar{Z}_2}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)}.$$

Dosazením (2.31) do (2.2) získáme soustavu rovnic pro fázová napětí

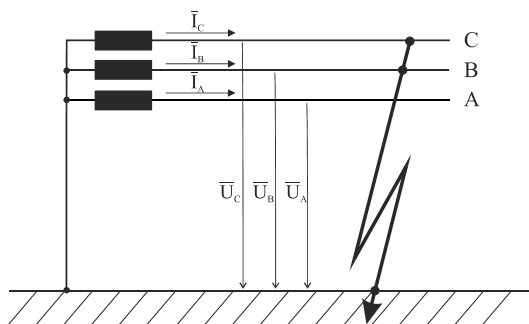
$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = \bar{E} \cdot \frac{2 \cdot \bar{Z}_2}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)}, \\ \bar{U}_B &= \bar{a}^2 \bar{U}_1 + \bar{a} \bar{U}_2 = -\bar{E} \cdot \frac{\bar{Z}_2}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)}, \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$\bar{U}_C = \bar{a} \bar{U}_1 + \bar{a}^2 \bar{U}_2 = -\bar{E} \cdot \frac{\bar{Z}_2}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)}.$$

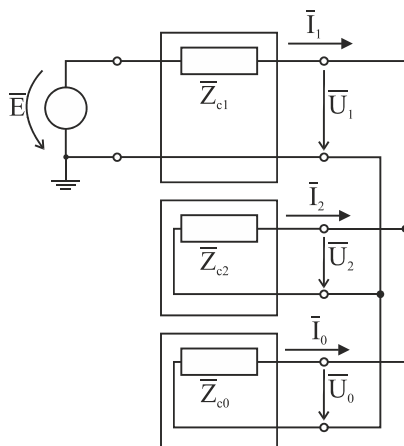
Na základě rovnic $\bar{I}_1 = -\bar{I}_2$, $\bar{I}_0 = 0$ již můžeme nakreslit vzájemné propojení náhradních schémat jednotlivých složkových soustav (Obr. 2.12)

2.2.5.4 Dvofázový zemní zkrat

Schematické znázornění dvofázového zemního zkratu je na Obr. 2.13. Při tomto typu zkratu budeme vycházet z předpokladu, že $\bar{U}_B = \bar{U}_C = 0$, $\bar{I}_A = 0$ a před zkratem je soustava v chodu naprázdno.



Obr. 2.13: Schematické znázornění dvofázového zemního zkratu



Obr. 2.14: Náhradní schéma při dvofázovém zemním zkratu

Dosazením $\bar{I}_A = 0$ do (2.13):

$$\bar{I}_A = \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = 0 \Rightarrow \bar{I}_1 = -(\bar{I}_0 + \bar{I}_2). \quad (2.33)$$

Dosazením $\bar{U}_B = \bar{U}_C = 0$ do (2.10) dostaneme

$$\bar{U}_1 = \bar{U}_2 = \bar{U}_0 = \frac{1}{3} \bar{U}_A. \quad (2.34)$$

Z rovnic (2.12) platí

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \frac{\bar{E} - \bar{U}_1}{\bar{Z}_1}, \\ \bar{I}_2 &= -\frac{\bar{U}_2}{\bar{Z}_2}, \\ \bar{I}_0 &= -\frac{\bar{U}_0}{\bar{Z}_0}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Součtem z (2.35) a použitím (2.34) dostaneme

$$(\bar{I}_0 + \bar{I}_2) = -\left(\frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_2} + \frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_0}\right) = -\bar{U}_1 \cdot \left(\frac{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}\right). \quad (2.36)$$

Dosazením (2.36) do (2.33)

$$\bar{I}_1 = \bar{U}_1 \cdot \left(\frac{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}\right) \Rightarrow \bar{U}_1 = \bar{I}_1 \cdot \left(\frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}\right). \quad (2.37)$$

Dosazením (2.37) do (2.35) obdržíme soustavu rovnic pro symetrické proudy

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \frac{\bar{E} - \bar{U}_1}{\bar{Z}_1} = \frac{\bar{E} - \bar{I}_1 \cdot \left(\frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}\right)}{\bar{Z}_1} = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \left(\frac{\bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}\right)}, \\ \bar{I}_2 &= -\frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_2} = -\bar{I}_1 \cdot \frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}, \\ \bar{I}_0 &= -\frac{\bar{U}_1}{\bar{Z}_0} = -\bar{I}_1 \cdot \frac{\bar{Z}_2}{\bar{Z}_2 + \bar{Z}_0}. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Dosazením (2.38) do (2.13) s použitím (2.33) obdržíme zkratové proudy

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_A &= -(\bar{I}_2 + \bar{I}_0) + (\bar{I}_2 + \bar{I}_0) = 0, \\
 \bar{I}_B &= \bar{I}_0 + \bar{a}^2 \bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 = \bar{I}_0 - \bar{a}^2 (\bar{I}_2 + \bar{I}_0) + \bar{a} \bar{I}_2 = \\
 &= -\bar{E} \cdot \frac{((\bar{a} - \bar{a}^2) \bar{Z}_0 + (1 - \bar{a}^2) \bar{Z}_2)}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_0 + \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}, \\
 \bar{I}_C &= -\bar{E} \cdot \frac{((\bar{a}^2 - \bar{a}) \bar{Z}_0 + (1 - \bar{a}) \bar{Z}_2)}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_0 + \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0}.
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

Dosazením (2.38), (2.37) a (2.34) do (2.2) dostaneme vztahy pro fázová napětí

$$\begin{aligned}
 \bar{U}_A &= \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_0 = 3 \cdot \bar{I}_1 \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_2}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2)} = \\
 &= 3 \cdot \bar{E} \cdot \frac{1}{\bar{Z}_1 + \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_2}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2)}} \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_2}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_2)} = \\
 &= 3 \cdot \bar{E} \cdot \frac{\bar{Z}_0 \cdot \bar{Z}_2}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + \bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_0 + \bar{Z}_2 \cdot \bar{Z}_0},
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

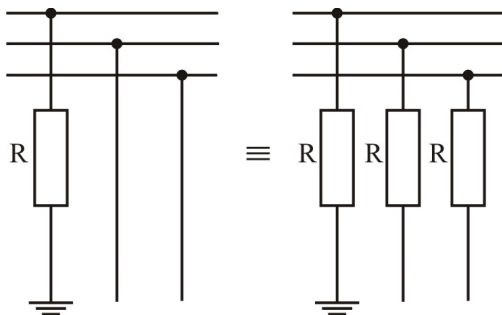
$$\bar{U}_B = \bar{U}_C = 0.$$

Vzájemné propojení složkových soustav při dvoufázovém zemním zkratu je uvedeno na Obr. 2.14.

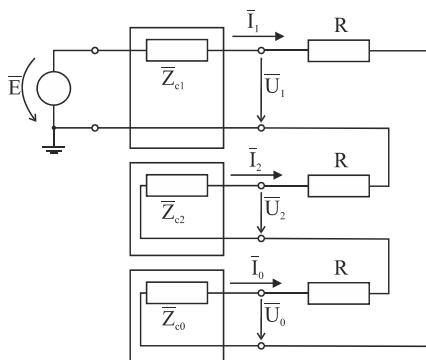
2.2.6 Vliv oblouku při zkratu

Norma [3] při výpočtu zkratových poměrů předpokládá dokonalý zkrat, ale současně připouští ve speciálních případech (nastavení ochran, apod.) uvažovat nedokonalý zkrat, reprezentovaný např. odporem oblouku.

Stanovení přechodového odporu nebo odporu oblouku je v praxi velmi obtížné, proto se zanedbává, anebo se používá empirických vztahů. Vliv oblouku při zkratu lze při prvním přiblížení nahradit rezistancí R_{obl} , jak je schematicky naznačeno na Obr. 2.15. Představme si, že místo oblouku v jedné fázi máme ve zkratové odbočce symetrický článek s rezistancí R . Potom se při jednofázovém zkratu za tímto článkem zvětší o R celková zkratová impedance do místa zkratu (ve všech složkových soustavách). Jinak se tento případ nijak neliší od jednofázového zkratu odvozeného v 2.2.5.2. Náhradní schéma je uvedeno na Obr. 2.16. Pro sousledný proud dostáváme vztah (2.41) [4].



Obr. 2.15: Schéma náhrady oblouku rezistancí při jednofázovém zkratu



Obr. 2.16: Náhradní schéma jednofázového zkratu při náhradě zkratového oblouku rezistancí

Postup řešení je shodný s postupem v 2.2.5.2. Z Obr. 2.15 plyne pro složkové proudy

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_2 = \bar{I}_0 = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 \cdot R_{obl}}. \quad (2.41)$$

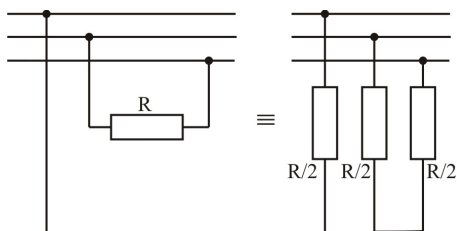
Pro fázové proudy a napětí platí

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{E}}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 \cdot R_{obl}}, \quad (2.42)$$

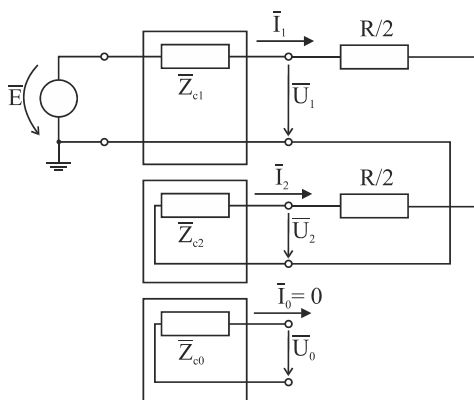
$$\bar{I}_B = \bar{I}_C = 0,$$

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= \bar{I}_A \cdot R_{obl} = \bar{E} \cdot \frac{3 \cdot R_{obl}}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 \cdot R_{obl})}, \\ \bar{U}_B &= \bar{E} \cdot \frac{(\bar{a}^2 - 1) \cdot \bar{Z}_0 + (\bar{a}^2 - \bar{a}) \cdot \bar{Z}_2 + \bar{a}^2 \cdot 3 \cdot R_{obl}}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 \cdot R_{obl})}, \\ \bar{U}_C &= \bar{E} \cdot \frac{(\bar{a} - 1) \cdot \bar{Z}_0 + (\bar{a} - \bar{a}^2) \cdot \bar{Z}_2 + \bar{a} \cdot 3 \cdot R_{obl}}{(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3 \cdot R_{obl})}, \end{aligned} \quad (2.43)$$

Chceme-li respektovat vliv oblouku při výpočtu dvoufázového zkratu, postupujeme podobně. Do zkratové odbočky zařadíme symetrický článek, tentokrát s rezistancemi $R/2$ podle Obr. 2.17. Další postup řešení je shodný s postupem v 2.2.5.3. Náhradní schéma je na Obr. 2.18.



Obr. 2.17: Schéma náhrady oblouku rezistancí při dvoufázovém zkratu



Obr. 2.18: Náhradní schéma dvoufázového zkratu při náhradě zkratového oblouku rezistancí

Podle [4] se v německé praxi používá pro výpočet odporu oblouku vztah (2.44)

$$R_{obl} = \frac{l_{obl} \cdot U_{obl}}{I_K''} \quad (\Omega/\text{vodič}; \text{cm}; \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}; \text{A}), \quad (2.44)$$

kde l_{obl} je délka oblouku, U_{obl} je napětí oblouku vztahované na jeho délku a I_K'' je počáteční souměrný zkratový proud.

Pro proudy které jsou větší než 100 A se uvažuje $U_{obl} = 16 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$ a délka oblouku l_{obl} se volí jako dvojnásobek vzdálenosti přípojníc

$$l_{obl} = 2 \cdot a \quad (\text{cm}, \text{cm}). \quad (2.45)$$

2.2.7 Metoda výpočtu

Velikost zkratového proudu v jakémkoli místě trojfázových sítí závisí především na konfiguraci sítě, generátorů či elektrárenských bloků nebo chodu motorů a na stavu sítě před poruchou. Podle [1] existují dvě základní metody výpočtu počátečních rázových zkratových proudů. Jedná se o metodu superpozice a metodu používající náhradní napěťový zdroj v místě zkratu.

2.2.7.1 Metoda ekvivalentního napěťového zdroje

Jelikož norma ČSN EN 60909 užívá metodou zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu (2.46), bude při výpočtu zkratových poměrů použita tato metoda.

$$E = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3}} \quad (\text{kV}, -, \text{kV}), \quad (2.46)$$

kde c je napěťový součinitel a U_n je sdružená hodnota jmenovitého napětí sítě.

Tento ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny napájecí body sítě, synchronní stroje a asynchronní motory jsou zkratované za jejich vnitřními (rázovými) reaktancemi. Všechny paralelní kapacity a admitance (zátěže) kromě kapacit a admitancí motorů se v sousledné a zpětné složce zanedbávají. Kapacity v netočivém složkovém systému se musí brát v úvahu (zanedbávají se v nn soustavách a ve vn účinně uzemněných systémech). Pro potřeby této výpočtové metody byl zaveden napěťový součinitel, který udává napěťový poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $\sqrt{3}$.

Výpočet se může vykonávat dvěma způsoby:

- ve skutečných hodnotách – celý výpočet probíhá ve skutečných fyzikálních hodnotách – veličiny se označují velkými písmeny,
- v poměrných hodnotách – veličiny se počítají v poměrných hodnotách. Přepočet na tyto hodnoty se provádí pomocí vztahných hodnot (U_v , S_v). Veličiny se označují malými písmeny.

Pokud je místo zkratu elektricky vzdáleno od zdrojů zkratového proudu, nebo pokud je podíl asynchronních motorů na zkratovém proudu zanedbatelný (do 5 %), potom velikosti střídavé složky zkratového proudu (jeho efektivní hodnota) se s časem prakticky nemění a hovoříme o **zkratu vzdáleném**. Pokud nejsou synchronní stroje dostatečně elektricky vzdáleny od místa zkratu, nebo pokud není příspěvek asynchronních motorů zanedbatelný, potom se i střídavá složka zkratového proudu s časem mění a hovoříme o **zkratu blízkém**. Kritériem, podle kterého je synchronní stroj považován za elektricky blízký místu zkratu, je velikost příspěvku do zkratu (trojfázového). Pokud je počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' větší, než dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo pokud příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů hovoříme o blízkém zkratu [5].

Kompletní výpočet zkratových proudů určuje proudy jako funkce času v místě zkratu od počátku zkratu až do jeho konce. Zkratové proudy odpovídají okamžité hodnotě napětí na počátku zkratu. Ve většině praktických případů takovýto výpočet není nutný. Podle použití výsledků nás zajímá efektivní hodnota souměrné střídavé složky a nárazový zkratový proud i_p zkratového proudu po vzniku zkratu. Nejvyšší hodnota i_p závisí na časové konstantě zanikající aperiodické složky a kmitočtu f , tedy na poměru R_k/X_k nebo X_k/R_k zkratové impedance Z_k , a s určitou přibližností lze předpokládat, že je jí dosahováno tehdy, jestliže zkrat začíná v okamžiku, kdy napětí prochází nulou. Proud i_p závisí také na klesající souměrné střídavé složce zkratového proudu. Výpočtem se zjišťují dva různé zkratové proudy, které se liší svou velikostí:

- maximální zkratový proud, který určuje zkratovou odolnost nebo jmenovité hodnoty elektrického zařízení;
- minimální zkratový proud, který může být základem například pro volbu pojistek, nastavení ochran a pro kontrolu rozběhu motorů.

2.2.8 Zjednodušující předpoklady

Výpočet minimálních a maximálních zkratových proudů podle normy ČSN EN 60909-0 [3] vychází z následujících předpokladů:

- po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí,
- po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti,
- uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze,
- odpory oblouku se neuvažují,
- všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány, vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.

Kromě těchto zjednodušení je třeba zohlednit i tyto předpoklady [1]:

- zkrat nastal jen v jednom bodě soustavy (při vícefázových zkratech se předpokládá, že vzniklo ke zkratu ve stejném okamžiku),
- předpokládá se kovový zkrat,
- předpokládá se, že v okamžiku vzniku zkratu jsou všechna elektromotorická indukovaná napětí alternátorů v síti ve fázi, a po přepočtu na poměrné hodnoty stejně velká,
- pro stanovení nejnepríznivějších zkratových poměrů se předpokládá, že byly alternátory zatíženy jmenovitým výkonem při jmenovitém napětí,
- magnetizační proudy transformátorů zanedbáváme,
- za zdroje, které přispívají do místa zkratu, jsou počítány též synchronní motory, synchronní kompenzátory a asynchronní motory,
- vliv zatížení se zpravidla neuvažuje,
- sériové kondenzátory se uvažují jen v tom případě, jestliže nejsou při zkratu vyřazeny ochranou,
- paralelní kondenzátory se zanedbávají v případě, že jejich reaktance je větší než dvacetinásobek induktivní reaktance zkratového obvodu. V opačném případě se respektuje jako reaktance se záporným znaménkem. Vybíjecí proud se neuvažuje.

Výpočty zajišťují dostatečnou přesnost výsledků, i když tyto předpoklady pro uvažované elektrické soustavy neodpovídají zcela přesně dané skutečnosti.

2.2.9 Výpočet maximálního zkratového proudu

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky [3]:

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel $c_{\max}$ podle tabulky [3],
- vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu,
- pokud je použita ekvivalentní impedance (reprezentující vnější síť), musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů,
- musíme počítat i s příspěvky motorů ke zkratovému proudu,
- uvažují se rezistance vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20 °C.

2.2.10 Výpočet minimálního zkratového proudu

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky [3]:

- pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel $c_{\min}$ podle tabulky [3],
- vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu,
- motory musí být zanedbány,
- rezistance vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při nejvyšší teplotě.

2.2.11 Postup výpočtu

Sestaví se základní schéma zapojení a uvedou se jednotlivé parametry uvažovaných prvků a jednotlivé jmenovité hodnoty sítí. Označí se místa, ve kterých se budou počítat zkraty. Zvolí se vztažné napětí a vztažný výkon (hodnotu vztažného výkonu volíme jako sumu jmenovitých výkonů generátorů a vztažné napětí volíme podle napěťové hladiny, na které došlo ke zkratu)

Vypočtou se zkratové impedance jednotlivých zařízení a přepočítají se do místa zkratu (na příslušnou napěťovou hladinu, vztažné napětí).

Z těchto impedancí se sestaví náhradní schéma, pro výpočet trojfázového zkratu se schéma sestaví jen ze sousledných složek, v případě nesymetrických zkratů ještě ze zpětných a netočivých složek.

Náhradní schéma se zjednoduší na výslednou impedanci do místa zkratu.

Vypočítá se počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k'' tekoucí místem zkratu.

Jestliže je to potřebné, určí se příspěvky od jednotlivých zdrojů zkratu (synchronní stroje a asynchronní motory).

Stanoví se potřebné parametry určující zkratové poměry (I_p , I_b , I_{th} , *atd.*).

2.2.12 Zkratové impedance elektrických zařízení

Jak je uvedeno v kapitole 2.2.11 potřebujeme pro výpočet zkratového proudu impedanci zkratového obvodu. Tato výsledná hodnota se zjistí postupným zjednodušením náhradního schématu, sestaveného pouze z impedancí elektrických zařízení. Tyto impedance nejsou běžně známy, proto nutně je nejprve vypočítat. Vztahy pro výpočet náhradních zkratových impedancí jednotlivých elektrických zařízení jsou uvedeny v ČSN 60909-0 [3].

Jestliže prvek ES neobsahuje žádné magnetické vazby mezi fázemi, potom jeho impedance nezávisí na sledu fází připojeného napětí. Pro symetrické složky impedance platí $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2 = \bar{Z}_0$ (například tlumivka pro omezování zkratových proudů). Jestliže prvek obsahuje magnetické vazby obvodů, přičemž se obvody vůči sobě nepohybují (transformátory, vedení), bude se sousledná složka rovnat zpětné $\bar{Z}_1 = \bar{Z}_2$. Pro uplatnění netočivé složky impedance je rozhodující způsob uzemnění. Pro síťové napáječe, transformátory, venkovní vedení, kabelové vedení, reaktory a podobně je sousledná a zpětná zkratová impedance shodná. Impedance generátorů, síťových transformátorů a elektrárenských bloků se musí vynásobit impedančními korekčními činiteli (K_G , K_T , K_S a K_{SO}) [3].

2.2.12.1 Vztahy pro přepočet zkratové impedance

Níže uvedené vztahy [4] slouží pro přepočet skutečných hodnot zkratových impedancí elektrických zařízení na poměrné nebo procentní hodnoty. Přepočet se provádí na hladinu vztažného napětí U_v a pomocí vztažného výkonu S_v . Jako hladina vztažného napětí se volí sdružené napětí v místě zkratu, jako vztažný výkon můžeme volit součet výkonů všech generátorů přispívajících do zkratového obvodu.

Uvedené vztahy platí analogicky i pro rezistance a reaktance.

Přepočet skutečných hodnot na poměrné

$$\bar{z} = \bar{Z} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \quad (-; \Omega; \text{MVA}; \text{kV}), \quad (2.47)$$

kde $\bar{z}$ je poměrná hodnota impedance a $\bar{Z}$ je skutečná hodnota impedance.

Přepočtené skutečné hodnoty na procentní

$$\bar{z}_{\%} = \bar{Z} \cdot \frac{S_v}{U_v^2} \cdot 100 \quad (\%; \Omega; \text{MVA}; \text{kV}), \quad (2.48)$$

kde $\bar{z}_{\%}$ je procentní hodnota impedance.

Přepočet skutečné hodnoty $\bar{Z}$ vztažené na napětí U_{v1} na vztažné napětí U_{v2}

$$\bar{Z}_2 = \bar{Z}_1 \cdot \left(\frac{U_{v2}}{U_{v1}} \right)^2 \quad (\Omega; \Omega; \text{kV}; \text{kV}). \quad (2.49)$$

Výpočet vztažného proudu I_v

Počítá se ze zvoleného vztažného napětí a vztažného výkonu.

$$I_v = \frac{S_v}{U_v} \quad (\text{kA}; \text{MVA}; \text{kV}). \quad (2.50)$$

Výpočet skutečného proudu z poměrného proudu

$$I = i \cdot I_v \quad (\text{kA}; -; \text{kA}), \quad (2.51)$$

kde I je skutečná hodnota proudu a i je proud v poměrné hodnotě.

2.3. Chránění

Pro chránění vedení v distribučních sítích vvn se využívají zejména distanční ochrany, které bývají zpravidla vybaveny lokátorem poruchy. Po vzniku poruchy dojde k odpojení postiženého úseku vedení ve velmi krátkém čase (v prvním stupni ochrany cca 0,1s, ve druhém stupni cca 0,3-0,5s). Lokátor v ochraně současně informuje dispečera o vzdálenosti poruchy od příslušné rozvodny. Výpočet vzdálenosti vychází ze zjištěné hodnoty impedance a jeho přesnost tedy velmi závisí na znalosti aktuálních parametrů vedení. Zde často nelze zanedbat vliv paralelních vedení, vliv prostřídání fází paralelního vedení, vliv počasí, apod.

V případě potřeby se systém chránění doplňuje o rozdílovou (srovnávací) ochranu, případně záložní distanční ochranu. Systém chránění vedení 110kV je standardně vybaven automatikou opětného zapínání OZ (nejčastěji jednopólového).

Rozdílová ochrana zajistí selektivitu při střídání krátkých a dlouhých linek, umožní zkrácení vypínacích časů při zkratech mimo 85% délky vedení a reaguje i na odporové (stromové) poruchy díky citlivějšímu rozběhu.

V odůvodněných případech (uzlové rozvodny 110 kV, s velkým počtem linek 110 kV a připojenými velkými elektrárnami) se používá automatické synchronizační zařízení, které umožní bezproblémové sepnutí vedení.

Více např. v [6],[7].

2.4. Literatura

- [1] Mešter, M. Výpočet skratových proudů v trojfázových střídavých systémech. Banská Bystrica: PRO, s. r. o., 2005, s. 94, ISBN 80-89057-10-1
- [2] Reiss, L., Malý, K., Pavlíček, Z., Bizík, J. Teoretická elektroenergetika II. Praha: SNTL a Bratislava: ALFA, 1978, s. 436
- [3] ČSN EN 60909-0:2002. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Část 0: Výpočet proudů., idt IEC 60909-0:2001+ idt IEC 60909-0:2001/Cor. 1:2002-02. Český normalizační institut
- [4] Hodinka, M. Přejídné jevy v elektrizační soustavě. Brno: VUT v Brně, 1990, s. 246, ISBN 80-214-0083-8
- [5] Volák, J.: Zkratové proudy podle standardů ČSN a IEC. Trutnov:TOP PRINT, 1996, s. 96
- [6] Janíček, F., Chladný, V., Beláň, A., Eleschová, Ž. Digitální ochrany v elektrizační soustavě. Slovenská technická univerzita v Bratislavě, 2004, s. 360 ISBN 80-227-2135-2
- [7] Dohnálek, P. Ochrany pro průmysl a energetiku. Praha: SNTL, 1991, s. 373

3. Distribuční sítě vysokého napětí

Vysokonapěťové soustavy v ČR je možné s ohledem na charakter provozu rozdělit na soustavy distribuční s napěťovými hladinami 10, 22 a 35 kV a dále na soustavy elektrárenských, průmyslových a důlních provozů s napěťovou hladinou převážně 6 a 10 kV. Základní parametry a možnosti provozu distribučních soustav vn jsou určeny zejména systémem uzemnění transformátoru v_{vn}/v_n , tedy způsobem spojení nulového bodu vn vinutí napájecího transformátoru se zemnicí soustavou. Volba systému uzemnění nám definuje možnosti provozu soustavy z hlediska bezpečnosti, chránění, dimenzování či nepřetržitosti dodávky elektrické energie. V případě bezporuchového stavu symetrické sítě se způsob uzemnění nijak prakticky neprojeví na jejím provozu. Zásadní rozdíl je v případě poruchy, kdy dojde k vodivému spojení jedné fáze se zemí. Pokud tato porucha vznikne uvnitř sítě účinně uzemněné či uzemněné přes uzlový odpor, mluvíme o jednofázovém zkratu a poruchový proud dosahuje úrovně, které vylučují další provoz postižené soustavy. V tomto případě musí dojít v co nejkratším čase k odpojení postiženého vedení a tedy i k přerušení dodávky elektrické energie. U sítí neúčinně uzemněných či izolovaných se jedná o zemní spojení, jehož poruchový proud nedosahuje tak vysoké úrovně a není tedy bezpodmínečně nutné okamžité vypnutí postiženého vývodu. Právě úroveň poruchového proudu je značně ovlivněna použitým systémem uzemnění a je tedy směrodatná pro určení rizika úrazu elektrickým proudem, dimenzování či pro zhodnocení mechanických následků způsobených poruchou. Díky velké rozloze a členitosti jsou distribuční soustavy vn, které hustě protínají převážnou část našeho území, vystaveny mnoha nepříznivým vlivům. Tyto vlivy, jako jsou například atmosférické podmínky, způsobují v případě venkovního vedení velké množství přechodných zemních spojení, která sama v krátkém čase odezní bez potřeby přerušení dodávky elektrické energie. Z tohoto důvodu jsou přednostně naše distribuční soustavy vysokého napětí provozovány jako neúčinně uzemněné. V současné době jsou výše zmíněné vysokonapěťové soustavy provozovány s ohledem na způsob uzemnění jako soustavy:

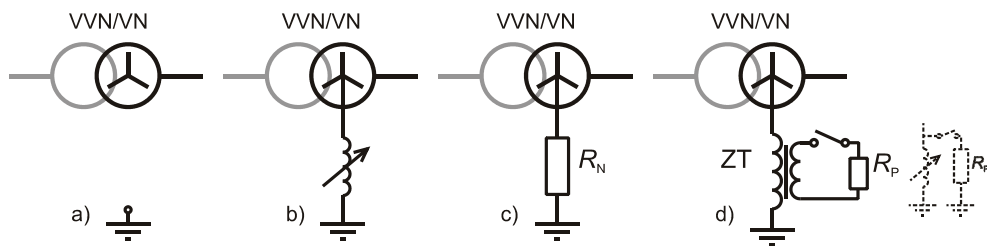
- izolované (Obr. 3.1 a),
- nepřímo uzemněné přes uzlový odpor (Obr. 3.1 c) a
- nepřímo uzemněné přes zhášecí tlumivku (kompenzované soustavy) (Obr. 3.1 b).

Přičemž pro poslední zmíněný typ soustavy se v ČR využívá několika modifikací, a to:

- klasická laděná zhášecí tlumivka s případným připínáním pomocného odporníku pro navýšení činné složky poruchového proudu na sekundární straně, příležitostně na straně primární – „maďarský“ odporník (Obr. 3.1 d),
- zhášecí tlumivka vybavená automatikou pro přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně,
- systém Swedish Neutral,

a také

- 3-fázovou kompenzaci zemních proudů (více viz [1]).



Obr. 3.1: Příklad systémů uzemnění používaných v distribučních soustavách vn

Každá varianta uzemnění uzlu transformátoru má svá specifika a je vhodná pro určitý provoz DS či LDS (lokálních distribučních soustav) jako je elektrárenský, popř. průmyslový provoz. Převážná část distribučních soustav je v rámci ČR provozována jako kompenzovaná s nejčastější variantou připínání odporníku na sekundární straně zhášecí tlumivky. U elektrárenských a průmyslových provozů je možno nalézt různé varianty způsobu uzemnění, tak například blokové vlastní spotřeby jsou provozovány jako izolované, společné vlastní spotřeby jsou zpravidla nepřímo uzemněné přes indukčnost a v rozvodnách odsíření elektrárenských provozů je pak běžný způsob uzemnění soustavy přes odporník. Důlní sítě jsou vesměs provozovány jako izolované, přičemž s ohledem na novou legislativu a podmínky provozu se postupně u důlních sítí přechází na soustavy kompenzované.

Rozhodnutí o vhodnosti použití způsobu uzemnění soustavy pro daný vysokonapěťový provoz, je možno provést na základě zohlednění důležitých kritérií (faktorů).

Mezi nejdůležitější kritéria patří:

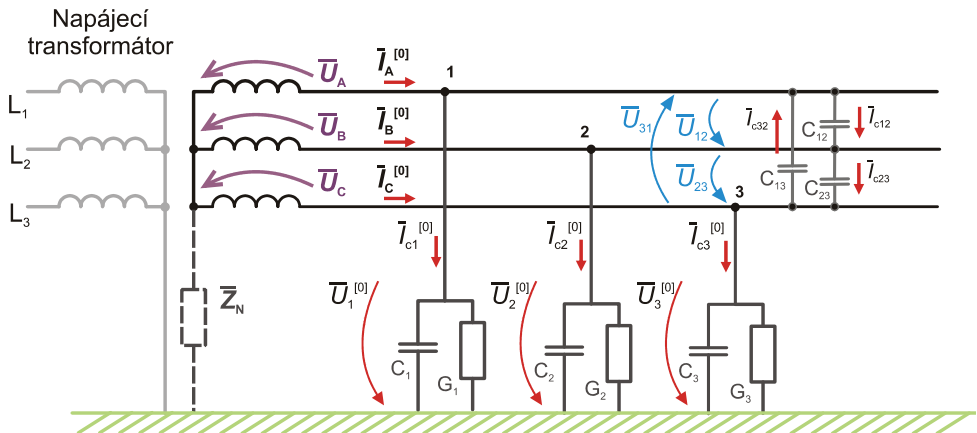
- celkový kapacitní proud soustavy,
- úroveň poruchového proudu (kapacitní proud zemního spojení či zbytkový proud),
- ustálená poruchová napětí (stacionární rezonanční přepětí),
- přepětí při vzniku jednopólové poruchy,
- přepětí při přerušení 1pólové poruchy (vliv elektrického oblouku, rychlost zotavení vn systému),
- ferorezonanční přepětí, přenesená napětí,
- způsob likvidace poruchy,
- možnost dosažení maximální citlivosti ochran,
- ovlivnění pomocných obvodů,

- porovnávací investiční náklady,
- provozní náklady,

a v neposlední řadě

- bezpečnost s ohledem na hodnoty dotykových a krokových napětí, apod.

Pro určení základních napěťových a proudových poměrů ve vn soustavách, popř. pro srovnání poměrů při různých způsobech provozu soustav, je možno využít metodu souměrných složek. Příklad sítě s obecnou impedancí $\bar{Z}_N$ v uzlu transformátoru je uveden na Obr. 3.2.



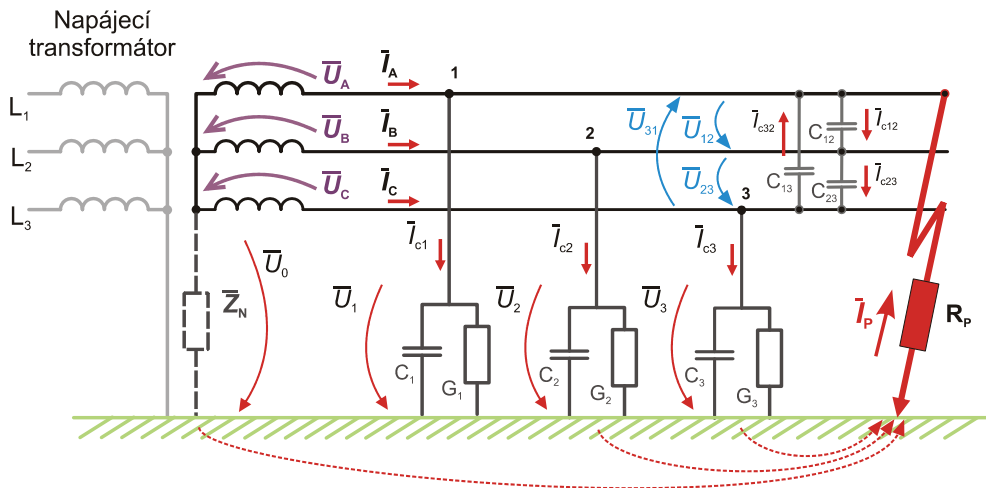
Obr. 3.2: Schematické znázornění vn soustavy s obecnou impedancí

Fázory napětí $\bar{U}_A, \bar{U}_B$ a $\bar{U}_C$ představují zdroj elektromotorického napětí, $\bar{U}_{12}, \bar{U}_{23}, \bar{U}_{31}$ napětí na mezifázových kapacitách a tomu odpovídající fázory proudu. Uzly s označením 1, 2 a 3 představují místo připojení nesymetrického příčného članku – tedy příčnou nesymetrii s fázory napětí proti zemi v místě nesymetrie ($\bar{U}_1, \bar{U}_2$ a $\bar{U}_3$), resp. napětí na obvodu definující paralelní spojení kapacity soustavy a vodivosti (odpory svodů, atd.). Index [0] značí stav veličiny před vznikem poruchového stavu.

Pro řešení poměrů v soustavě pomocí metody symetrických složek je možné přijmout následující zjednodušující předpoklady: je uvažován symetrický zdroj s napětím $\bar{U}$, mezifázové kapacity jsou zanedbány, kapacity jednotlivých fází soustavy proti zemi jsou si rovny za předpokladu symetrické soustavy, tedy platí $C_1 = C_2 = C_3 = C$.

Při zemní poruše znázorněné na Obr. 3.3 se poruší symetrie příčných impedancí vedení (impedance vedení proti zemi). Místem poruchy s odporem R_p

začne protékat poruchový proud $\bar{I}_p$, ke změně dojde u velikostí amplitud a fázových posuvů kapacitních proudů v jednotlivých fázích a napětí uzlu proti zemi.



Obr. 3.3: Schematické znázornění vn soustavy s obecnou impedancí okamžiku vzniku 1pólové poruchy

Na základě Obr. 3.3 musí pro fázová napětí v místě napájecí rozvodny platit:

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 - \bar{U}_A - \bar{U}_0 &= 0, \\ \bar{U}_2 - \bar{U}_B - \bar{U}_0 &= 0, \\ \bar{U}_3 - \bar{U}_C - \bar{U}_0 &= 0.\end{aligned}\tag{3.1}$$

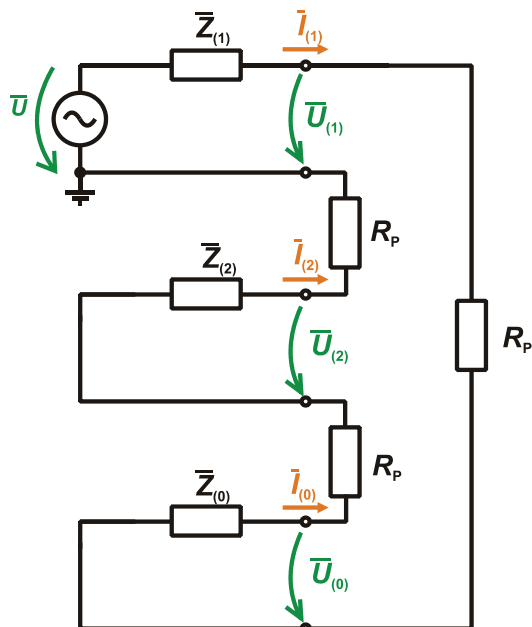
Při vzniku kovového zemního spojení ve fázi A (L1) pak platí pro fázová napětí v napájecí rozvodně

$$\begin{aligned}\bar{U}_1 &= 0, \\ \bar{U}_0 &= -\bar{U}_A, \\ \bar{U}_2 &= \bar{U}_B + \bar{U}_0 = (-1 + \bar{a}^2)\bar{U}_A = -\sqrt{3}e^{j30^\circ}\bar{U}_A, \\ \bar{U}_3 &= \bar{U}_C + \bar{U}_0 = (-1 + \bar{a})\bar{U}_A = -\sqrt{3}e^{-j30^\circ}\bar{U}_A,\end{aligned}\tag{3.2}$$

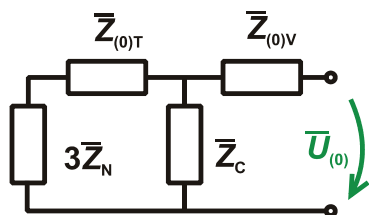
kde $\bar{U}_0$ je napětí uzlu soustavy vůči zemní soustavě.

V případě, že je potřebné určit napěťové poměry a celkový poruchový proud, je možné vycházet z náhradního složkového schématu na Obr. 3.4, kde sousledná složka impedance $\bar{Z}_{(1)}$ zahrnuje sousledné složky impedance vedení $\bar{Z}_{(1)V}$ a transformátoru $\bar{Z}_{(1)T}$, a stejně tak i zpětná složka impedance $\bar{Z}_{(2)}$ zahrnuje

zpětné složky impedance vedení $\bar{Z}_{(2)V}$ a transformátoru $\bar{Z}_{(2)T}$. Netočivou složku impedance $\bar{Z}_{(0)}$ je možno rozvést dle schématu na Obr. 3.5. Pro podrobné vyjádření by bylo nutné také respektovat impedance přispívající nadřazené soustavy a impedance generátoru. Pro potřeby vyjádření poměrů ve vývodu soustavy s poruchou je však možné tyto impedance zanedbat.



Obr. 3.4: Složkové schéma pro příčnou nesymetrii (1pólová porucha)



Obr. 3.5: Netočivá složka impedance

Na Obr. 3.5 je zobrazeno vyjádření netočivé složky impedance soustavy $\bar{Z}_{(0)}$, kde $3\bar{Z}_N$ je v souladu s teorií nesymetrického příčného článku trojnásobek obecné impedance v uzlu transformátoru, $\bar{Z}_{(0)T}$, $\bar{Z}_{(0)V}$ jsou netočivé složky impedance transformátoru a vedení v daném pořadí. Impedance $\bar{Z}_C$ představuje celkovou kapacitu soustavy při zanedbání svodů soustavy. Kapacitní reaktance soustavy jsou mnohem větší než rezistance a indukční reaktance soustavy. Dle schématu na Obr. 3.4 platí pro proudy složkových schémat

$$\bar{I}_{(1)} = \bar{I}_{(2)} = \bar{I}_{(0)} = \frac{1}{3} \bar{I}_A \quad (3.3)$$

a za předpokladu $\bar{Z}_{(1)} = \bar{Z}_{(2)}$ je možno pro proud složkového schématu psát

$$\bar{I}_{(1)} = \frac{\bar{U}}{2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_p}. \quad (3.4)$$

Potom pro napětí souměrných složek platí

$$\bar{U}_{(1)} = (3R_p + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)})\bar{I}_{(1)} = \frac{(3R_p + \bar{Z}_{(2)} + \bar{Z}_{(0)})}{(3R_p + 2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)})}\bar{U}, \quad (3.5)$$

$$\bar{U}_{(2)} = -\bar{Z}_{(2)}\bar{I}_{(1)} = -\bar{Z}_{(1)}\bar{I}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(1)}}{(3R_p + 2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)})}\bar{U}, \quad (3.6)$$

$$\bar{U}_{(0)} = -\bar{Z}_{(0)}\bar{I}_{(1)} = \frac{-\bar{Z}_{(0)}}{(3R_p + 2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)})}\bar{U}. \quad (3.7)$$

Pro napětí v místě nesymetrie proti zemi platí

$$\bar{U}'_1 = \bar{U}_{(1)} + \bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \frac{3R_p}{3R_p + 2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)}}\bar{U}, \quad (3.8)$$

$$\bar{U}'_2 = \bar{a}^2\bar{U}_{(1)} + \bar{a}\bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left(\bar{a}^2 - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{3R_p + 2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)}} \right) \bar{U}, \quad (3.9)$$

$$\bar{U}'_3 = \bar{a}\bar{U}_{(1)} + \bar{a}^2\bar{U}_{(2)} + \bar{U}_{(0)} = \left(\bar{a} - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)}}{3R_p + 2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)}} \right) \bar{U}. \quad (3.10)$$

V případě kovové poruchy v blízkosti napájecí rozvodny bude platit $R_p = 0$ a $\bar{Z}_{(1)} = 0$. Po dosazení do rovnic (3.8), (3.9) a (3.10) můžeme pro fázová napětí v místě nesymetrie psát

$$\begin{aligned} \bar{U}'_1 &= \frac{0}{\bar{Z}_{(0)}}\bar{U} = 0V, \\ \bar{U}'_2 &= \left(\bar{a}^2 - \frac{\bar{Z}_{(0)}}{\bar{Z}_{(0)}} \right) \bar{U} = (\bar{a}^2 - 1)\bar{U} = -\sqrt{3}e^{j30^\circ}\bar{U}, \\ \bar{U}'_3 &= \left(\bar{a} - \frac{\bar{Z}_{(0)}}{\bar{Z}_{(0)}} \right) \bar{U} = (\bar{a} - 1)\bar{U} = -\sqrt{3}e^{-j30^\circ}\bar{U}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

což je ve shodě s rovnicemi (3.2).

Fázový proud postižené fáze je při respektování určitých zjednodušení roven proudu poruchovému, avšak při respektování Obr. 3.3 s opačným směrem toku. Po dosazení (3.4) do (3.3) platí

$$\bar{I}_p = -\bar{I}_A = -3\bar{I}_{(1)} = \frac{-3\bar{U}}{2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_p}. \quad (3.12)$$

Napětí uzlu soustavy proti zemi v místě napájecí rozvodny (zdroje) při uvažování kovové poruchy vychází ze vztahu (3.7) při uvažování $R_p = 0$ a $\bar{Z}_{(1)} = 0$

$$\bar{U}_0 = -\frac{\bar{Z}_{(0)}}{\bar{Z}_{(0)}}\bar{U} = -\bar{U}. \quad (3.13)$$

Rovnice (3.8) až (3.13) určují napěťové a proudové poměry v soustavě pro obecnou impedanci uzlu soustavy, na základě těchto rovnic je tedy možné popsat parametry soustavy pro jakýkoliv systém provozu uzlu transformátoru. Jak z uvedených vztahů vyplývá, jediné, čím se jednotlivé způsoby provozu liší, je velikost a charakter impedance uzlu sítě, která ovlivňuje netočivou složku impedance $\bar{Z}_{(0)}$.

3.1. Sítě s izolovaným uzlem

V případě provozu sítí izolovaných není nulový bod transformátoru spojen se zemnicí soustavou, je od ní izolován (Obr. 3.1 a). Tento systém uzemnění je nejčastěji provozován zejména u malých (průmyslových) distribučních sítí, kde hodnota celkového kapacitního proudu nepřesahuje hodnotu 20 A. Tento kapacitní zemní proud je dán fázorovým součtem kapacitních proudů převážně nepostižených fází celé sítě, uzavírajících se přes místo zemního spojení, a je úměrný velikosti takto provozované sítě. Pokud však díky velké rozloze sítě dojde k překročení hodnoty 20 A kapacitního proudu, je nezbytné provést jeho kompenzaci [1].

Pro provoz soustavy izolované uvažujme na Obr. 3.3 hodnotu obecné impedance $\bar{Z}_N \rightarrow \infty$. Pak pro velikost netočivé složky impedance $\bar{Z}_{(0)}$ lze psát $\bar{Z}_{(0)i} = \bar{Z}_C + \bar{Z}_{(0)v}$. Pokud je uvažován rozsah sítě s kapacitním proudem řádově jednotky ampérů, lze zanedbat podélnou impedanci vedení, čímž se celková netočivá impedance soustavy zjednoduší na tvar

$$\bar{Z}_{(0)i} \doteq \bar{Z}_C = \frac{1}{\frac{1}{R_C} + j\omega C} \doteq -\frac{j}{\omega C}. \quad (3.14)$$

To znamená, že napětové poměry a velikost proudu nezávisí na tom, ve kterém místě sítě k poruše dojde. Dosazením vztahu (3.14) do rovnice (3.12) pro nulový odpor poruchy, tedy pro případ vzniku kovového zemního spojení a při zanedbání sousledné a zpětné impedance, je možné určit velikost proudu místem zemního spojení, který představuje kapacitní proud zemního spojení

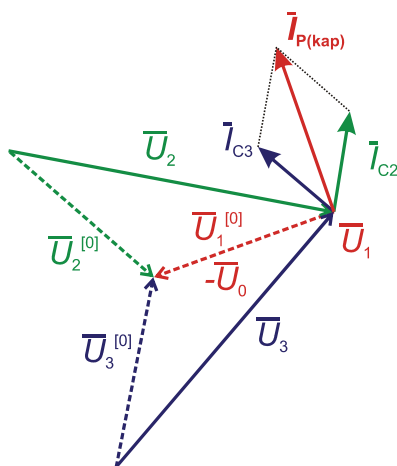
$$\bar{I}_{P(\text{kap})} = j3\omega C\bar{U}, \quad (3.15)$$

případně po vyjádření jmenovitého napětí soustavy

$$\bar{I}_{P(\text{kap})} = j\sqrt{3}U_n\omega C. \quad (3.16)$$

Protože poruchový proud má kapacitní charakter, je jeho zhášení obtížné a provázené znovu-zápaly. Takto vzniklé přechodné děje vyvolávají v síti přepětí. Z uvedených důvodů je používání izolovaného uzlu omezeno na malé sítě. Rovněž hledisko bezpečnosti spojené s výskytem velkých krokových napětí, která vznikají při průchodu proudů zemí, je nutné brát v úvahu. V normách pro provoz vn sítí [2] se připouští mezní rozsah kapacitního proudu 20 A, přičemž od hodnoty 10 A se již doporučuje kompenzace zemních proudů.

Na Obr. 3.6 je uveden fázorový diagram sestavený na základě simulace jednopólové zemní poruchy v izolované soustavě 6 kV pro případ kovového zemního spojení, tedy pro případ nulového odporu poruchy $R_P = 0$. Jelikož svodové (konduktanční) proudy dosahují u běžně provozovaných sítí hodnoty do 10 % proudu kapacitního, nemají zásadní vliv na provoz izolované soustavy. Dominantní složkou proudu uzavírajícího se přes příčné admitance vedení jsou kapacitní proudy, jak vyplývá také z Obr. 3.6.

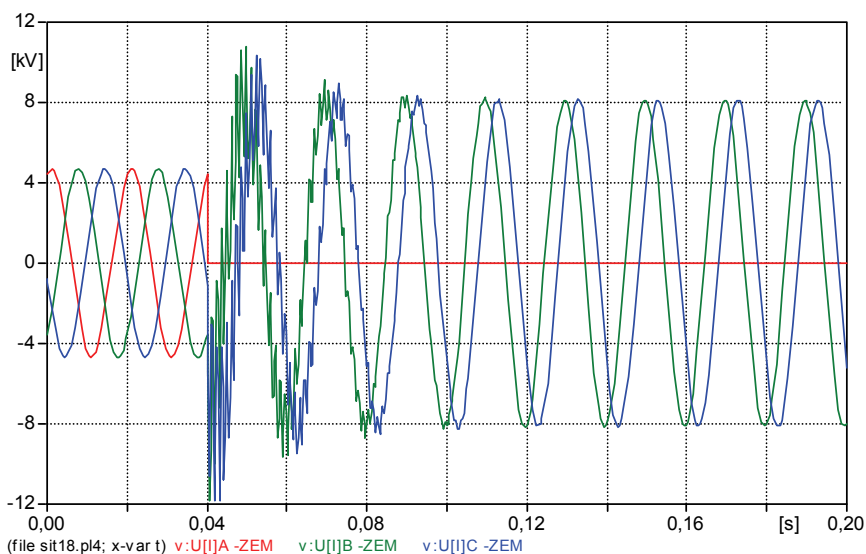


Obr. 3.6: Fázorový diagram napětí a proudů v případě vzniku kovového zemního spojení v izolované soustavě

Za předpokladu ideálního kovového zemního spojení s $R_P = 0 \Omega$ lze tedy konstatovat:

- napětí zdravých fází proti zemi vzrostou na sdruženou hodnotu napětí sítě (viz rovnice (3.11) a Obr. 3.6),
- napětí postižené fáze klesne na nulu (rovnice (3.11) a Obr. 3.6),
- napětí uzlu vzroste na fázovou hodnotu napětí sítě (3.13),
- poruchový proud je kapacitního charakteru a jeho velikost odpovídá rozsahu sítě – **úroveň poruchového proudu nezávisí na místě poruchy** (3.15).

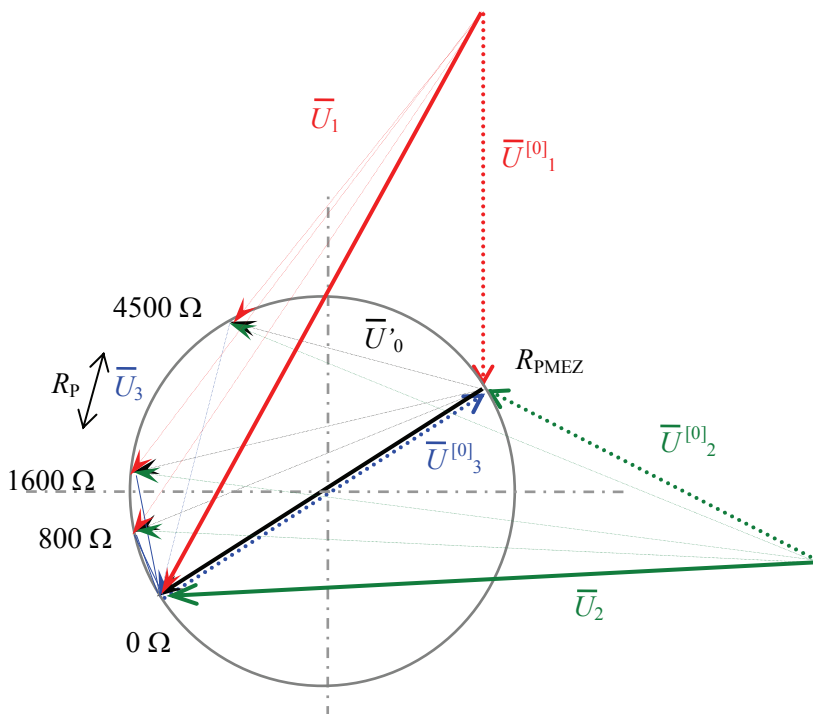
Příklad průběhu okamžitých hodnot fázových napětí v místě poruchy při vzniku kovového zemního spojení je uveden na Obr. 3.7.



Obr. 3.7: Průběh okamžitých hodnot napětí v okamžiku vzniku kovového zemního spojení v izolované síti 6 kV

Výskyt kovového zemního spojení je z hlediska četnosti ojedinělým případem. Převážná většina jednopólových poruch má charakter odporového zemního spojení s časovou změnou odporu poruchy; jedná se o oblouková zemní spojení. Velikost hodnoty odporu poruchy má výrazný vliv na charakter přechodných dějů analyzovaných veličin. Jde především o přepětí, strmost změny napětí a rázovou složku proudu (vybíjecí proud) místem zemního spojení. Výrazně však ovlivňuje také ustálenou hodnotu napětí a proud místem zemního spojení.

Vliv hodnoty odporu poruchy na ustálené hodnoty napětí v místě nesymetrie a proudu místem zemního spojení byl určen s využitím výsledků realizovaného experimentu zemního spojení v izolované soustavě 6kV blokové vlastní spotřeby elektrárny Chvaletice. V rámci experimentu byla provedena simulace kovového a odporového (800 1600, 4500 Ω) zemního spojení v elektrárně Chvaletice. Výsledný fázorový diagram sledovaných veličin je zobrazen na Obr. 3.8.



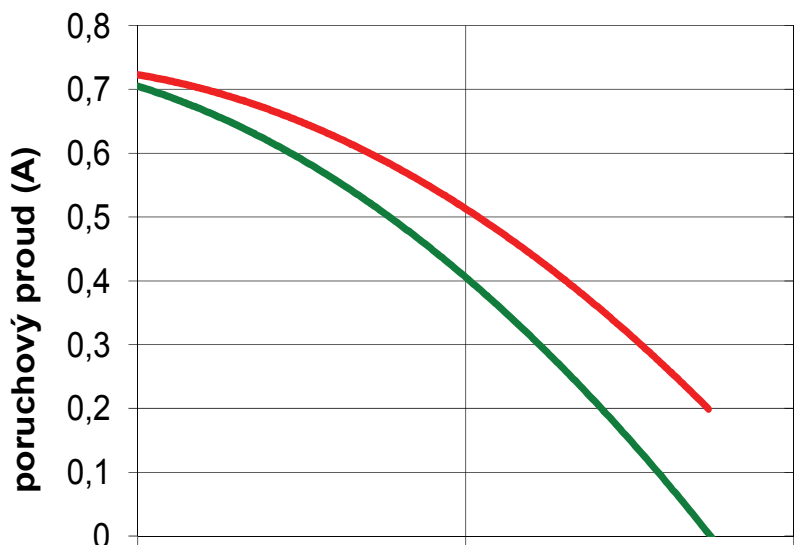
Obr. 3.8: Fázorový diagram napětí při změně odporu poruchy

Z Obr. 3.8 je zřejmé „vysunutí“ nulového bodu systému při změně odporu poruchy zemního spojení. V okamžiku kovového zemního spojení pro $R_p = 0 \Omega$ je fázor napětí v uzlu systému roven fázovému napětí. Trajektorie pohybu fázoru napětí v uzlu systému opisuje Thaletovu kružnici s průsečíky v nulovém bodě systému a koncovém bodě fázoru napětí fáze bez poruchy. Plnou čarou je znázorněn stav kovového zemního spojení. S využitím výpočtu trajektorie Thaletovy kružnice a extrapolací změny poruchového proudu při změně odporu poruchy zemního spojení je možno získat mezní hodnoty poruchového odporu R_{PMEZ} . V okamžiku vzniku zemního spojení s odporem poruchy R_{PMEZ} se systém jeví jako bez poruchy. Místem zemního spojení protéká jen minimální poruchový proud, napětí v nulovém bodě (v uzlu) systému se blíží k nulové hodnotě.

Při maximálním zjednodušení můžeme na základě výše uvedených vztahů psát při ZS ve fázi A pro jednotlivá napětí tyto závislosti na odporu poruchy

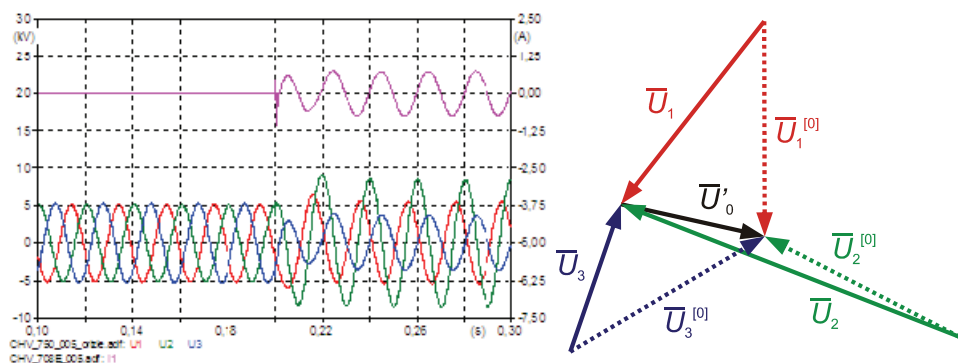
$$\begin{aligned}\bar{U}_A &= \bar{U}_a - \bar{U}_0, \\ \bar{U}_a &= f(R_p) = \frac{\bar{U}_A \cdot 3R_p}{\frac{1}{j\omega C} + 3R_p}, \\ \bar{U}_0 &= f(R_p) = -\frac{\bar{U}_A}{1 + 3R_p \cdot j\omega C}.\end{aligned}\tag{3.17}$$

Závislost efektivní ustálené hodnoty poruchového proudu a napětí v nulovém bodě systému v místě nesymetrie na změně odporu poruchy je znázorněna na Obr. 3.9. Extrapolací je určena hodnota mezního odporu poruchy 8700 Ω .



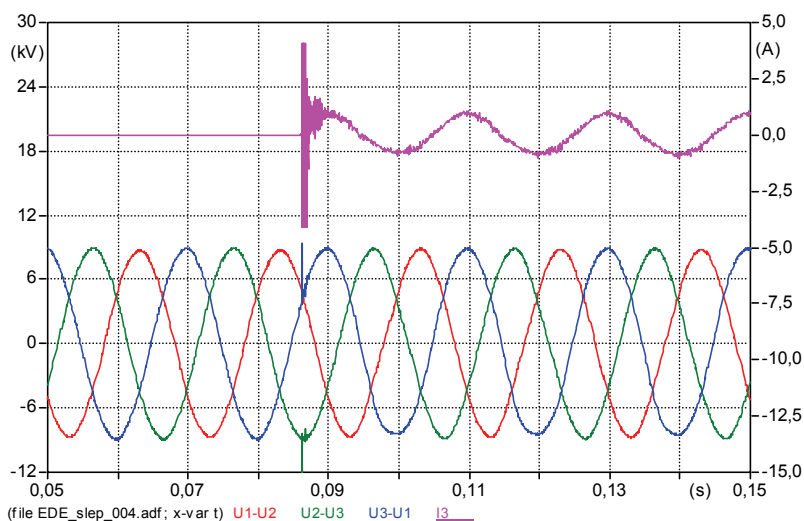
Obr. 3.9: Průběh závislosti poruchového proudu (zelená) a napětí uzlu soustavy (červená) na odporu poruchy

Příklad relace mezi okamžitými hodnotami napětí systému a proudu místem zemního spojení je pro odpor poruchy 4500 Ω uveden na Obr. 3.10, kde fázová napětí před vznikem poruchy jsou označena jako $\bar{U}_1^{[0]}, \bar{U}_2^{[0]}, \bar{U}_3^{[0]}$ a napětí během zemního spojení jsou označena $\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3$.



Obr. 3.10: Průběh okamžitých hodnot fázových napětí a proudu místem zemního spojení v okamžiku vzniku odporového zemního spojení 4500Ω a příslušný fázorový diagram

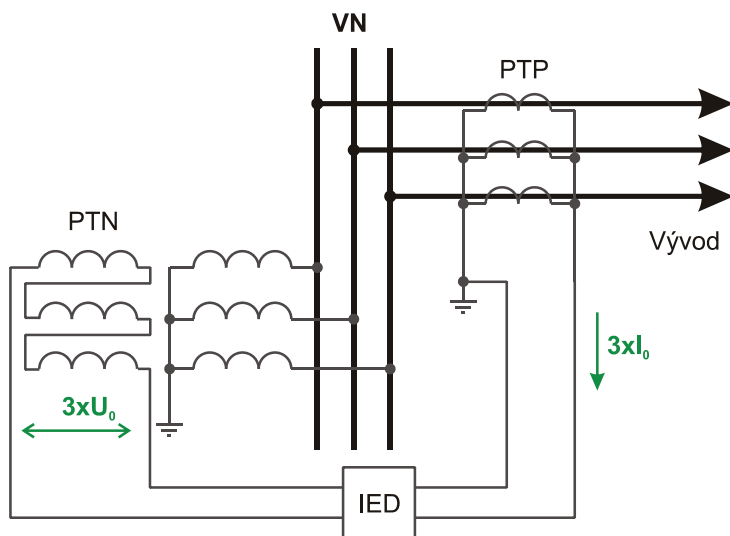
Velkou výhodou izolovaných DS je možnost jejich provozu i při vzniku jednopólové poruchy bez nutnosti přerušení dodávky elektrické energie. Důvodem je poměrně nízká hodnota poruchového proudu (do 20 A), která neumožňuje výskyt nebezpečného dotykového či krokového napětí v soustavě a také zachování symetrie sdružených napětí během ZS, jak je patrné z Obr. 3.11. Právě symetrie trojúhelníku sdružených napětí je klíčová pro korektní provoz soustav nn, které jsou napájeny přes distribuční transformátory s primární stranou zapojenou do trojúhelníku.



Obr. 3.11: Průběh okamžitých hodnot sdružených napětí U_{12} , U_{23} , U_{31} (kV) a poruchového proudu I_p (A) izolované soustavy v okamžiku vzniku zemního spojení

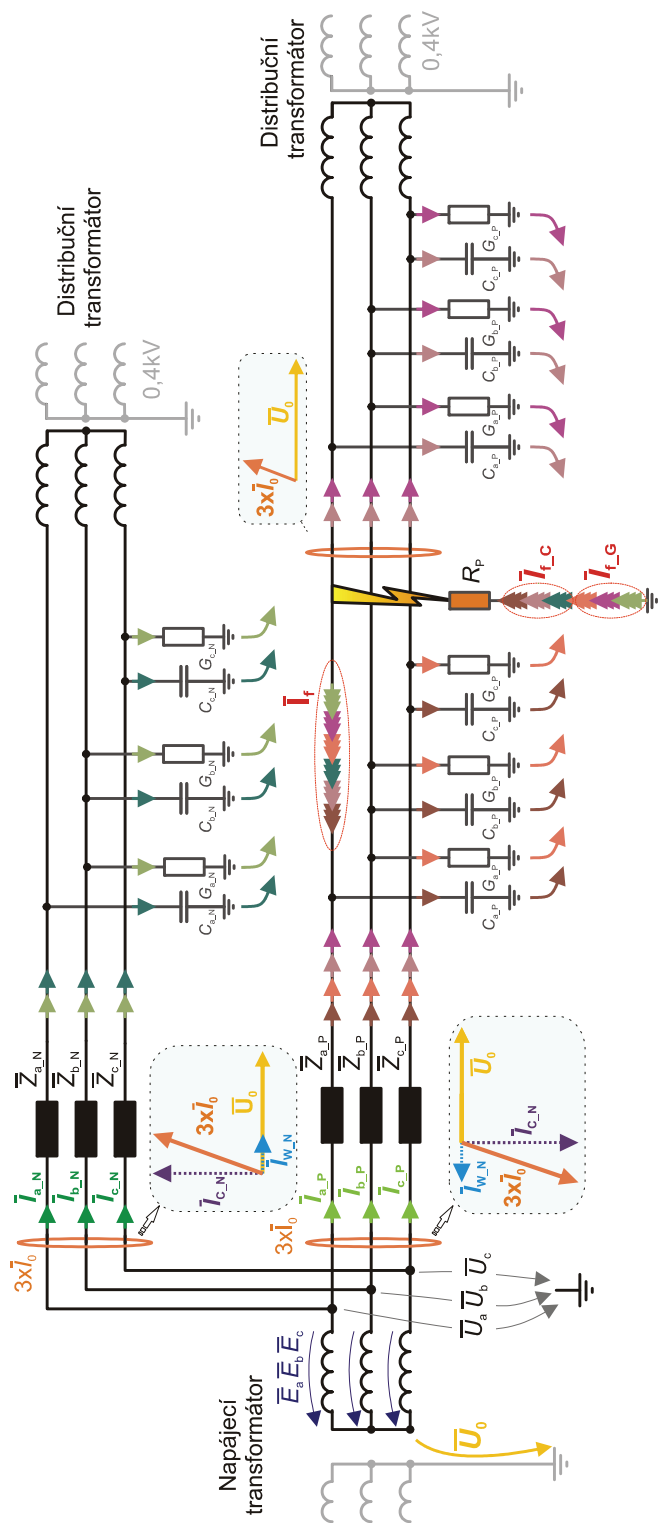
3.1.1.1 Netočivé složky proudu a napětí během zemního spojení v izolované soustavě

Metody detekce zemních poruch jsou typicky založené na měření netočivých složek napětí a proudů. Tyto složky jsou měřeny v napájecích rozvodnách, kde na každém vývodu je měřena netočivá složka proudu a netočivá složka napětí na přípojnících napájecí rozvodny. Netočivá složka proudu je nejčastěji měřena s využitím součtového zapojení tří přístrojových transformátorů proudu PTP, díky čemuž je ve skutečnosti měřen trojnásobek netočivé složky proudu $3xI_0$, jak ukazuje obrázek. Netočivá složka napětí je nejčastěji měřena podobně, a to s využitím tří měřících (přístrojových) napěťových transformátorů PTN, přičemž je rovněž měřen trojnásobek netočivé složky napětí $3xU_0$. V případě, že je napájecí rozvodna vybavena zhášecí tlumivkou (kompenzovaná soustava) je netočivá složka napětí měřena automatickou přímo mezi uzlem napájecího transformátoru a zemnicí soustavou (uzlové napětí).



Obr. 3.12: Měření netočivé složky proudu a napětí v napájecí rozvodně

Úroveň a fázové natočení těchto složek jsou klíčové pro detekci poruchou postiženého vývodu a jsou pro každý typ provozu sítě odlišné. Pro pochopení metod lokalizace poruchy v izolovaných soustavách je nutné se nejprve zorientovat v chování jednotlivých složek netočivého proudu a napětí na postiženém a nepostiženém vývodu během trvajících zemního spojení. Pro popis těchto poměrů je využito části izolované distribuční soustavy s dvěma vývody z napájecí rozvodny (viz Obr. 3.13). Jeden vývod je nepostižený (index N) a druhý vývod je postižený jednopólovou poruchou ve fázi A (index P). V případě bezporuchového stavu a při uvažování ideální symetrie fázových napětí v této soustavě, je fázorový součet všech proudů procházejících přes příčné admitance roven nule. Vznik zemního spojení v této soustavě se však projeví napěťovou nesymetrií, jak bylo popsáno v 3.1, a fázorový součet svodových i kapacitních proudů již není roven nule, ale proudu poruchovému.



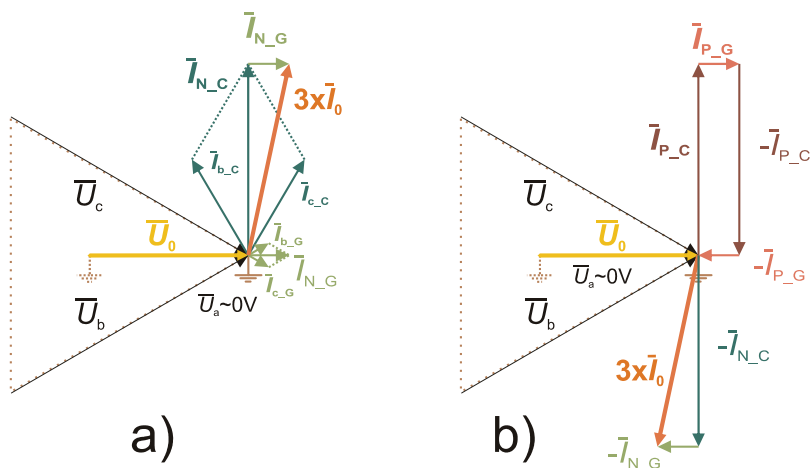
Obr. 3.13: Zjednodušené schéma izolované soustavy v případě vzniku 1pólové poruchy (zemního spojení)

Místem poruchy v tomto případě prochází poruchový proud, jehož činná složka je tvořena celkovým svodovým proudem a jalová složka celkovým kapacitním proudem soustavy $\bar{I}_f = \bar{I}_{f_G} + j\bar{I}_{f_C}$. Celkový svodový proud je tvořen fázorovým součtem proudů procházejících přes svody (příčné konduktance) jednotlivých fází celého systému (G_{a_N} , G_{b_N} , G_{c_N} , G_{a_P} , G_{b_P} a G_{c_P}). Podobně i celkový kapacitní proud je dán fázorovým součtem proudů tekoucích provozními kapacitami jednotlivých fází systému (C_{a_N} , C_{b_N} , C_{c_N} , C_{a_P} , C_{b_P} a C_{c_P}).

Pokud budeme měřit v napájecí rozvodně uzlové napětí (netočivou složku napětí) a součtovými transformátory proudu netočivou složku proudu ($3xI_0$) na postiženém i nepostiženém vývodu, zaznamenají se poměry netočivých složek v korelaci s Obr. 3.13 (je předpokládáno kovové zemní spojení). V případě nepostiženého vývodu nebo v místě měření za místem poruchy ze strany od napáječe je fázový posun zaznamenaných fázorů netočivé složky proudu a napětí menší než 90° (I. kvadrant). Tento posun závisí na poměru svodového a kapacitního proudu monitorované linky. Kdežto u postiženého vývodu se fázový posun mezi monitorovanými složkami netočivého napětí a proudu blíží hodnotě 270° (III. kvadrant) a závisí na poměru svodového a kapacitního proudu nepostižených linek, jak vyplývá z fázorových diagramů na Obr. 3.14.

Proudové a napěťové poměry měřitelné na nezatíženém nepostiženém vývodu z napájecí rozvodny během kovového zemního spojení ve fázi A jsou zobrazeny na Obr. 3.14 a). Tento nepostižený vývod je zatížen pouze kapacitními ($\bar{I}_{b_C}$, $\bar{I}_{c_C}$) a svodovými ($\bar{I}_{b_G}$, $\bar{I}_{c_G}$) proudy uzavírajícími se v nepostižených fázích. Jak je naznačeno na Obr. 3.14 a), tak je složka $3x\bar{I}_0$ dána fázorovým součtem celkového proudu kapacitního $\bar{I}_{N_C}$ a svodového $\bar{I}_{N_G}$, které jsou odebírány tímto vývodem. V případě měření za místem poruchy (Obr. 3.13) je hodnota $3x\bar{I}_0$ dána fázorovým součtem proudu kapacitního a svodového, která je odebírána částí vedení za místem měření.

Napěťové a proudové poměry postiženého vývodu pro stejný případ jsou zobrazeny na Obr. 3.14 b). Podobně jako u nepostiženého vývodu je i z vývodu postiženého odebírán svodový $\bar{I}_{P_G}$ a kapacitní $\bar{I}_{P_C}$ proud, který však nemá žádný vliv na úroveň netočivé složky proudu, jelikož součtový transformátor na tomto vývodu měří fázorový součet proudů $\bar{I}_{P_G}$, $\bar{I}_{P_C}$ a proudu poruchového, který má opačný směr a je dán součtem všech konduktančních proudů postižených i nepostižených vývodů (proudy $\bar{I}_{P_G}$, $\bar{I}_{P_C}$ se odečtou). Netočivá složka poruchového proudu $3x\bar{I}_0$ je proto na postiženém vývodu dána kapacitním a svodovým proudem všech nepostižených vývodů v soustavě měřených v opačném směru (záporné znaménko), jak naznačuje Obr. 3.14 b).



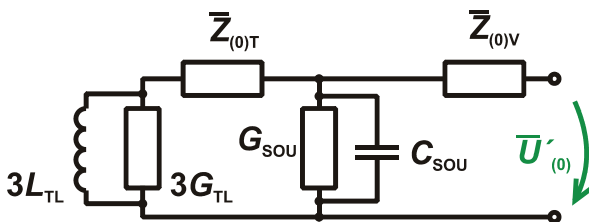
Obr. 3.14: Fázorový diagram napěťových a proudových poměrů na nepostiženém a) a postiženém b) vývodu z napájecí rozvodny během kovového ZS.

Činná i jalová složka netočivého proudu je u postiženého vývodu v protifázi s vývodem nepostiženým, čehož se využívá při detekci postiženého vývodu či pro určení směru poruchy jak bude popsáno v kapitole 3.2.5.

3.2. Kompenzované sítě

Sítě kompenzované mají spojený nulový bod transformátoru se zemnicí soustavou přes zhášecí tlumivku (Obr. 3.1 b). Tato zhášecí tlumivka umožňuje kompenzovat kapacitní proud zemního spojení tak, aby místem poruchy procházel pouze zbytkový (reziduální) proud mnohem nižší úrovně. Tento zbytkový proud tvoří obvykle 3 % – 10 % celkového kapacitního proudu a je převážně činného charakteru. Tímto způsobem lze provozovat síť s kapacitním proudem až do 100 A v případě sítí venkovních (venkovní vedení tvoří nejméně 98 % celé sítě), do 300 A v případě sítí smíšených (nejméně 10 % venkovního a 2 % kabelového vedení) a do 450 A v případě sítí kabelových (kabelové vedení tvoří nejméně 90 % celkové sítě) [1]. Obecně se v našich distribučních sítích používá centralizovaná kompenzace, kdy je využíváno jedné zhášecí tlumivky zapojené mezi uzel transformátoru a zemnicí soustavu rozvodny. V ojedinělých případech (propojení dvou oblastí) lze provozovat více zhášecích tlumivek paralelně. Během provozu jsou tyto tlumivky laděny automatikou, která nastavuje zhášecí tlumivku do paralelní rezonance s celkovou kapacitou provozované sítě tak, aby místem poruchy procházel pouze malý zbytkový reziduální proud, proto se někdy těmto tlumivkám říká rezonanční případně Petersenovy, dle jejího vynálezce. Velkou výhodou sítí kompenzovaných je podobně jako u sítí izolovaných možnost provozu soustavy se zemním spojením po dobu potřebnou pro odstranění jeho příčiny bez přerušení dodávky elektrické energie. Tento provozní stav nemá zásadní vliv na konečné odběratele, avšak existuje reálné riziko rozšíření zemního spojení

na závažnější poruchu (dvojité zemní spojení, mezifázový zkrat), která by vedla k okamžitému odpojení postiženého vývodu.



Obr. 3.15: Netočivé schéma kompenzované soustavy

V případě popisu kompenzované soustavy s využitím Obr. 3.2 je třeba jako impedanci v uzlu transformátoru uvažovat impedanci zhášecí tlumivky, představovanou paralelním spojením její indukčnosti L a vodivosti G_{TL} , která respektuje činné ztráty v tlumivce. Vzhledem k velmi malému netočivému proudu lze ve schématu Obr. 3.15 zanedbat impedanci transformátoru a vedení.

Pro netočivou složkovou impedanci pak lze psát

$$\bar{Z}_{(0)\text{komp}} = \frac{1}{G_{\text{SOU}} + 3G_{\text{TL}} + j\left(\omega C_{\text{SOU}} - \frac{1}{3\omega L}\right)}, \quad (3.18)$$

kde G_{SOU} je celkový svod soustavy (svod všech vedení postižené soustavy) a C_{SOU} je celková kapacita všech vedení vůči zemi.

Pokud je předpokládán ideálně kompenzovaný stav, tzn. je splněna podmínka paralelní rezonance, kdy platí

$$\omega C_{\text{SOU}} = \frac{1}{3\omega L}, \quad (3.19)$$

zjednoduší se vztah (3.18) na

$$\bar{Z}_{(0)\text{komp}} = \frac{1}{G_{\text{SOU}} + 3G_{\text{TL}}}. \quad (3.20)$$

Poruchový proud v kompenzované soustavě je možné vyjádřit dosazením vztahu (3.18) resp. (3.20) pro vyladěný stav do rovnice (3.12). Obecně pak platí

$$\begin{aligned} \bar{I}_P &= -\bar{I}_A = -3\bar{I}_{(1)} = \\ &= \frac{3\bar{U}}{2\bar{Z}_{(1)} + \frac{1}{G_{\text{SOU}} + 3G_{\text{TL}} + j\left(\omega C_{\text{SOU}} - \frac{1}{3\omega L}\right)} + 3R_P}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Vztah (3.21) je odvozen pro případ zanedbání kapacitní nesymetrie $1/R_p \gg \omega C_{nes}$.

Pokud budeme předpokládat kovové zemní spojení ($R_p = 0 \Omega$) a zanedbáme vzhledem k velmi nízké úrovni poruchového proudu v sítích kompenzovaných souslednou impedanci, zjednoduší se vztah (3.21) na:

$$\begin{aligned}\bar{I}_p &= 3\bar{U} \left(G_{SOU} + 3G_{TL} + j \left(\omega C_{SOU} - \frac{1}{3\omega L} \right) \right) = \\ &= I_R + j(I_C - I_L)\end{aligned}\quad (3.22)$$

Výsledný poruchový proud má imaginární složku danou rozdílem kapacitního proudu sítě a induktivního proudu zhášecí tlumivkou a nekompenzovanou činnou složku celého systému (odpovídající ztrátám ve zhášecí tlumivce a svodovým odporům fázových vodičů proti zemi). Účelem kompenzovaných sítí je dosažení pomocí ladící automatiky zhášecí tlumivky stavu, kdy

$$|\bar{I}_p| = \min \Leftrightarrow |\bar{I}_C| = |\bar{I}_L| \quad (3.23)$$

a kdy je ohrožení krokovým či dotykovým napětím minimální a samozhášecí schopnost poruchy je maximální. Tento vztah vyjadřuje základní funkci zhášecí tlumivky, tj. snižování proudu místem zemního spojení kompenzací zemních kapacitních proudů. Minimální velikost má poruchový proud pro stav rezonance a je dán svodovými odpory sítě a ztrátami v tlumivce. V úvahu je ovšem třeba brát také proud nevykompenzovaných harmonických, jejichž velikost se v tomto případě stává nezanedbatelnou.

Pro kompenzační proud během kovové poruchy a při respektování výše zmíněných zjednodušení můžeme psát

$$\bar{I}_L = -\frac{U_0}{jX_{TL}} = -\frac{jU}{X_{TL}} = -\frac{jU_n}{\sqrt{3}X_{TL}}. \quad (3.24)$$

Z výše popsaného vyplývá, že pro podmínku rezonance musí platit $\bar{I}_C = \bar{I}_L$, pak po dosazení vztahů (3.16) a (3.24) získáme vztah pro výpočet indukčnosti tlumivky ve stavu rezonance:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_{SOU}}. \quad (3.25)$$

3.2.1 Zhášecí tlumivka a rezonanční křivka

Jak již bylo řečeno, zhášecí tlumivka se instaluje v napájecích rozvodnách distribuční soustavy a připojuje se k uzlu napájecího transformátoru. V případě, že uzel transformátoru není vyveden, lze zhášecí tlumivku připojit k uměle vytvořenému uzlu třífázové nulové tlumivky nebo k uzlu nezátíženého pomocného

Automatika ladění
zhášecí tlumivky

D_1
 $U_n - 13,3 \text{ kV}$
primární vinutí

M_1
pomocné měřicí
vinutí U_0

N_1
automatika přepínání
odporníků

M_2
500 V
pomocné výkonové
vinutí

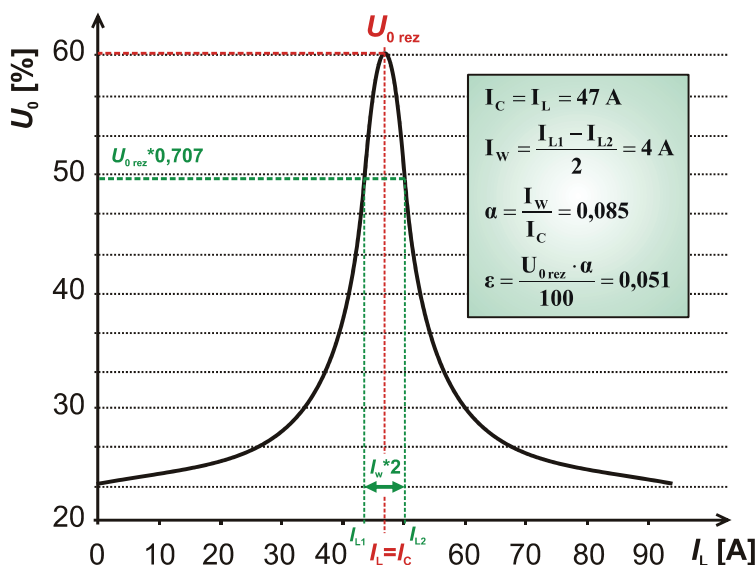
N_2
 D_2
pomocné měřicí
vinutí I_L

R_p

K výkonovému vinutí M_2N_2 s nominálním napětím 500 V je připojována sestava pomocných (stavebnicových) odporníků. Sestava umožňuje jejich konfiguraci odporníků dle přání provozovatele. Rozšířená sestava tří paralelních jednoohmových odporníků, které jsou připojovány do paralelní kombinace manuálně nebo pomocí stykačů je uvedena na (Obr. 3.16). Vzhledem k masivnímu nasazení zejména digitálních ochran je doporučeno nastavení stavebnicového odporníku na hodnotu 1Ω [4]. Připínání pomocného odporníku je prováděno

na základě kritéria U_0 s doporučeným nastavením v oblasti přibližně 2 kV až 3 kV pro maximalizaci citlivosti zemních ochran [4].

Nezbytným prostředkem pro správnou kompenzaci kapacitního proudu je znalost rezonanční křivky soustavy. Tato křivka vyjadřuje závislost uzlového napětí U_0 na kompenzačním proudu procházejícím tlumivkou I_L pro danou oblast distribuční soustavy. Zjišťování rezonanční křivky se provádí postupným laděním zhášecí tlumivky, která je připojena k soustavě bez zemního spojení při průběžném odečítání hodnot U_0 a I_L . Zjišťování rezonanční křivky je však možné pouze u soustav nesymetrických, jako jsou soustavy s vysokým podílem venkovního vedení, které se projevují značnou nesymetrií fázových napětí vůči zemi. U kabelových sítí, které se naopak projevují dobrou symetrií fázových napětí (plochá rezonanční křivka), je nutné pro zajištění korektní funkce zhášecí tlumivky a pro zjištění charakteristických hodnot vytvořit umělou nesymetrii soustavy. Příklad rezonanční křivky je uveden na Obr. 3.17. Z této charakteristiky lze pak zjistit potřebné charakteristické hodnoty sítě, jako je: velikost kapacitního proudu provozované sítě I_C , který je roven kompenzačnímu proudu v místě rezonančního napětí $U_{0\text{ rez}}$, dále pak velikost svodového proudu I_W , činitel útlumu sítě α , činitel nesymetrie sítě ε . Pro příklad jsou tyto charakteristické hodnoty sítě uvedeny pro příslušnou rezonanční křivku na Obr. 3.17.



Obr. 3.17: Příklad rezonanční křivky

Při provozu soustavy v kompenzovaném stavu se zhášecí tlumivka nastavuje na rezonanční napětí $U_{0\text{ rez}}$, kdy během tohoto stavu zcela kompenzuje kapacitní proud sítě I_C , jak také vyplývá z uvedené rezonanční křivky. Důležité je však říci, že 100% kompenzace základní harmonické kapacitního proudu soustavy není vzhledem k nesymetrii příčných admitancí možná. Úroveň kompenzace kapacitního proudu bude v případě nesymetrické soustavy závislá nejen na naladění zhášecí tlumivky, ale i na fázi postižené ZS. V současné době je

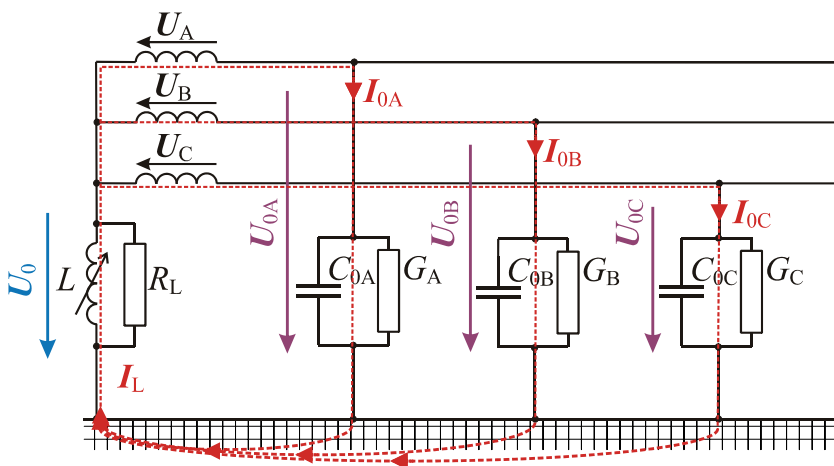
trendem provozovat distribuční sítě zcela vykompenzované, kdy místem poruchy prochází nejmenší zbytkový proud. Avšak v některých případech se lze setkat i s provozem soustavy jako mírně podkompenzované ($I_L < I_C$) nebo překompenzované ($I_L > I_C$). Zejména v případě sítí značně nesymetrických a u sítí s malými činnými odpory dosahuje napětí mezi nulovým bodem transformátoru a zemnicí soustavou U_0 značně vysoké úrovně, čímž dochází k namáhání nulového bodu napájecího transformátoru a vypínačů. Proto se dříve pro snížení tohoto namáhání tlumivka rozladila, čímž došlo vlivem strmosti rezonanční charakteristiky k poklesu napětí v uzlu transformátoru. I nyní se lze setkat s provozem v mírně podkompenzovaném, případně překompenzovaném stavu, dle místních podmínek a zvyklostí provozu. V některých evropských zemích jako je například Finsko, se využívá i kompenzace decentralizované. V tomto případě je na každém vývodu umístěna samostatná tlumivka, která je pevně nastavena tak, aby kompenzovala pouze kapacitní proudy tohoto vývodu. V případě, že dojde k odpojení vývodu, odpojí se společně i zhášecí tlumivka, čímž se bez jakékoli regulace udržuje požadovaný stupeň kompenzace. Díky tomuto decentralizovanému řešení je však lokalizace místa poruchy ještě složitější než v případě u nás používané centralizované kompenzace.

Nevýhodou všech doposud používaných zhášecích tlumivek je možnost kompenzování kapacitního proudu pouze o frekvenci základní harmonické, zbylé frekvence proto nejsou kompenzovány. Výrazný podíl 3., 5. a 7. harmonické v kapacitním proudu je zejména v rozsáhlých, hustě obydlených či průmyslových oblastech, kde mnohdy tyto nekompenzované složky vyššího řádu převyšují hodnotu zbytkového proudu základní harmonické. V těchto případech pak může dosahovat celkový zbytkový proud procházející místem poruchy nebezpečných úrovní. Této nedokonalosti se však s výhodou využívá při lokalizaci zemního spojení, jak je popsáno v kapitole 3.2.5.

3.2.1.1 Ladění zhášecích tlumivek

Ladění zhášecích tlumivek v našich sítích je většinou automatické. Úkolem automatické řídicí jednotky je určit a nastavit hodnotu L tak, aby proud $\bar{I}_p$ byl minimální. Tento bod je také nazývaný rezonanční bod soustavy, protože napětí na uzemnění je maximální. V takovém stavu je soustava naladěna. Kritérium pro vyladěný stav je dosažení maxima napětí $\bar{U}_0$ na zhášecí tlumivce. K ladění dochází vždy po zapnutí automatiky, za provozu, při změně konfigurace sítě (připnutí nebo odepnutí vedení). Aby se omezil vliv přechodných změn napětí $\bar{U}_0$, které nesouvisí s rozladěním sítě, vyhodnotí automatika jako popud pro rozběh pouze změny, které trvají déle, než nastavené časové zpoždění rozběhu.

Napětí $\bar{U}_0$ lze určit z náhradního schématu kompenzované sítě, kde jsou tentokrát uvažovány parametry skutečné neidealizované sítě. Každý kompenzovaný třífázový vn systém může být nahrazen s dostatečnou přesností schématem uvedeným na Obr. 3.18.



Obr. 3.18: Schéma 3-f systému uzemněného přes zhašecí tlumivku

Využitím prvního a druhého Kirchhoffova zákona v uvedeném schématu odvodíme obecnou rovnici pro relativní netočivé napětí.

Napětí na tlumivce je $\bar{U}_0 = -\bar{Z}_L \cdot \bar{I}_L$ a proud tlumivkou

$$\bar{I}_L = \bar{I}_{0A} + \bar{I}_{0B} + \bar{I}_{0C} = \bar{U}_{0A} \bar{Y}_A + \bar{U}_{0B} \bar{Y}_B + \bar{U}_{0C} \bar{Y}_C, \quad (3.26)$$

$$\bar{I}_L = (\bar{U}_A + \bar{U}_0) \bar{Y}_A + (\bar{U}_B + \bar{U}_0) \bar{Y}_B + (\bar{U}_C + \bar{U}_0) \bar{Y}_C. \quad (3.27)$$

Dosazením za fázová napětí $\bar{U}_A = \bar{U}$, $\bar{U}_B = \bar{a}^2 \bar{U}$, $\bar{U}_C = \bar{a} \bar{U}$ bude

$$\begin{aligned} \bar{I}_L &= (\bar{U} + \bar{U}_0) \bar{Y}_A + (\bar{a}^2 \bar{U} + \bar{U}_0) \bar{Y}_B + (\bar{a} \bar{U} + \bar{U}_0) \bar{Y}_C, \\ \bar{I}_L &= \bar{U} (\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C) + \bar{U}_0 (\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C). \end{aligned} \quad (3.28)$$

Dosazení proudu tlumivkou do výrazu pro její napětí a úpravou

$$\begin{aligned} \bar{U}_0 &= -\bar{Z}_L \left[\bar{U} (\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C) + \bar{U}_0 (\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C) \right], \\ \bar{U}_0 &= -\frac{\bar{Z}_L \bar{U} (\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C)}{\bar{Z}_L (\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C) + 1}, \\ \bar{U}_0 &= -\frac{\bar{U} (\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C)}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \frac{1}{\bar{Z}_L}}, \end{aligned} \quad (3.29)$$

pak pro poměrnou hodnotu $\bar{u}_0$ lze psát

$$\bar{u}_0 = \frac{\bar{U}_0}{\bar{U}} = -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \frac{1}{\bar{Z}_L}}, \quad (3.30)$$

kde $\frac{1}{\bar{Z}_L} = \frac{1}{R_L} - \frac{j}{\omega L}$ a $\bar{Y}_n = G_n + j\omega C_{0n}$, $n = A, B, C$

Po rozkladu příčných admitancí jednotlivých fází na susceptanci B a konduktanci G

$$\bar{u}_0 = -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{\bar{Y}_A + \bar{Y}_B + \bar{Y}_C + \frac{1}{\bar{Z}_L}}, \quad (3.31)$$

$$\bar{u}_0 = -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{j\omega(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C}) - \frac{j}{\omega L} + G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}},$$

$$\bar{u}_0 = -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{j\omega(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C})} \cdot \frac{j\omega(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C})}{j\omega(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C}) - \frac{j}{\omega L} + G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}},$$

$$\bar{u}_0 = -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{j\omega(C_A + C_B + C_C)} \cdot \frac{1}{\frac{j\omega(C_A + C_B + C_C)}{j\omega(C_A + C_B + C_C)} - \frac{j}{jL\omega^2(C_A + C_B + C_C)} + \frac{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}}{j\omega(C_A + C_B + C_C)}}, \quad (3.32)$$

$$\bar{u}_0 = -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{j\omega(C_A + C_B + C_C)} \cdot \frac{1}{1 - \frac{1}{L\omega^2(C_A + C_B + C_C)} - j\frac{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}}{\omega(C_A + C_B + C_C)}},$$

může být výraz (3.30) dále zjednodušen definicí následujících poměrných parametrů sítě:

Rozladění v

$$v = -\frac{j\omega(C_A + C_B + C_C) - \frac{j}{\omega L}}{j\omega(C_A + C_B + C_C)} \quad (3.33)$$

$$v = \frac{1}{\omega^2 L(C_A + C_B + C_C)} - 1,$$

které je bezrozměrnou skalární veličinou stejně jako **tlumení d**

$$d = \frac{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}}{\omega(C_A + C_B + C_C)} \quad (3.34)$$

a dále bezrozměrný vektor **nesymetrie $\bar{k}_0$**

$$\bar{k} = \frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{j\omega(C_A + C_B + C_C)}. \quad (3.35)$$

Relativní netočivá složka napětí pak může být vyjádřena jako:

$$\bar{u}_0 = \frac{\bar{k}}{v + jd}, \quad (3.36)$$

jejíž amplituda bude

$$|\bar{u}_0| = \frac{|\bar{k}|}{\sqrt{v^2 + d^2}}. \quad (3.37)$$

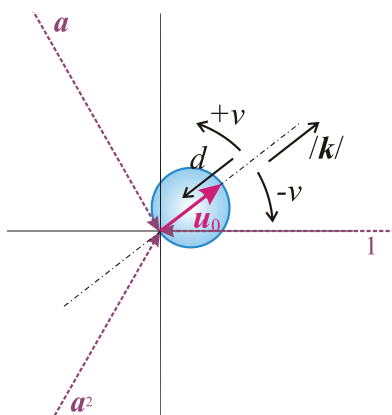
Z výše uvedeného vztahu tedy vyplývá, že polohovou křivkou $\bar{u}_0$ v komplexní rovině je kružnice procházející středem souřadného systému a její poloměr je dán

poměrem celkové kapacitní nesymetrie a tlumení sítě (Obr. 3.19). Ve vyladěném stavu je $v = 0$ a platí tedy:

$$\bar{u}_{0\max} = \frac{\bar{k}}{jd} = \frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{j\omega(C_A + C_B + C_C)} \frac{-j\omega(C_A + C_B + C_C)}{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}}, \quad (3.38)$$

$$\bar{u}_{0\max} = -\frac{\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C}{G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}},$$

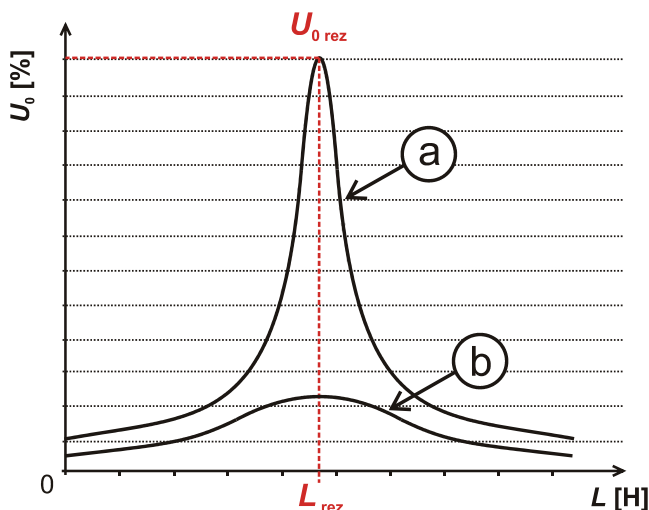
$$|\bar{u}_{0\max}| = \frac{|\bar{k}|}{d}. \quad (3.39)$$



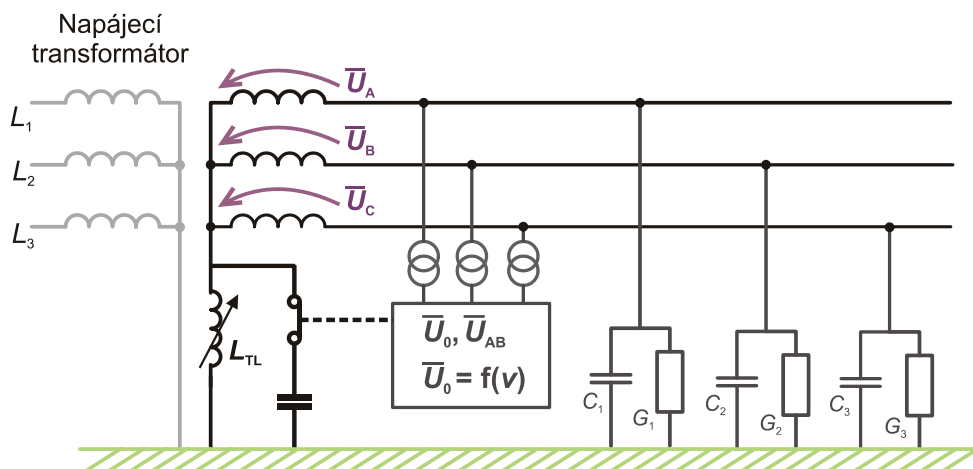
Obr. 3.19: Geometrické místo $\bar{u}_0$ v komplexní rovině

Většina současných ladících automatik vyhledává maximální hodnotu $|\bar{u}_{0\max}|$, tzn., že hledá maximum rezonanční křivky (Obr. 3.19). Avšak tato metoda má značnou nevýhodu v tom, že k získání měřitelné hodnoty $|\bar{u}_{0\max}|$ je třeba výrazné nesymetrie, což je problémem zvláště v sítích s výrazným podílem kabelů, jak vyplývá z rezonančních křivek zobrazených na Obr. 3.20.

Novější systémy řeší tento problém měřením uvedené polohové křivky prostřednictvím změny rozladění (parametru v), kdy při malém napětí $|\bar{u}_{0\max}|$ je ještě dobře technicky měřitelná úhlová změna $\bar{u}_0$ v blízkosti rezonančního bodu sítě. Změnu úhlu lze provést připojením kapacitní reaktance do nuly systému (Obr. 3.21). K přesnému určení rezonančního bodu sítě pak postačí tři body na polohové křivce. Tento způsob ladění však vyžaduje tlumivku s poměrně citlivou a přesnou regulací indukčnosti.



Obr. 3.20: Rezonanční křivky – a) pro venkovní vedení, b) pro kabelovou síť



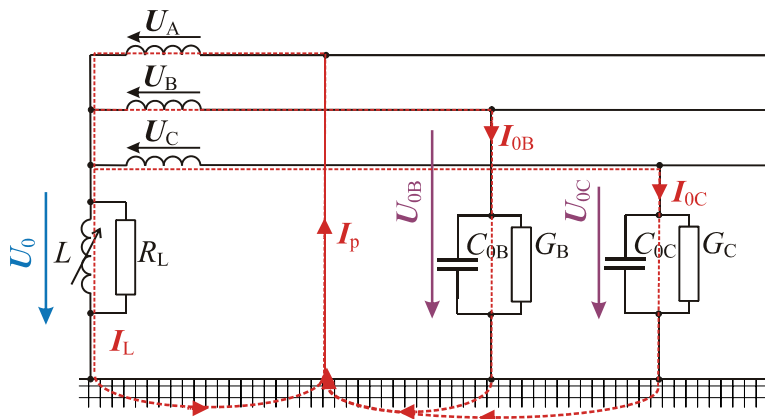
Obr. 3.21: Připnutí reaktance pro stanovení oblasti křivky $u_0 = f(v)$

Další možností je ladění sítě založené na krátkodobé injektáži proudu v nulovém bodě, který způsobí změnu netočivého napětí. Měřením úhlu a amplitudy netočivého napětí před a během injektáže jsou určeny tři základní parametry systému – nesymetrie k , rozladění v a útlum d . Změna měřených veličin se docílí posunutím nulového bodu sítě zapojením aktivních nebo pasivních komponent do pomocného vinutí zhášecí tlumivky a tím se vyloučí potřeba přesného ladění zhášecí tlumivky.

Poměry v síti při zemním spojení jsou znázorněny na Obr. 3.22, ze kterého je patrné, že porucha je charakteristická změnou napětí uzlu sítě U_0 .

Při kovovém zemním spojení (odpor poruchy $R_p = 0$) má napětí uzlu velikost $U_0 = -U$ a pro proud platí

$$\bar{I}_p = -U\bar{Y}_L + \bar{Y}_B(\bar{a}^2 U - U) + \bar{Y}_C(\bar{a} U - U). \quad (3.40)$$



Obr. 3.22: Rozložení proudů při jednofázovém zemním spojení

Dosazením za netočivé admittance a úpravou celé rovnice dostaneme pro poruchový proud

$$\begin{aligned} \bar{I}_p &= U(\bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C) - U\bar{Y}_L - U(\bar{Y}_B + \bar{Y}_C) + U\bar{Y}_A - U\bar{Y}_A, \\ \bar{I}_p &= U(\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C) - \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$-U\left(\frac{1}{R_L} - \frac{j}{\omega L}\right) - U(G_A + G_B + G_C) - jU(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C}),$$

$$\bar{I}_p = I_{\text{rest}} + j(I_L - I_c) + \Delta \bar{I}_c, \quad (3.42)$$

kde I_{rest} je zbytkový proud zemního spojení

$$I_{\text{rest}} = -U\left(G_A + G_B + G_C + \frac{1}{R_L}\right), \quad (3.43)$$

I_c je kapacitní proud sítě

$$I_c = U(C_{0A} + C_{0B} + C_{0C}), \quad (3.44)$$

$\Delta \bar{I}_c$ je kapacitní proud způsobený nesymetrií sítě

$$\Delta \bar{I}_c = U(\bar{Y}_A + \bar{a}^2 \bar{Y}_B + \bar{a} \bar{Y}_C), \quad (3.45)$$

I_L je induktivní proud zhašecí tlumivky

$$I_L = U \frac{1}{\omega L}. \quad (3.46)$$

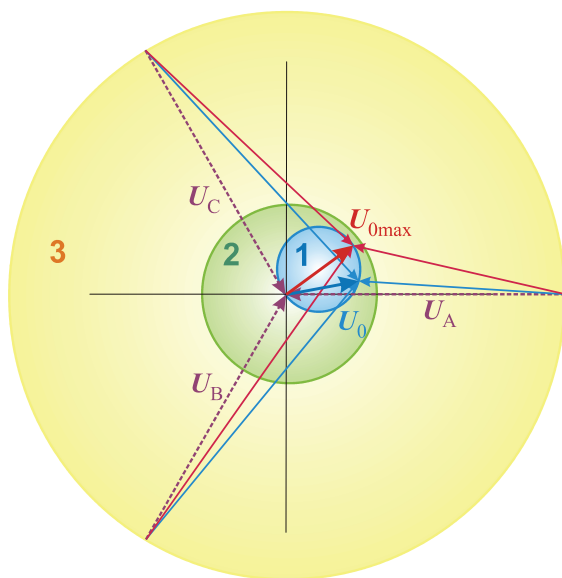
Pak můžeme i jednotlivé poměrné parametry sítě zapsat pomocí těchto proudů

$$\text{rozladění: } \nu = \frac{I_L - I_c}{I_c}, \quad (3.47)$$

$$\text{tlumení: } d = \frac{I_{\text{rest}}}{I_c}, \quad (3.48)$$

$$\text{nesymetrie: } \bar{k} = \frac{\Delta \bar{I}_c}{I_c}. \quad (3.49)$$

Je zřejmé, že porucha se projeví změnou poměrných parametrů sítě a změní tedy i hodnotu netočivého napětí $\bar{U}_0$. Kritériem poruchy v síti je pak poloha vektoru $\bar{U}_0$ v komplexní rovině (viz Obr. 3.23).



Obr. 3.23: Vymezení oblastí U_0 v komplexní rovině

Oblast 1 je oblast kolísání $\overline{U}_0$ při malých změnách přirozených nesymetrií sítě a vyladěné síti. Oblast 2 představuje možnost změn $\overline{U}_0$ při větších změnách v síti (např. změny konfigurace a rozsahu sítě). Pokud se fázor netočivého napětí dostane do této oblasti, spustí se automatika pro ladění zhašecí cívky. Posun vektoru $\overline{U}_0$ do oblasti 3 je dáno zemním spojením v síti.

Většina současných distribučních sítí 22 kV v ČR k indikaci zemního spojení užívá měření netočivé složky napětí $\overline{U}_0$ v uzlu transformátoru pomocí měřících transformátorů napětí, jejichž sekundární vinutí jsou zapojena do otevřeného trojúhelníku.

3.2.2 Charakteristika zemního spojení v kompenzovaných sítích

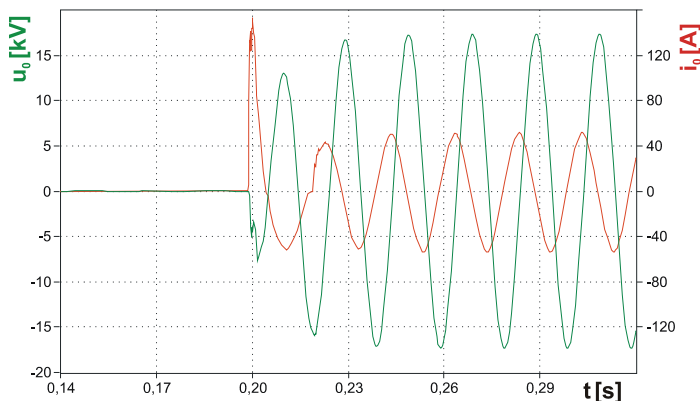
Skutečné proudové a napěťové poměry během zemního spojení jsou velmi závislé na charakteru poruchy. Obecně lze zemní spojení charakterizovat dle jeho doby trvání, velikosti přechodového odporu či jeho charakteru.

Na základě velikosti odporu poruchy lze rozlišovat následující typy zemního spojení:

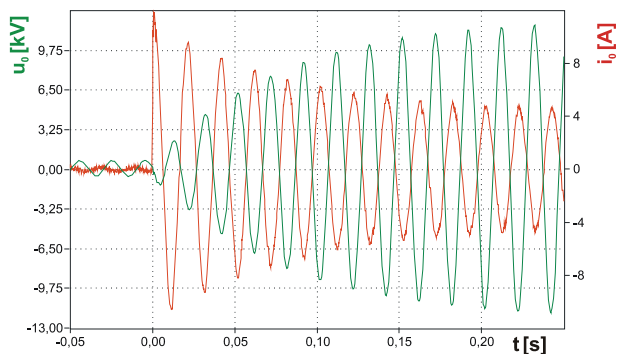
Kovové zemní spojení – při tomto typu poruchy je hodnota přechodového odporu v řádech jednotek ohmů. Současná praxe však ukazuje, že míst, kde může v síti vn dojít ke vzniku kovového zemního spojení je poměrně málo. Při bližším pohledu na technické podmínky provozu distribuční sítě vn zjistíme, že jediným skutečně reálným místem vzniku kovového zemního spojení nebo zemního spojení s velmi malým odporem jsou místa s dobrým uzemněním, tedy např. spínací stanice vn či distribuční trafostanice vn/nn, když dojde k přeskoku oblouku přímo na neživou část trafostanice vodivě spojenou s uzemněním. Příklad oscilografického průběhu netočivých složek napětí a proudů postiženého vývodu v případě reálného kovového zemního spojení je zobrazen na Obr. 3.24. Výhodou kovových poruch je vysoká úroveň poruchového proudu a velmi nízké tlumení transienčních jevů při vzniku zemního spojení, vlivem čehož dosahují špičky kapacitního vybíjecího proudu úrovně, která umožňuje bezproblémovou detekci poruchy.

Odporové zemní spojení – v tomto případě dosahuje přechodový odpor poruchy hodnot od několika stovek až po tisíce ohmů. Zemní spojení s hodnotou odporu poruchy přesahující 1 kΩ lze pak považovat za vysokoodporová ZS. Odporová zemní spojení jsou nejčastějším typem poruchy ve venkovních distribučních sítích. Příklad oscilografického průběhu netočivého proudu a napětí během odporového zemního spojení je zobrazen na Obr. 3.25. Nevýhodou odporových zemních spojení je tlumení transienčních jevů (vybíjecího proudu) a omezení úrovně poruchového proudu spolu s netočivou složkou napětí, jak také vyplývá z porovnání Obr. 3.24 a Obr. 3.25. Tyto negativní vlivy značně komplikují indikaci poruchy a její následnou lokalizaci. Obecně lze konstatovat, že poruchy s odporem nad 1000 Ω jsou jen obtížně lokalizovatelné. Poruchy s odporem v řádech až několika tisíc ohmů jsou pak jen obtížně zaznamenatelné, jelikož velmi nízká úroveň netočivé složky napětí při této poruše je velmi obtížně odlišitelná

od úrovně netočivé složky napětí v bezporuchovém stavu vyvolané nesymetrií soustavy. Při vysokoodporové poruše nemusí dosáhnout netočivá složka napětí prahové úrovně, díky čemuž nedojde k aktivaci automatik umožňující detekci této poruchy.

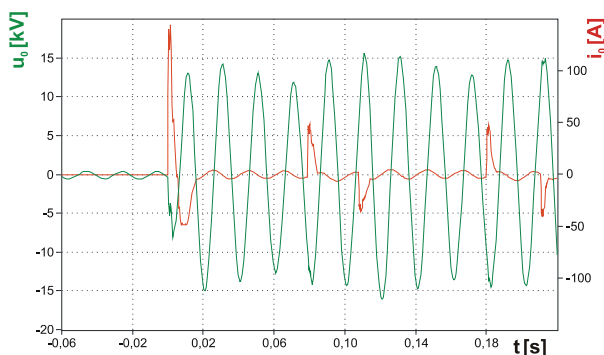


Obr. 3.24: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při kovovém ZS



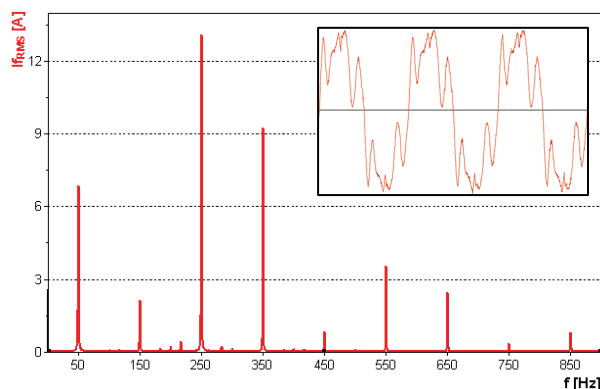
Obr. 3.25: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při odporovém ZS ($R_f = 1600 \Omega$)

Obloukové zemní spojení – přechodový odpor v místě zemního spojení je tvořen převážně odporem oblouku. Obloukové poruchy jsou charakteristické zejména krátkodobým přerušováním hořením oblouku, které má za následek krátkodobá přepětí a proudové vybíjecí špičky velkých úrovní během poruchy. Příklad zobrazení oscilografického průběhu netočivé složky proudu a napětí postiženého vývodu během obloukového zemního spojení na poškozeném kabelu je zobrazen na Obr. 3.26.



Obr. 3.26: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při obloukovém ZS

Dalším charakteristickým rysem, který se v poslední době značně projevuje, je obsah harmonických vyššího řádu v poruchovém proudu, a to zejména v případě zemních spojení uvnitř městských či průmyslových distribučních sítí. Jelikož nejsou tyto složky kompenzovány zhašecí tlumivkou (je naladěna do rezonance se základní harmonickou), dosahují často v poruchovém proudu vyšší úrovně než je reziduální proud základní harmonické. Na Obr. 3.27 je zobrazen příklad spektra efektivních hodnot jednotlivých frekvenčních složek obsažených v poruchovém proudu během zemního spojení uvnitř městské distribuční soustavy.

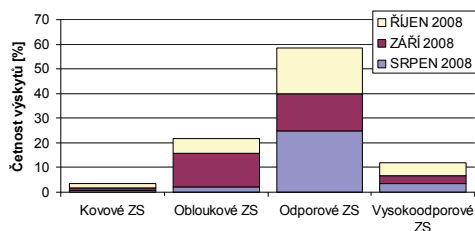


Obr. 3.27: RMS amplitudové spektrum poruchového proudu v městské distribuční síti

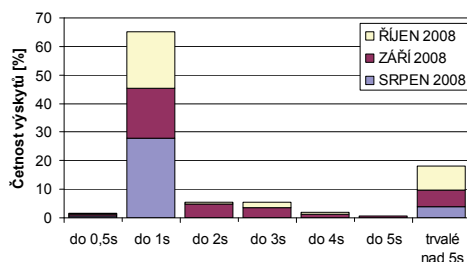
Podle doby trvání lze rozdělit poruchy na:

- Velmi krátká (mžiková) zemní spojení – doba trvání tohoto typu zemního spojení je do 5s,
- Krátkodobá zemní spojení – doba trvání je od 5 s do 10 minut,
- Trvalá zemní spojení – doba trvání nad 10 minut,

- Přerušovaná zemní spojení – jedná se o mžiková zemní spojení v krátkodobém sledu za sebou (přerušované hoření oblouku Obr. 3.27).

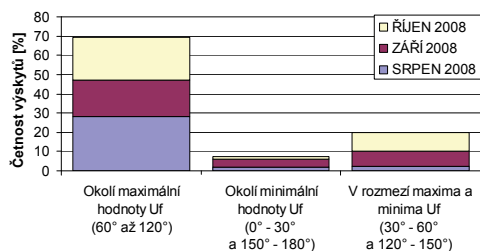


Obr. 3.28: Čtvrtletní četnost výskytu zemního spojení kategorizovaná dle velikosti přechodového odporu

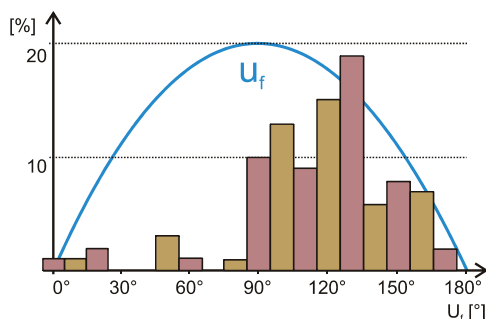


Obr. 3.29: Čtvrtletní četnost výskytu zemního spojení kategorizovaná dle doby trvání poruchy

Na Obr. 3.28 a Obr. 3.29 je uvedena četnost výskytů zemního spojení kategorizována dle typu a doby trvání poruchy vyhodnocená za jedno čtvrtletí v reálné mimoměstské oblasti venkovní distribuční soustavy. Z těchto grafů je patrné, že nejčastějším typem poruchy ve sledované oblasti je mžikové odporové zemní spojení s dobou trvání do 1 s. Na Obr. 3.28 je za vysokoodporové zemní spojení považována porucha s přechodovým odporem nad 1 k Ω .



Obr. 3.30: Čtvrtletní četnost výskytu zemního spojení ve venkovní síti kategorizovaná dle okamžiku zapálení poruchy



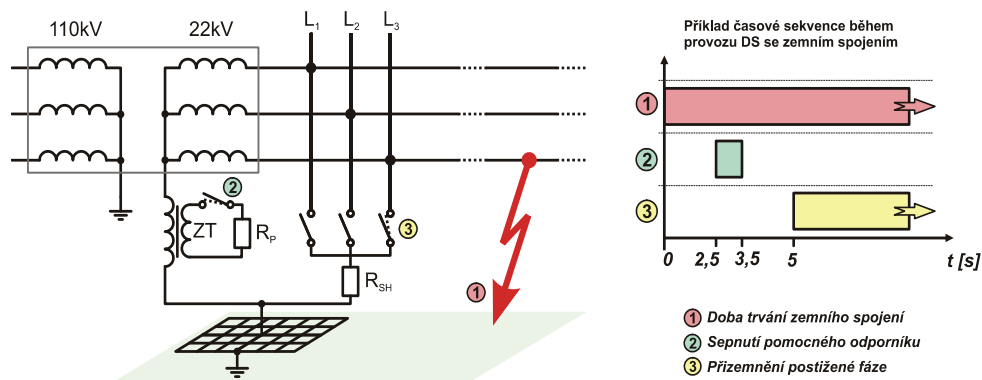
Obr. 3.31: Roční četnost výskytu ZS v rakouské venkovní distribuční síti kategorizovaná dle okamžiku zapálení poruchy

Další důležitou informací, kterou lze charakterizovat zemní spojení je okamžik jeho vzniku vzhledem k fázovému posunu postiženého napětí (fáze zapálení poruchy), který je určující pro úroveň vybíjecího proudu. Na Obr. 3.30 je opětovně uvedena čtvrtletní četnost výskytu zemního spojení uvnitř mimoměstské venkovní distribuční sítě, kategorizovaná dle okamžité hodnoty postiženého napětí v okamžiku vzniku poruchy. Z tohoto grafu vyplývá, že přibližně 70 % všech zemních spojení bylo zapáleno v okamžiku průchodu postiženého napětí svým

maximem. Podobné závěry jsou prezentovány i z rakouské venkovní distribuční soustavy, kde je na Obr. 3.31 podrobně zpracována roční četnost výskytu poruch vzhledem k fázi postiženého napětí. Závěrem můžeme říci, že většina poruch během sledovaného období byla zapálena v rozmezí úhlů $90^\circ - 160^\circ$ postiženého napětí a celková doba trvání poruchy byla v 70 % případů nižší než 1 s a ve 12 % delší než 7 s [5].

3.2.3 Provoz kompenzovaných sítí s automatikou připínání odporníku

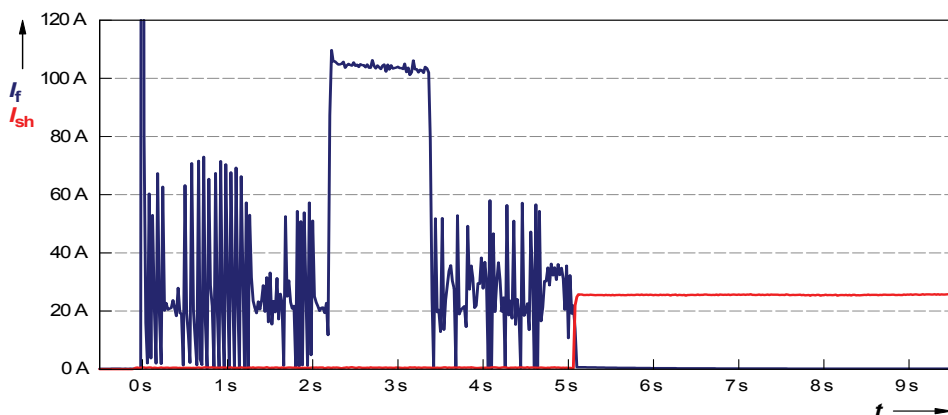
Při ideální kompenzaci protéká místem poruchy pouze zbytkový proud, který je dán fázorovým součtem svodových proudů jednotlivých fází a činného proudu tlumivky. Díky jeho malé úrovni je pro ochrany obtížné detekovat poruchu na postiženém vývodu a proto se aktivuje automatika pro připnutí pomocného odporníku, která tak zvýší činnou složku poruchového proudu. Tato automatika reprezentována v Obr. 3.32 vypínačem 2 je spouštěna v přednastaveném čase po indikaci vzniku zemního spojení, nejčastěji po překročení prahové hodnoty netočivé složky napětí a to pouze na nezbytný čas potřebný k vyhodnocení poruchy zemními ochranami (obvykle kolem 1 s). Pokud nedojde k samočinnému uhasnutí zemního spojení, dochází po úspěšné detekci postiženého vývodu k vyhledávání poruchy. Aby se eliminovalo riziko úrazu krokovým či dotykovým napětím a omezily se zejména tepelné účinky poruchového proudu na zasažené prvky sítě během doby do odstranění příčiny poruchy, využívá se v některých rozvodnách metody přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně (tzv. šentování). Při vzniku poruchy dojde po určité době k sepnutí spínače přizemnění postižené fáze, čímž vznikne paralelní cesta k poruchovému proudu. Proud se přerozdělí v poměru impedancí mezi místo poruchy a místo přizemnění postižené fáze. Jelikož je ve většině případů odpor vytvořeného vodivého spojení mnohem menší než odpor v místě poruchy, dojde k přenesení poruchového proudu z místa poruchy do místa přizemnění v napájecí rozvodně.



Obr. 3.32: Provoz kompenzované sítě s připínáním odporníku při vzniku trvalého zemního spojení

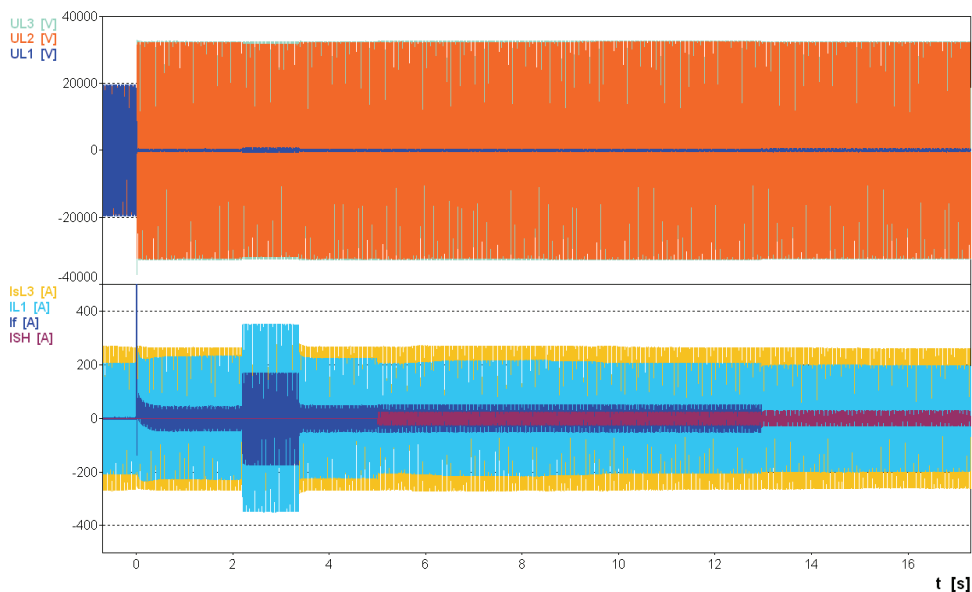
Na Obr. 3.32 je zjednodušeně naznačena napájecí rozvodna 110/22 kV vybavená automatikou připínání pomocného odporníku na výkonovém vinutí zhášecí tlumivky a automatikou přizemnění postižené fáze pro eliminaci poruchového proudu v místě zemního spojení [6]. V případě, že dojde ke vzniku trvalého zemního spojení (č. 1), dojde k navýšení hodnoty netočivého napětí nad nastavenou mez a automatika zhášecí tlumivky připne na krátkou dobu (1 s pro příklad na Obr. 3.32) v nastaveném čase (2,5 s) k výkonovému vinutí pomocný odporník (č. 2). Po detekci postiženého vývodu dojde v nastaveném čase (5 s pro příklad na Obr. 3.32) k sepnutí vypínače č. 3 a přizemnění postižené fáze přes rezistanci R_{SH} k zemnicí soustavě rozvodny.

Na Obr. 3.33 je zobrazen průběh poruchového proudu a proudu místem přizemnění postižené fáze v napájecí rozvodně během obloukového ZS v reálné kompenzované soustavě s automatikou připínání pomocného odporníku. Z obrázku je patrný pozitivní efekt šentování, díky čemuž došlo k trvalému uhasnutí oblouku v místě poruchy a poruchový proud byl přenesen do napájecí rozvodny.

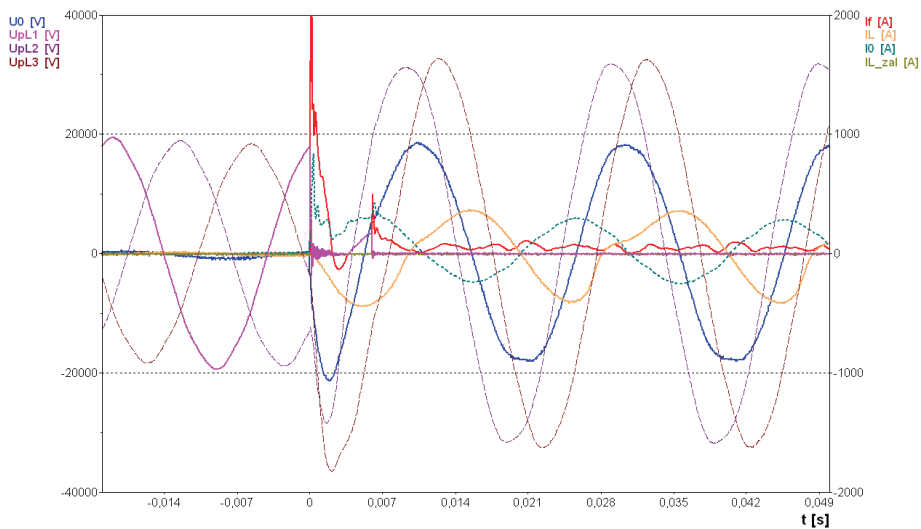


Obr. 3.33: Průběh efektivní hodnoty poruchového proudu I_f a proudu místem přizemnění postižené fáze I_{sh} během obloukového ZS v kompenzované síti

Příklad napěťových a proudových poměrů během kovového zemního spojení v reálné kompenzované distribuční soustavě 22 kV, které vzniklo spojením fáze L1 s uzemněnou kovovou konstrukcí distribuční transformační stanice (DTS), je uveden na Obr. 3.34, Obr. 3.35 a Obr. 3.36. Jelikož má většina DTS zemnicí soustavu propojenou se zemnicí soustavou sítě nn, je hodnota poruchového odporu v těchto případech zanedbatelná (R_P cca 0,02 Ω) [7]. Kapacitní proud postižené soustavy je v prezentovaném případě přibližně 300 A. Přičemž během poruchy dosahuje ustálená hodnota zbytkového (poruchového) proudu úrovně cca 20 A, která je díky vysokému obsahu násobků základní harmonické v tomto proudu poměrně vysoká (Obr. 3.36).



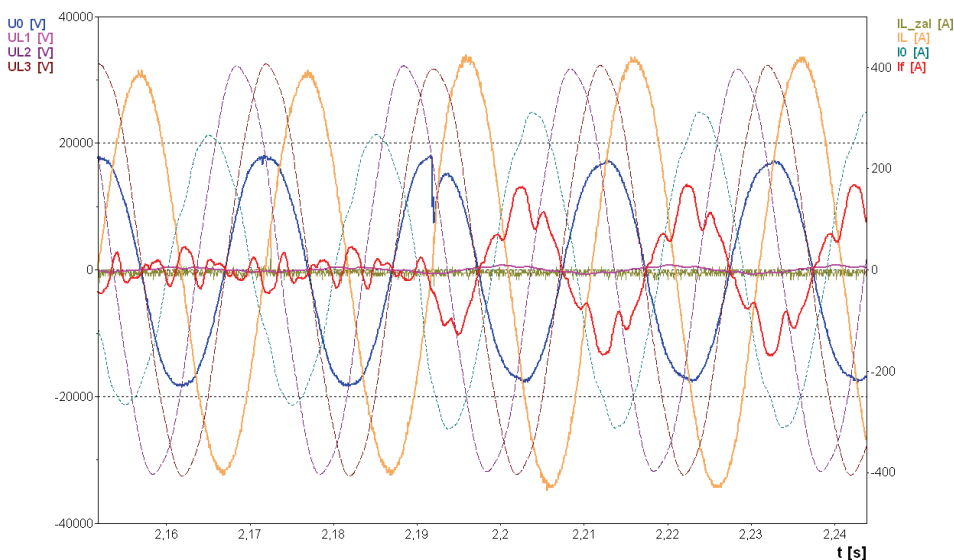
Obr. 3.34: Průběh okamžitých hodnot napětí na hladině 22kV U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} , proudu poruchou I_f , proudu šentováním I_{SH} , odběrového proudu na vývodu z napájecí rozvodny I_{L1} a odběrového proudu I_{sL3} na nn straně postižené DTS



Obr. 3.35: Průběh okamžitých hodnot napětí na hladině 22kV U_{pL1} , U_{pL2} , U_{pL3} , napětí na tlumivce (uzlového napětí) U_0 , proudu poruchou I_f , netočivé složky proudu $3xI_0$, a proudu tlumivkou I_L

Na Obr. 3.35 je zobrazen okamžik vzniku (zapálení) poruchy (čas 0 s), který se v prvním okamžiku projevil výrazným vybíjecím proudem, tento vybíjecí proud je závislý nejen na okamžité hodnotě napětí v okamžiku zapálení poruchy, ale i na odporu poruchy. V daném případě oba tyto faktory napomáhají vzniku výrazné proudové špičky poruchového proudu v jeho první periodě po vzniku poruchy.

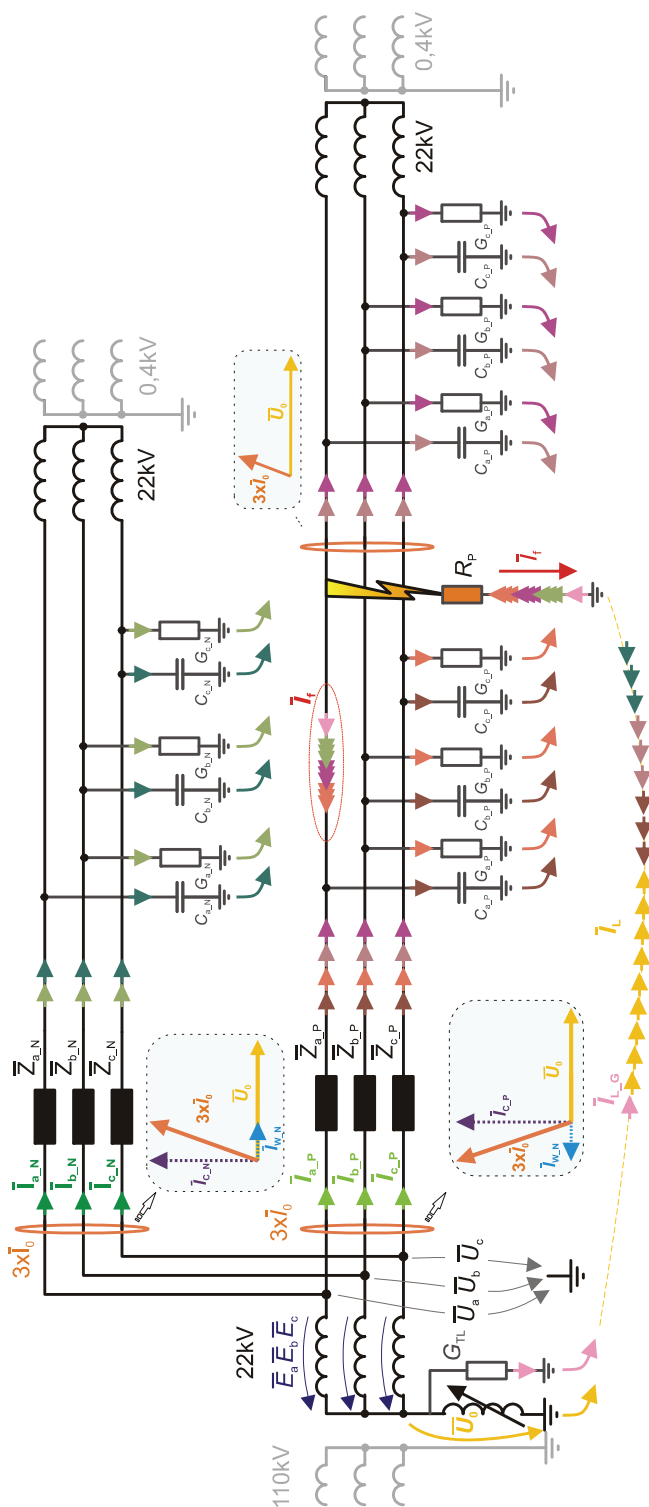
Oscilografické průběhy sledovaných veličin jsou pro okamžik připnutí pomocného odporníku (čas 2,19 s) zobrazeny na Obr. 3.36. V okamžiku připnutí pomocného odporníku je patrný výrazný nárůst činné složky poruchového proudu a mírný pokles uzlového napětí. Tento pokles netočivého napětí je závislý zejména na odporu poruchy, jak také dokazuje vztah (3.7).



Obr. 3.36: Průběh okamžitých hodnot napětí na hladině 22kV U_{L1} , U_{L2} , U_{L3} , napětí na tlumivce U_0 , proudu poruchou I_f , netočivé složky proudu I_0 a proudu tlumivkou I_L v okamžiku připnutí odporníku (2,19 s)

3.2.4 Netočivé složky proudu a napětí během zemního spojení v kompenzované soustavě

Podobně jako v kapitole 3.1.1.1 je nutné i v této části porozumět napěťovým poměrům v sítích kompenzovaných, a to zejména poměru netočivé složky proudu a napětí v jednotlivých stacionárních stavech trvalého zemního spojení, které jsou klíčové pro vyhodnocení postiženého vývodu či směru poruchy. Pro popis těchto poměrů je využito stejné části distribuční soustavy jako na Obr. 3.13 s tím rozdílem, že mezi uzel soustavy a zemnicí soustavu je vložena zhášecí tlumivka, reprezentovaná svou indukčností a vodivostí G_{TL} respektující její činné ztráty Obr. 3.37.



Obr. 3.37: Zjednodušené schéma kompenzované soustavy v případě vzniku 1pólové poruchy (zemního spojení)

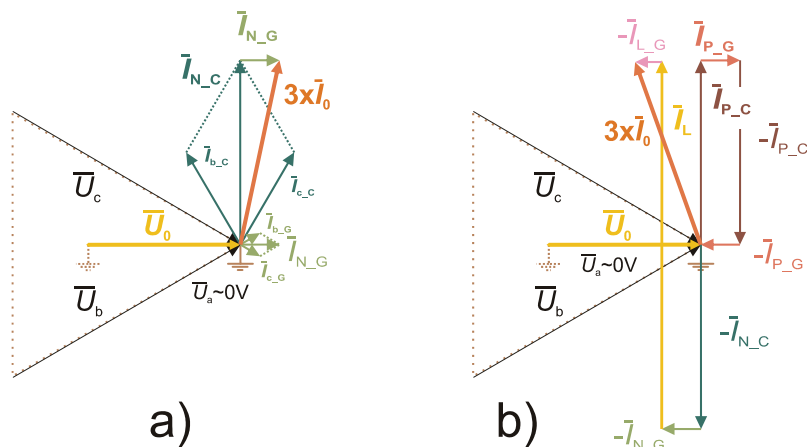
V případě bezporuchového stavu a při uvažování ideální symetrie fázových napětí v této soustavě je fázorový součet všech proudů procházejících přes příčné admitance roven nule. Vznik zemního spojení v této soustavě se projeví napětovou nesymetrií a fázorový součet svodových i kapacitních proudů již není roven nule, ale proudy poruchového. Na rozdíl od sítí izolovaných je v tomto případě celkový kapacitní proud vyvolaný nesymetrií, který prochází kapacitami jednotlivých fází systému (C_{a_N} , C_{b_N} , C_{c_N} , C_{a_P} , C_{b_P} a C_{c_P}) a místem poruchy, kompenzován kompenzačním proudem $\bar{I}_L$, pro jehož velikost platí při ideálně kompenzovaném stavu $\bar{I}_L = \bar{I}_{f_C}$. Při tomto předpokladu je poruchový proud protékající místem poruchy dán pouze činnou složkou, která je tvořena celkovým svodovým proudem soustavy. Tento proud je dán fázorovým součtem proudů procházejících přes svody (příčné konduktance) jednotlivých fází celého systému (G_{a_N} , G_{b_N} , G_{c_N} , G_{a_P} , G_{b_P} a G_{c_P}) a přes konduktanci tlumivky G_{TL} . V případě kovového zemního spojení lze svodové a kapacitní proudy postižené fáze zanedbat.

Pokud budeme měřit v napájecí rozvodně netočivou složku napětí (uzlové napětí) a součtovými transformátory proudu netočivou složku proudu ($3xI_0$) na postiženém i nepostiženém vývodu, zaznamenají se hodnoty netočivých složek v korelaci s Obr. 3.38 za předpokladu kovového zemního spojení. V případě nepostiženého vývodu, nebo v místě měření za místem poruchy ze strany od napáječe, je fázový posun zaznamenaných fázorů netočivé složky proudu a napětí menší než 90° (I. kvadrant). Tento posun závisí na poměru svodového a kapacitního proudu linky Obr. 3.38 a), zatímco u postiženého vývodu je fázový posun mezi netočivou složkou napětí a proudu větší než 90° (II. kvadrant) a závisí na poměru kapacitního proudu nepostižených linek a proudu procházejícího svody linek a vodivosti tlumivky G_{TL} , jak vyplývá z fázorových diagramů na Obr. 3.38 b).

Proudové a napěťové poměry měřitelné na nezatíženém nepostiženém vývodu z napájecí rozvodny během kovového zemního spojení ve fázi A jsou zobrazeny na Obr. 3.38 a). Tento nepostižený vývod je zatížen pouze kapacitními ($\bar{I}_{b_C}$, $\bar{I}_{c_C}$) a svodovými ($\bar{I}_{b_G}$, $\bar{I}_{c_G}$) proudy uzavírajícími se v nepostižených fázích. Jak je naznačeno na Obr. 3.38 a), tak je složka $3x\bar{I}_0$ dána fázorovým součtem celkového proudu kapacitního $\bar{I}_{N_C}$ a svodového $\bar{I}_{N_G}$, které jsou odebírány tímto vývodem. V případě měření za místem poruchy (Obr. 3.37) je hodnota $3x\bar{I}_0$ dána fázorovým součtem proudu kapacitního a svodového, která je odebírána částí vedení za místem měření. Poměry na nepostiženém vývodu nebo na úseku za poruchou se tedy neliší od sítí izolovaných.

Zásadní rozdíl je u napěťových a proudových poměrů postiženého vývodu. Podobně jako u nepostiženého vývodu je i z vývodu postiženého odebírán svodový $\bar{I}_{P_G}$ a kapacitní proud $\bar{I}_{P_C}$, jelikož dochází ke kompenzaci celkového kapacitního proudu proudem kompenzačním $\bar{I}_L$ je netočivá složka proudu $3x\bar{I}_0$ dána kapacitním proudem postiženého vývodu $\bar{I}_{P_C}$, svodovým proudem vývodů

nepostižených $\bar{I}_{N_G}$ a ztrátovým (činným) proudem tlumivky $\bar{I}_{L_G}$ měřených v opačném směru (Obr. 3.38 b).

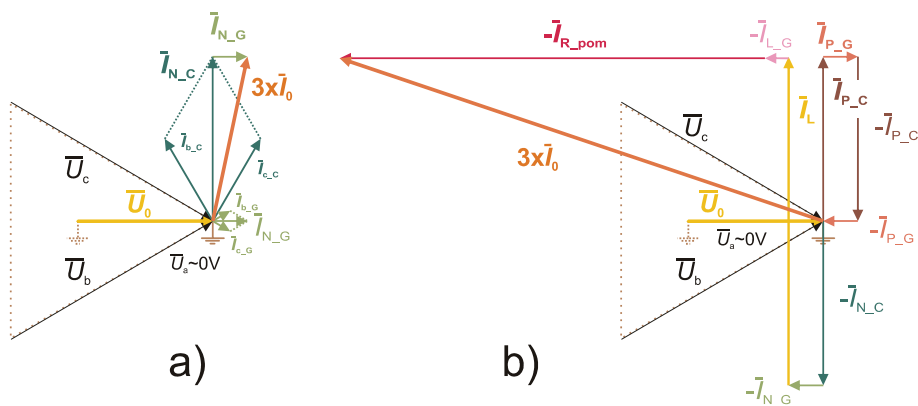


Obr. 3.38: Fázorový diagram napětíových a proudových poměrů na nepostiženém a) a postiženém b) vývodu z napájecí rozvodny během kovového ZS

Jak vyplývá z výše uvedeného je úroveň jalové složky netočivého proudu závislá na délce postiženého i nepostiženého vývodu a nelze ji proto spolehlivě využít pro indikaci postiženého vývodu. Kdežto činná složka je u postiženého vývodu závislá na svodovém proudu všech nepostižených vývodů a u nepostiženého na jeho svodovém proudu. Jelikož je z napájecí rozvodny vyvedeno více nepostižených vývodů, lze pro určení postiženého vývodu využít metody porovnání činných složek netočivého proudu.

Ustálený stav zemního spojení s připojeným pomocným odporníkem

Po připnutí pomocného odporníku jsou napětové a proudové poměry podobné jako v případě na Obr. 3.38. Zásadní rozdíl je však v úrovni jednotlivých proudů, kde díky připnutí pomocného odporníku dojde k radikálnímu navýšení činné složky poruchového proudu. Tento stav lze reprezentovat zvýšením konduktance G_{TL} (paralelní připnutí odporníku na Obr. 3.37) a tím pádem i příslušného poruchového proudu, který několikanásobně převyšuje původní reziduální proud soustavy. Na hodnotách netočivých složek proudu a napětí v nepostiženém vývodu se v případě kovové poruchy připnutí pomocného odporníku výrazně neprojeví (Obr. 3.39 a). Zásadní změna u netočivé složky proudu a napětí je však patrná na vývodu postiženém, kde se zvýší činná složka netočivého proudu o proud $\bar{I}_{R_pom}$, který je v protifázi s netočivou složkou napětí, jak je naznačeno na Obr. 3.39 b). Právě toto navýšení činné složky netočivého proudu (činného netočivého výkonu) je klíčové pro vyhodnocení poruchy zemními ochranami.



Obr. 3.39: Fázorový diagram napětíových a proudových poměrů na nepostiženém a) a postiženém b) vývodu z napájecí rozvodny během kovového ZS s připnutým pomocným odporníkem

Pokud bude bráno v úvahu odporové ZS, dojde vlivem navýšení poruchového proudu k navýšení úbytku napětí na odporu poruchy i na impedanci vedení. Napětí postižené fáze tím klesne a vzrostou napětí fází nepostižených. V důsledku toho se změní i netočivá složka napětí. Tato změna napětíových poměrů se dále projeví v přerozdělení jednotlivých svodových proudů, kdy dojde k navýšení svodového proudu postižené fáze a k poklesu svodových proudů nepostižených fází.

3.2.5 Lokalizace poruchy v kompenzovaných a izolovaných soustavách

Pro lokalizaci zemního spojení se v současnosti nejčastěji používají zařízení, která jsou založena na metodách uvedených v této kapitole. Veškeré doposud používané metody lze rozdělit do dvou základních skupin, na metody pasivní a aktivní. Aktivní metody využívají k lokalizaci zemního spojení pomocného signálu se specifickou frekvencí, který je injektován do soustavy v případě poruchy a následným „stopováním“ tohoto signálu dojde k lokalizaci poruchy. Vzhledem k tomu, že tyto aktivní metody nejsou zejména díky své technické náročnosti tak rozšířeny jako metody pasivní, bude tato kapitola zaměřena zejména na pasivní metody, které využívají napětíových a proudových signálů generovaných přímo sledovanou poruchou (zemním spojením) a nepotřebují tedy ke své funkci žádné uměle injektované signály.

Pasivní metody vychází z monitorování napětíových a proudových poměrů v postižené soustavě bez nutnosti použití jiného „pomocného“ zdroje signálu. Parametry napětí a proudů mohou být vyhodnocovány během přechodného děje při zemním spojení nebo po jeho odeznění, proto lze tyto pasivní metody rozčlenit dále na metody statické, využívající ustáleného signálu (po odeznění přechodného děje), dále na metody dynamické využívající signál během přechodového děje a na metody vyhodnocující signál v ustáleném stavu, které jsou pro selektivní působení napojeny na řídicí a pomocné obvody zhašecí tlumivky.

3.2.5.1 Statické metody

Jsou metody využívající pro vyhodnocení místa poruchy ustáleného signálu zaznamenaného až po odeznění přechodného děje, v některých případech se pro zvýšení selektivity vyhodnocují i údaje před vznikem poruchy [6]. Dosud nejužívanější statické metody jsou:

a) Metody vhodné pro izolované distribuční soustavy

Porovnávání amplitudy netočivé složky proudu

Metoda vyhodnocuje amplitudy netočivých složek proudů v jednotlivých vývodech. Je-li vlivem poruchy překročena přednastavená hodnota netočivého napětí, začnou se porovnávat amplitudy netočivých složek proudů jednotlivých vývodů. Jako postižené vedení je poté označeno to, u kterého je amplituda maximální. Nevýhodou této metody je její nízká citlivost a nutnost velmi přesného měření netočivé složky proudu obzvláště v případech, kdy se kapacita postiženého vývodu blíží celkové kapacitě soustavy (délka postiženého vedení značně převyšuje délku ostatních vedení) nebo při vysoko-impedančních zemních spojeních.

Porovnávání fáze netočivé složky proudu

Metoda porovnává fáze netočivých složek proudů jednotlivých vývodů. U vývodu se zemním spojením je fáze netočivé složky proudu oproti zbylým (nepostiženým) vývodům opačná. Obsahuje-li síť velmi krátká vedení (malá netočivá složka proudu), je citlivost metody velmi nízká a může dojít i k chybné lokalizaci. Korektní vyhodnocení také komplikuje proudová nesymetrie nebo vysoko-impedanční zemní spojení.

Přesnost lokalizace zemního spojení se zvýší kombinací těchto dvou výše uvedených metod. V první fázi se vyberou vývody s nejvyšší amplitudou netočivé složky proudu, u těchto vývodů se poté provede porovnání fáze netočivé složky proudu. Vývod, který má opačnou fázi netočivé složky proudu, je označen jako postižený. Budou-li mít všechny vývody stejnou fázi, došlo k poruše v rozvodně. Dojde-li k vysoko-impedančnímu zemnímu spojení v soustavě, která obsahuje vedení krátkých délek, není ani tato kombinace metod stoprocentně funkční a může tak dojít k chybnému označení postiženého vývodu.

Určení toku netočivé složky jalového výkonu

U postiženého vývodu předbíhá netočivá složka napětí netočivou složku proudu o 90° , u nepostiženého vývodu se netočivá složka napětí opoždí o 90° oproti proudu. Tato metoda vyhodnocuje tok jalového výkonu, respektive jeho znaménka. Je-li znaménko jalového výkonu na vývodu záporné, označí se vývod jako postižený a naopak, je-li znaménko jalového výkonu kladné, je vývod nepostižený. Výhodou proto je, že není nutné výkon porovnávat s ostatními vývody, ale problém se správnou lokalizací u poruch s malým netočivým proudem přetrvává.

Metoda maximální změny jalové složky netočivého proudu

V bezporuchovém stavu se pro jednotlivé vývody vybere referenční signál netočivé složky proudu společně s fázovým posunem netočivé složky napětí a po vzniku zemního spojení se vyhodnotí jejich změna. Postižený vývod je ten, u něhož byla změna jalové složky netočivého proudu maximální. Tento postup omezuje vliv nesymetrie na selektivitu metody.

Všech čtyř výše zmiňovaných pasivních metod se využívá v izolovaných soustavách, ale díky kompenzaci kapacitního proudu je nelze použít v soustavách kompenzovaných. Tuto společnou nevýhodu odstraňují následující metody.

b) Metody vhodné pro kompenzované distribuční soustavy

Metoda detekce činné složky netočivého proudu (Wattmetrická metoda)

Jelikož nelze zcela vykompenzovat poruchový proud (vždy přetrvává zbytkový proud činného charakteru), lze pro lokalizaci poruchy v kompenzovaných sítích využít směru právě tohoto reziduálního proudu. U postiženého vývodu je činná složka netočivého proudu popřípadě činný výkon netočivé složky vyšší a má opačný směr než u ostatních nepostižených vývodů. Zásadní vliv na správnou funkci metody mají vhodně navržené měřicí proudové transformátory a velikost činné složky netočivého proudu. Právě rozdílné chyby fáze a úhlu použitých PTP vzhledem k nízké úrovni reziduálního proudu (3 % – 10 % kapacitního proudu sítě) mohou zapříčinit neselektivní působení metody. Pro zvýšení úrovně činné složky netočivého proudu a tedy pro zvýšení citlivosti zemních ochran se nejen v České republice využívá krátkodobého připnutí pomocného odporu. Příklad charakteristiky detekující činnou složku netočivého proudu je zobrazen na Obr. 3.40. Jelikož se distribuční soustava běžně nemusí provozovat zcela vykompenzovaná, ale může být mírně rozladěná, má netočivá složka proudu fázový posun dle charakteru provozu systému, jak je naznačeno na tomto obrázku.

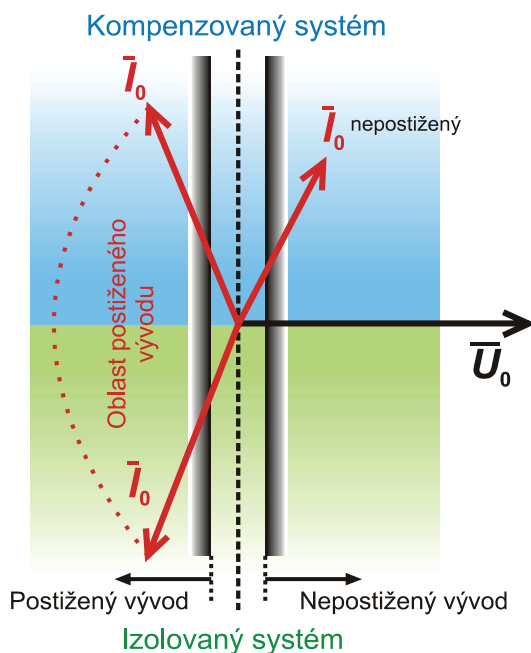
Admitanční metoda netočivé složky

Metoda je založena na nepřetržitém monitoringu netočivé složky proudu $\bar{I}_0$ a napětí $\bar{U}_0$, kde se při překročení přednastavené hodnoty netočivé složky napětí provede výpočet admitance dle vztahu

$$\bar{Y}_0 = \frac{\bar{I}_0}{-\bar{U}_0}. \quad (3.50)$$

Aby se omezilo selhání metody vlivem nesymetrie systému, používá se častěji pro vyhodnocení admitance přírůstkové metody. V tomto případě je admitance vyčíslena z poměru přírůstku netočivého proudu a napětí mezi stavem před poruchou (prefault) a při poruše (fault) jak uvádí [8]

$$\bar{Y}_0 = \frac{(\bar{I}_{0_fault} - \bar{I}_{0_prefault})}{-(\bar{U}_{0_fault} - \bar{U}_{0_prefault})} = \frac{\Delta \bar{I}_0}{-\Delta \bar{U}_0}. \quad (3.51)$$



Obr. 3.40: Příklad charakteristiky wattmetrického článku

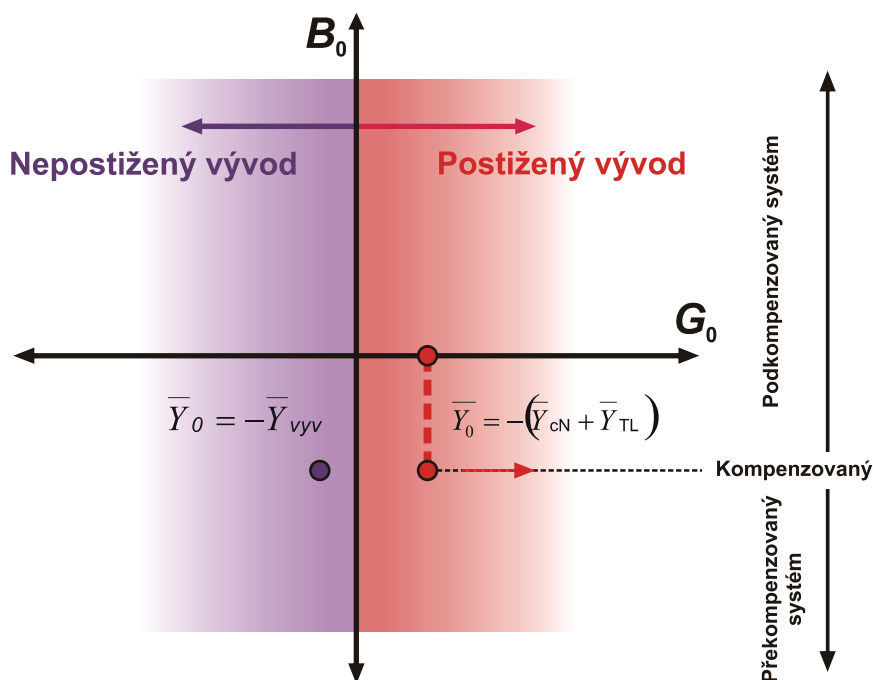
V případě nepostiženého vývodu je výsledná admitance rovna celkové admitanci chráněného vývodu $\bar{Y}_{vyv}$ a má v daném případě záporné znaménko

$$\bar{Y}_0 = -\bar{Y}_{vyv} = -(G_{vyv} + jB_{vyv}). \quad (3.52)$$

V praxi díky malým úrovním složek $\bar{I}_0$ a $\bar{U}_0$, a tedy nepřesnosti při výpočtu výsledné admitance však může mít vypočtená konduktance G_{vyv} i kladné znaménko. Podobně i vypočtená susceptance B_{vyv} může dosahovat kladné hodnoty vlivem chyby měření nebo v případě decentrální kompenzace či při provozu systému v podkompenzovaném stavu. Proto pro korektní vyhodnocení je velmi důležitá správná volba provozní charakteristiky. Vzorec (3.53) vyjadřuje stav, který indikuje postižený vývod. V tomto případě je výsledná admitance rovna součtu celkové admitance nepostižených vývodů $\bar{Y}_{cN}$ a admitance zhašecí tlumivky $\bar{Y}_{TL}$

$$\bar{Y}_0 = -(\bar{Y}_{cN} + \bar{Y}_{TL}). \quad (3.53)$$

Výsledná netočivá konduktance vycházející ze vzorce (3.53) má v praktických případech kladné znaménko, kdežto znaménko susceptance je v tomto případě závislé na stupni kompenzace soustavy. Způsob funkce této admitanční metody je nastíněn na Obr. 3.41.



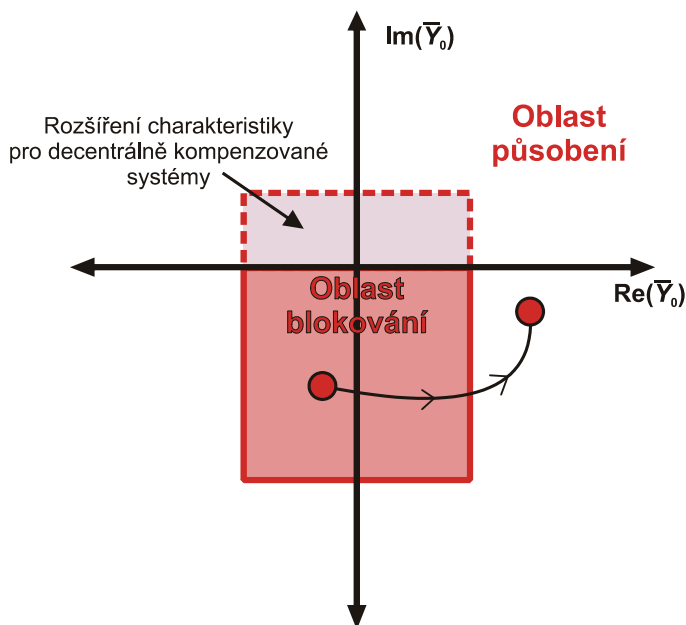
Obr. 3.41: Příklad charakteristiky wattmetrického článku

Zařízení užívající admitanční metody pro lokalizaci poruchy využívají podobné pracovní charakteristiky jako distanční ochrany. Zásadní rozdíl mezi admitanční a distanční ochranou je v tom, že pokud je vypočtená admittance uvnitř admitanční charakteristiky, jedná se o nepostižený vývod (nepostižený úsek) a popud je blokován, pokud se admittance dostane vně pracovní charakteristiku (dojde k překročení hranice) dojde k popudu a vývod je označen jako postižený, tuto funkci znázorňuje Obr. 3.42.

Na základě experimentálních měření byla prokázána korektní funkce admitanční metody v kombinaci s automatikou připínání pomocného odporu během ZS s odporem poruchy až do 7,5 kΩ.

Admitanční metoda využívající násobky základní harmonické

Pro zvýšení citlivosti admitanční metody lze při vyhodnocení netočivé složky proudu a napětí využívat násobků základní harmonické, a to zejména 5. harmonické, která je většinou nejvíce zastoupena v poruchovém (kapacitním) proudu a není kompenzována zhášecí tlumivkou. Při aplikaci této metody se provede výpočet a vyhodnocení admittance pouze pro tuto frekvenční složku, kdy se systém chová jako nekompenzovaný. V některých případech lze využít pro vyhodnocení sumace vypočtených admittancí základní harmonické a ostatních frekvenčních složek, které jsou výrazně zastoupeny v poruchovém proudu - 3., 5. a 7. harmonické.



Obr. 3.42: Příklad pracovní charakteristiky admitanční metody

Admitanční metoda v okružní síti

Principu admitanční metody lze využít také v případě sítí, které se provozují nebo je lze provozovat jako okružní. U sítí, které jsou v bezporuchovém stavu provozovány jako radiální, je nutné po vzniku zemního spojení síť „zkruhovat“ a sledovat přerozdělení netočivé složky proudu. V tomto případě se netočivá složka proudu vlivem vytvořené smyčky přerozdělí mezi obě paralelní větve dle jejich impedancí (admitancí), na základě čehož lze definovat místo poruchy. Zvýšení citlivosti této metody lze dosáhnout archivací vystopovaných ZS s příslušnými poměry admitancí. V případě vzniku ZS se pak porucha lokalizuje v místě s podobným poměrem zaznamenané admitance. U sítí, které jsou v bezporuchovém stavu provozovány jako okružní, dojde po vzniku zemního spojení ke krátkodobému připojení pomocné kapacity k výkonovému vinutí zhášecí tlumivky. Pro určení místa poruchy se během této operace monitoruje změna netočivé složky proudu před a po připojení této kapacity a na základě přerozdělení přírůstku netočivé složky proudu se definuje místo poruchy.

Konduktanční metoda

Metoda vychází z podobného principu, který byl popsán u admitanční metody. Zásadní rozdíl je v detekci směru poruchy, kde v tomto případě se vyhodnocuje pouze konduktance vypočtená z netočivé složky proudu a napětí [9]

$$\text{pro postižený vývod } G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = -(G_{cN} + G_{TL}) \quad (3.54)$$

$$\text{a pro nepostižený vývod } G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\bar{I}_0}{\bar{U}_0} \right] = (G_{\text{vyv}}), \quad (3.55)$$

kde G_{vyv} je netočivá konduktance chráněné linky, G_{cN} je netočivá konduktance respektující svod zbývajících nepostižených linek, G_{TL} je netočivá konduktance odpovídající ekvivalentu zhášecí tlumivky, $\bar{I}_0$ a $\bar{U}_0$ jsou fázory naměřených netočivých složek proudu a napětí na daném vývodu.

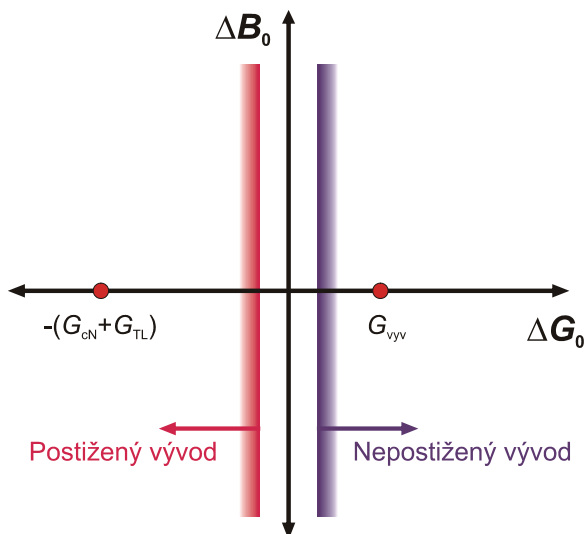
Konduktanční metoda s měřením přírůstku

Výhoda této metody je ve vyhodnocování změny (přírůstku) netočivé složky proudu $\Delta \bar{I}_0$ a napětí $\Delta \bar{U}_0$ mezi stavem před a po vzniku poruchy, čímž odpadají problémy způsobené vlivem nesymetrie systému a chybou měření PTP. Metodika výpočtu konduktance z hodnot těchto přírůstků je obdobná jako u konduktanční metody, kde postižený a nepostižený vývod je vyjádřen vztahy:

$$\text{pro postižený vývod } \Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = -(G_{\text{TL}} + G_{\text{cN}}) \quad (3.56)$$

$$\text{a pro nepostižený vývod } \Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = (G_{\text{vyv}}). \quad (3.57)$$

Pro určení směru poruchy porovnává metoda přírůstky konduktance ΔG_0 (reálnou část poměru přírůstku netočivého proudu k přírůstku netočivého napětí) s kladnou a zápornou prahovou hodnotou, jak ukazuje Obr. 3.43.



Obr. 3.43: Pracovní charakteristika přírůstkového konduktančního článku

Dobré výsledky tato metoda dosahuje zejména v kombinaci s automatikou připínání pomocného odporníku. Velkou výhodou je v tomto případě selektivní nastavení popudové hodnoty konduktance postiženého vývodu pro dobrou citlivost a spolehlivost konduktančních ochrann. V případě kombinace automatiky připínání pomocného odporníku s konduktanční ochranou je nastavena jedna popudová (prahová) hodnota konduktance, a to dle konduktance zvoleného pomocného odporníku G_{Rp} . Jak bylo popsáno dříve, v případě připnutí pomocného odporníku vzroste naměřená netočivá konduktance postiženého vývodu nad hodnotu, která je rovna minimálně konduktanci pomocného odporníku. Pro postižený vývod tedy bude platit

$$\Delta G_0 = \operatorname{Re} \left[\frac{\Delta \bar{I}_0}{\Delta \bar{U}_0} \right] = -(G_{TL} + G_{Rp} + G_{cN}) \cong -G_{Rp}, \quad (3.58)$$

$$|G_{Rp}| \gg |G_{vyv}|.$$

U nás běžně rozšířené konduktanční ochrany pracují ve spolupráci s automatikou pomocného odporníku, kdy během času připnutí odporníku vyhodnocují absolutní hodnotu konduktance postiženého vývodu.

Metoda vyšších harmonických

Hlavní význam zhašecí tlumivky v neúčinně uzemněných sítích je kompenzace základní harmonické poruchového (zemního) proudu, avšak díky nelineárním spotřebičům obsahuje kapacitní (poruchový) proud také násobky základní harmonické, které nejsou kompenzovány. Úroveň těchto harmonických zejména řádu 3., 5. a 7. je převážně v městských distribučních sítích značně vysoká a v mnoha případech jejich součet převyšuje úroveň základní harmonické zbytkového (reziduálního) proudu. Právě této „nedokonalé“ kompenzace kapacitního proudu využívá metoda vyšších harmonických k indikaci poruchy. Metoda využívá detekce těchto řádů harmonické (nejčastěji 3., 5. a 7.) a vyhodnocuje signály dané jejich sumací, čímž se dosáhne maximální citlivosti. Jako postižený je indikován vývod s maximální úrovní tohoto signálu. V některých případech je sledovanou veličinou pouze 5. harmonická (metoda páté harmonické), kde se vyhodnocuje nejen úroveň tohoto signálu, ale i jeho fáze. Postižený vývod má pak maximální úroveň této složky a opačnou fázi vůči ostatním (nepostiženým) vývodům. Přesnost metody je závislá zejména na přesnosti měření, provedené frekvenční analýze a také na úrovni těchto složek ve sledované soustavě. Podobného principu se využívá i u metod založených na vyhodnocování signálu HDO.

Citlivost všech výše zmiňovaných metod vycházejících z vyhodnocení signálů až po ustálení přechodového děje není zpravidla tak velká, jako v případě metod využívajících přechodného děje. Zásadní vliv na tento fakt má zhašecí tlumivka, která v ideálních případech zcela kompenzuje kapacitní zemní proud vyvolaný zemním spojením. Proto se může stát, že v některých případech je změřená netočivá složka proudu u nepostiženého vývodu vyšší, než netočivá složka proudu postiženého vývodu, což vede k chybné lokalizaci a špatné účinnosti metody. Právě díky schopnosti detekovat i krátkodobá zemní spojení a dobré citlivosti došlo

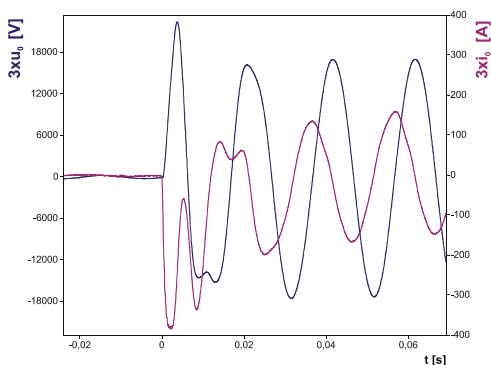
v poslední době k velkému rozšíření dynamických metod a to zejména v oblasti indikátorů poruch umožňujících lokalizovat směr poruchy uvnitř distribučních sítí.

3.2.5.2 Dynamické metody

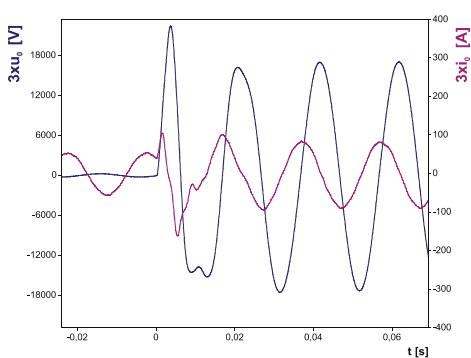
Tato kategorie metod využívá pro vyhodnocení a lokalizaci směru poruchy transientního jevu, který je iniciován vznikem zemního spojení. Tyto metody jsou rozšířeny zejména v kompenzovaných sítích, kde nahrazují díky vyšší citlivosti metody statické, avšak jejich zásadní nevýhodou je oproti metodám statickým ve většině případů pouze jeden pokus pro korektní lokalizaci poruchy.

Metoda první půl-periody

Bezprostředně po vzniku zemního spojení dojde vlivem kapacit jednotlivých vývodů ke krátkému intenzivnímu přechodovému ději, během kterého dojde k vybití kapacity postižené fáze a nabití nepostižených fází v celé soustavě. Výsledkem těchto jevů je krátký vybíjecí proud, jehož trvání se pohybuje v řádech desítek milisekund (ve většině případů odeznívá během první půlperiody po vzniku poruchy). Právě popisovaná metoda vyhodnocuje tento přechodový jev odrážející se v netočivých složkách napětí a proudu. Metoda tedy porovnává oscilografické průběhy netočivých složek bezprostředně po vzniku poruchy. Jako nepostižený vývod či poruchu před místem měření (ve směru od napáječe) označí metoda stav, kdy je během první půl-periody od vzniku zemního spojení netočivá složka proudu a napětí ve fázi Obr. 3.45. Naopak jako postižený vývod nebo poruchu za místem měření (ve směru od napáječe) se označí ta část, kde je naměřená složka netočivého proudu a napětí v protifázi Obr. 3.44. Výhodou této metody je její využití v kompenzovaných neúčinně uzemněných sítích, kde dobře lokalizuje i oblouková zemní spojení. Její nevýhodou je krátký časový interval pro korektní vyhodnocení či nemožnost lokalizace vysokoimpedanční poruchy, která potlačuje zmiňovaný transientní jev. Na Obr. 3.44 a Obr. 3.45 je zobrazen záznam transientního jevu během vzniku zemního spojení, kde je patrné vyhodnocení postiženého a nepostiženého úseku.



Obr. 3.44: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při ZS na postiženém vedení



Obr. 3.45: Oscilografický průběh netočivé složky proudu a napětí při ZS na nepostiženém vedení

Metoda qu - diagramu

Tato metoda vyhodnocuje grafickou závislost netočivé složky proudu (představující náboj q_0) na netočivé složce napětí [10]. V případě nepostiženého vedení lze vybíjecí proces popsat rovnicemi

$$\begin{aligned} u_0(t) &= u_0(t_0) + \frac{1}{C_{eq}} \int_{t_0}^t i_0(\tau) d\tau, \\ u_0(t) &= u_0(t_0) + \frac{q_0(t)}{C_{eq}}, \end{aligned} \quad (3.59)$$

kde t_0 je čas vzniku zemního spojení, C_{eq} je ekvivalentní kapacita mezi vodičem a zemí všech nepostižených vedení v celé síti a i_0 je okamžitá hodnota netočivé složky proudu procházející monitorovaným nepostiženým vedením.

Předpokládá-li se, že v momentě vzniku zemního spojení je okamžitá hodnota netočivé složky napětí rovna nule, pak výsledkem rovnice (3.59) je, že závislost integrálu netočivé složky proudu na netočivé složce napětí je ovlivněna pouze ekvivalentní kapacitou C_{eq} , která je v krátkém časovém intervalu konstantní. Výsledná závislost netočivé složky napětí na netočivé složce náboje (q_0) v případě nepostiženého vedení je následující

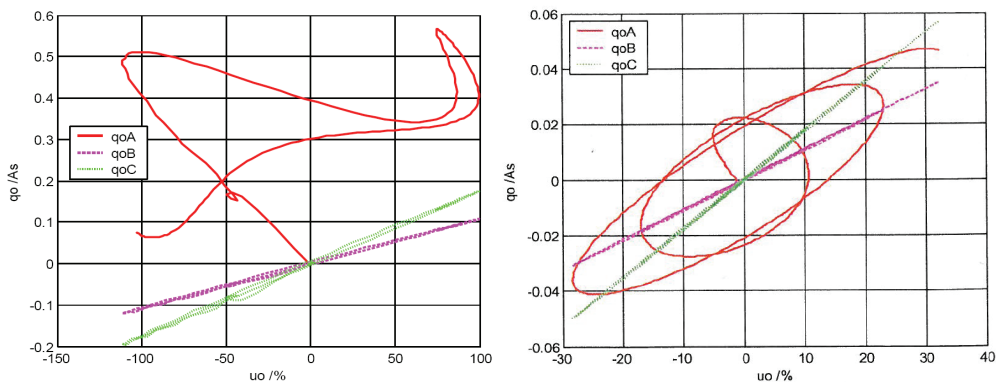
$$u_0(t) = \frac{q_0(t)}{C_{eq}}. \quad (3.60)$$

Z této rovnice vyplývá, že výsledkem grafického zobrazení (qu - diagram) této závislosti je přímka s gradientem C_{eq} (lineární závislost).

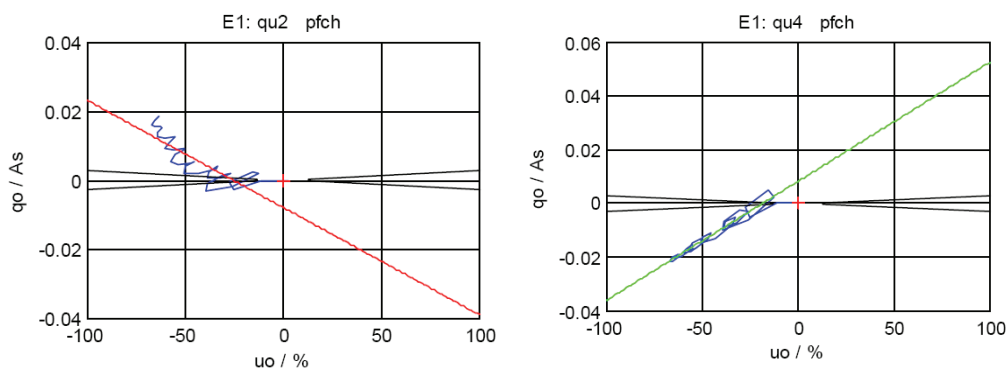
V případě postiženého vedení nebude závislost definovaná vztahem (3.60) platná, jelikož má vybíjecí proud postiženého vývodu opačný směr než je tomu u vývodů nepostižených. V tomto případě bude začínat qu – diagram s opačným gradientem a u kompenzovaných sítí (vlivem zhášecí tlumivky) nebude tato závislost lineární. Příklad qu – diagramu pro postižené i nepostižené vývody je zobrazen na Obr. 3.46.

Metoda qu2 - diagramu

Jedná se o zdokonalenou metodu qu - diagramu, která pro zvýšení citlivosti filtruje část netočivé složky proudu a napětí, která je způsobena nesymetrií systému či nelinearitou zátěží. Úkolem tohoto filtru je zjednodušeně řečeno odstranění (odfiltrování) celého frekvenčního spektra netočivé složky napětí a proudu obsaženého v bezporuchovém stavu od celého záznamu tak, aby bylo možné vyhodnocovat průběhy netočivých složek vyvolaných pouze nesymetrií poruchy. Díky tomuto adaptivnímu filtrování pak nedochází ke zkreslování výsledné qu2 charakteristiky a lze proto snadněji určit její gradient - viz Obr. 3.47.



Obr. 3.46: Příklad q_u – diagramu tří vývodů v případě nízkoodporové poruchy na vývodu q_oA (q_oB a q_oC nepostižené)



Obr. 3.47: q_u2 – diagram s korektní identifikací postiženého vývodu q_u2 a nepostiženého vývodu q_u4

Vyhodnocení částečných výbojů pro detekci poruchy

Nová metoda zaměřená zejména na indikaci poruchy uvnitř izolovaných vysokonapěťových vodičů venkovních vedení, kde je problém s detekcí zemního spojení vzhledem k dobrým izolačním vlastnostem závěsného vodiče obzvláště obtížný, je popsána v [11]. Pro detekci poruchy využívá tato metoda monitoringu impulzních složek signálů částečných výbojů vznikajících na povrchu zasaženého vodiče. Vhodnou filtrací monitorovaného signálu tak lze rozeznat jednopólové poruchy typu pádu vodiče na zem, případně poškození vodiče pádem stromu či větve stromu na povrch vodiče.

3.2.6 Základní prostředky pro lokalizaci poruchy

V této kapitole jsou stručně uvedeny dosud využívané prostředky napomáhající k lokalizaci poruchy. Vzhledem k technickým možnostem je nutné

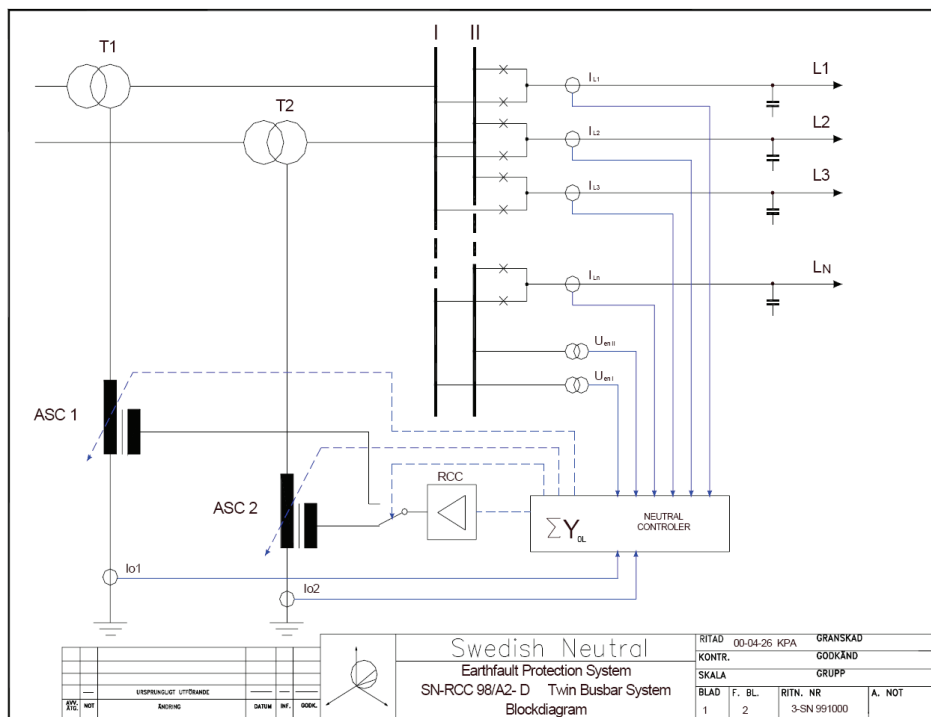
rozlišit prostředky pro indikaci postiženého vývodu z napájecí rozvodny a prostředky schopné dohledat přímo místo poruchy uvnitř celé distribuční soustavy. Na rozdíl od velmi problematické a technicky náročné lokalizace místa poruchy, je indikace postiženého vývodu poměrně spolehlivá.

3.2.6.1 Indikace postiženého vývodu

Vzhledem k zásadní nevýhodě dynamických metod, která spočívá ve vyhodnocení poruchy pouze v krátkém časovém okamžiku a dodatečné (opakované) vyhodnocení již není možné, jsou pro zařízení lokalizující postižený vývod využívány zejména metody statické. U nich lze cyklus vyhodnocení opakovat do doby, než dojde k jednoznačnému určení postiženého vývodu. Jedním z nejstarších prostředků pro detekci postiženého vývodu, který je v některých případech či zemích stále používán, je postupné odpínání vývodů z rozvodny až do doby, kdy dojde k odpojení poruchy. Tento způsob je zcela spolehlivý, ale vyžaduje složité provozní manipulace či krátkodobé přerušení dodávky v postižené distribuční síti. Díky svým nevýhodám byl tento systém nahrazen zemními dnes již převážně digitálními ochranami, které vyhodnocují netočivé složky proudu a napětí a využívají pro identifikaci postiženého vývodu některé z výše uvedených statických metod (wattové či jalové relé, admitanční i konduktanční ochrany apod.). Díky možnostem pro nastavení téměř jakéhokoli tvaru pracovní charakteristiky těchto digitálních ochran se docílilo citlivého a spolehlivého působení oproti dříve používaným elektromechanickým ochranám. V poslední době také došlo k rozšíření automatik, které v sobě zahrnují jak prostředek pro detekci postiženého vývodu, tak pro kompenzaci poruchového proudu a i následnou lokalizaci místa poruchy. Příkladem této automatiky je systém RCC (Residual Current Compensation) vyvinutý firmou SWEDISH NEUTRAL [12]. Schematicky je tato automatika pro dvojitý systém přípojníc naznačena na Obr. 3.48. V popisovaném příkladu systém RCC provádí ladění dvou paralelně pracujících zhášecích tlumivek připojených na dvojitý systém přípojníc. Do centrální řídicí jednotky (neutral controler) jsou vyústěna měření netočivých složek proudů všech vývodů a také netočivé složky napětí obou systémů přípojníc (I a II). Tato automatika pracuje na principu admitanční metody, kdy během bezporuchového stavu spočítá celkové admitance všech vývodů a porovnává je s jejich admitancí po vzniku poruchy. Pomocí této metody je označen vývod se změněnou admitancí jako postižený a ostatní vývody, bez změny admitance jako nepostižené. V dalším kroku, po označení postiženého vývodu, automatika ihned provádí dokompenzování (neutralizaci) poruchového proudu. Zhášecí tlumivka je při tomto procesu automatikou laděna do doby, než se admitance postiženého vývodu dostane na úroveň admitance před poruchou, čímž dojde k minimalizaci reziduálního proudu a často díky jeho velmi nízké úrovni k uhasnutí oblouku poruchy.

Systém RCC je vybaven také funkcí pro lokalizaci poruchy, tato funkce však vyžaduje zapojení postiženého vývodu do kruhu s vývodem nepostiženým. Ke zjištění místa poruchy využívá systém přerozdělení netočivé složky proudu vlivem „zkruhování“ vývodů a z poměru admitancí obou vývodů vypočte místo poruchy. Jelikož ve většině oblastí nelze tohoto principu využít, protože nelze

jednoduše (dálkově) provést „zkruhování“ postiženého vývodu, využívá se pro lokalizaci poruchy jiných prostředků.



Obr. 3.48: Systém RCC (Swedish Neutral) pro dvojitý systém přípojníc [12]

3.2.6.2 Lokalizace poruchy

Základním krokem k rychlé lokalizaci poruchy je úspěšná identifikace postiženého vývodu na základě výše popsaných prostředků. Veškeré další operace a vyhodnocení jsou pak zaměřeny pouze na tento postižený vývod.

Odpínání úseků postiženého vývodu

Obdobně jak je popsáno v předcházející kapitole, tak jedním z nejdéle užívaných a nejefektivnějších prostředků, které se dodnes využívají pro lokalizaci poruchy, nebo spíše postiženého úseku vedení, je postupné odpínání jednotlivých úseků či odboček postiženého vývodu do doby, než dojde k vypnutí (odpojení) poruchy. Tímto postupem lze vymezit oblast s poruchou, kam je posléze povolána technická obsluha. Jelikož dosud neexistuje adekvátní náhrada za tuto metodu, která by dokázala jednoznačně vymezit poruchu uvnitř postižené soustavy, je tato metoda v našich podmínkách nejrozšířenější a nejužívanější. Avšak vzhledem k velmi dispečersky náročným operacím, které si tato metoda vyžaduje a k časté nutnosti přerušení dodávky elektrické energie, je snaha tuto metodu postupně nahrazovat sofistikovanějšími metodami.

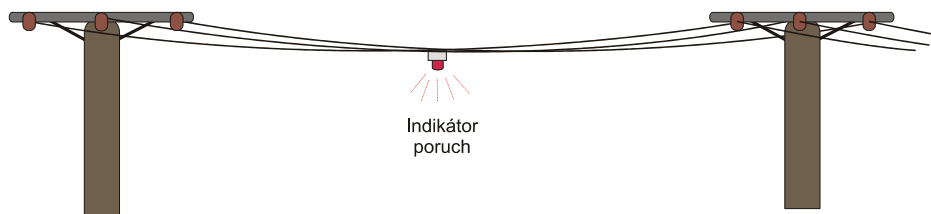
Spojování postiženého vývodu do kruhu

Operativně jednodušším prostředkem pro lokalizaci poruchy je spojení postiženého a nepostiženého vývodu do kruhu, kde se na základě přerozdělení netočivé složky proudu provede výpočet místa poruchy. Avšak propojení postiženého a nepostiženého vedení vycházejícího ze stejné přípojnice napájecí rozvodny do kruhu není vždy možné. Další problémem, který zamezuje širšímu využití této metody je homogenita parametrů vedení, kde díky velké členitosti úseků vedení s rozdílnými parametry a konfigurací je jen velmi obtížné a někdy i nemožné vytvořit korektní model vedení nutný pro lokalizaci poruchy. Přesnou lokalizaci v členitých distribučních sítích dále ztěžuje i nestálost parametrů jednotlivých prvků vlivem povětrnostních vlivů a ročního období. Nedokonalosti zmíněných metod pro lokalizaci zemního spojení v sítích kompenzovaných proto vedly k vývoji v oblasti zabývající se indikátory poruch.

Indikátory poruch pro venkovní vedení

Indikátory poruch jsou zařízení, která umožňují na základě monitoringu napěťových a proudových poměrů indikovat směr poruchy. Pro tuto indikaci využívají charakteristických změn monitorovaného signálu, nejčastěji netočivé složky proudu a napětí či napěťových a proudových poměrů fázových vodičů. V těchto indikátorech jsou implementovány algoritmy vycházející z doposud známých metod dynamických i statických, kde se pro zvýšení citlivosti využívá i jejich kombinací. Konstrukce indikátoru poruch a volba využívaných metod je pro každou zemi specifická, odpovídá místním podmínkám provozu vn sítě a spadá do know-how výrobce. Nejrozšířenější a také nejvíce užívané jsou indikátory monitorující elektrické a magnetické pole chráněného vedení. Díky své konstrukci umožňují snadnou instalaci v libovolném místě monitorované sítě bez přerušení dodávky elektrické energie a je možno je rozmisťovat přímo do nejvíce poruchových oblastí bez výrazného technického omezení. Tento fakt vedl k velkému pokroku ve vývoji indikátorů poruch a ke vzniku několika konstrukčně odlišných typů se specifickými možnostmi nasazení. Podle počtu senzorů lze indikátory poruch rozčlenit do dvou základních kategorií, a to na indikátory snímající celkové elektrické a magnetické pole a indikátory snímající elektrické a magnetické pole jednotlivých fází.

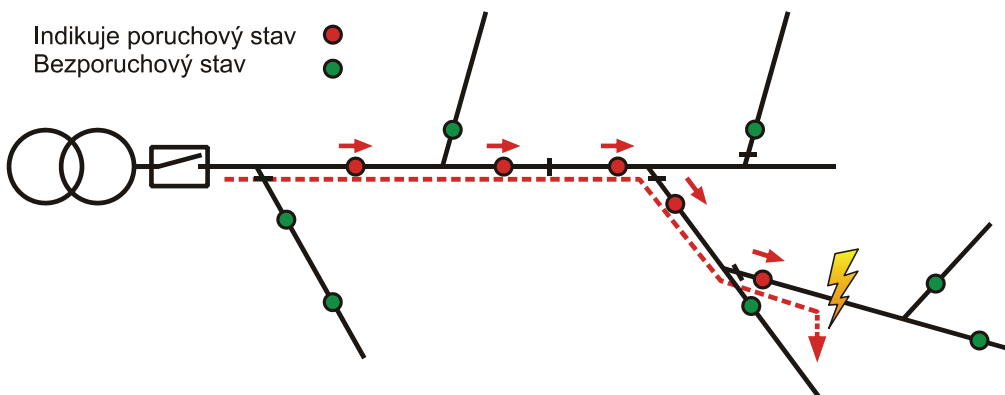
Indikátory měřící výsledné elektrické a magnetické pole jsou vybaveny pouze jedním senzorem a měří sumaci elektrických a magnetických polí všech tří fázových vodičů (příklad konstrukčního řešení je zobrazen na Obr. 3.49). Tento typ indikátorů vyhodnocuje zejména změnu netočivých složek napětí a proudů, která je úměrná změně snímaného elektrického a magnetického pole. Výhodou jsou malé rozměry, snadná instalace, nižší cena a menší spotřeba elektrické energie. Nevýhodou pak jejich nízká citlivost. Poruchové stavy jsou indikovány dle typu za pomoci rozpínacích kontaktů relé, optickou signalizací (blikáním signalizačního světla, dálkovou komunikací s dispečinkem nebo indikačními terčíky s magnetickou pamětí. Napájení je zabezpečeno akumulátorovou baterií, fotovoltaickým panelem nebo přímo z chráněného vedení (Obr. 3.49). Pro dálkovou komunikaci a pro možnost napájení se s výhodou dá použít i prostředků dálkově ovládaných úsečníků.



Obr. 3.49: Indikátor poruch snímající výsledné elektrické a magnetické pole (ukotvení k fázovému vodiči)

Princip lokalizace poruchy indikátory

Na základě popsaných metod je indikátor schopen indikovat směr poruchy. Dle směrovosti těchto indikátorů a znalosti topologie sítě lze definovat postižený úsek, jak popisuje Obr. 3.50. Místo poruchy se dohledá stopováním indikátorů, které indikují poruchové vedení (červená signalizace), až do místa zemního spojení, nepostižená vedení nebo nepostižené úseky jsou indikovány zeleně (Obr. 3.50). Pokud je indikátor vybaven dálkovou signalizací, lze vytipovat postižený úsek sítě předem a vyslat techniky přímo k tomuto místu, avšak pokud není indikátor vybaven dálkovou signalizací, ale pouze optickou je nutné, aby obsluha stopovala indikátory podél vedení až do místa poruchy.



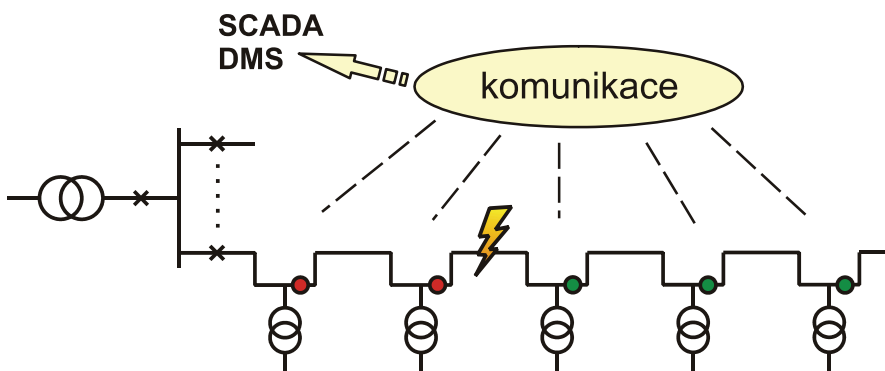
Obr. 3.50: Lokalizace místa zemního spojení pomocí indikátorů poruch signalizace

Mobilní indikátor poruch

Zvláštní kategorií indikátorů poruch pro venkovní vedení jsou poměrně nově vyvinuté mobilní indikátory ARCNOL, které jsou používány k lokalizaci místa zemního spojení v Lotyšsku. Funkce indikátoru je založena na snímání elektromagnetického pole a k vyhodnocování směru poruchy využívá metody vyšších harmonických. Po detekci postiženého vývodu je vyslána obsluha s tímto indikátorem a pochůzkou podél vedení „stopuje“ místo poruchy.

Indikátory poruch pro kabelová vedení

Tyto indikátory jsou díky jednoduššímu a přesnějšímu měření netočivé složky proudu konstrukčně jednodušší a citlivější než indikátory určené pro venkovní vedení. Jeden z prakticky realizovaných konceptů využívající indikátory pro lokalizaci poruchy ve finské kabelové síti je zobrazen na Obr. 3.51. Pro indikaci poruchy se v tomto případě využívají víceúčelové monitory nasazené uvnitř jednotlivých distribučních stanic pro měření oteplení transformátoru a napěťových i proudových poměrů na straně nn. Pro lokalizaci zemního spojení je do jednotky dodatečně přivedeno měření z průvlekového transformátoru proudu umístěného na průběžném kabelovém vedení primární strany DT. Jednotka vyhodnocuje úroveň netočivé složky proudu (metoda vyšších harmonických). Stopováním stavu indikátorů je pak nalezeno místo poruchy.



Obr. 3.51: Princip lokalizace pomocí indikátorů poruch v kabelové síti

3.2.7 Způsoby praktického určení kapacitního proudu analyzovaných vn soustav

Velikost kapacitního proudu je rozhodující pro určení způsobu provozu uzlu soustavy. Teoretický způsob určení velikosti kapacitního proudu byl odvozen dle teorie souměrných složek. V praxi je jeho určení možné třemi způsoby.

Prvním způsobem je experimentální měření proudu místem zemního spojení při vzniku kovového zemního spojení při provozu soustavy jako izolované. Jedná se o tzv. přímou metodu a její využití je možné za předpokladu zajištění všech vývodů pod napětím, které mohou přispět ke zvýšení celkové hodnoty kapacitního proudu. To je možné realizovat především v době odstávky, nicméně i tak je nutné dbát na zajištění spolehlivosti provozu a specifických bezpečnostních pravidel pro ochranu zdraví osob a zařízení v době realizace experimentu.

Druhým způsobem je určení celkového kapacitního proudu experimentálně tzv. nepřímou metodou, kdy je změnou jádra kompenzační tlumivky hledán vrchol rezonance. Nepřímou metodou ladění tlumivky je určována efektivní hodnota napětí v nulovém bodě systému s označením U_L (resp. U_0 dle teorie odvozené v kapitole 3.1) a sestavována tak rezonanční křivka $U_L = f(I_L)$ viz Obr. 3.17 (podrobně popsáno také v [11]).

V případě, kdy není možné určit kapacitní proud experimentálně přímou metodou nebo v případě, kdy nelze zajistit kompenzační tlumivku pro určení kapacitního proudu nepřímou metodou, je možné využít analytického odvození kapacitního proudu. Protože se jedná o metodu analytickou respektující určitá zjednodušení, její schopnost výpovědi je přímo závislá na korektnosti dat provozovatele soustavy a je možné ji použít pouze pro určení předpokládané hodnoty kapacitního proudu.

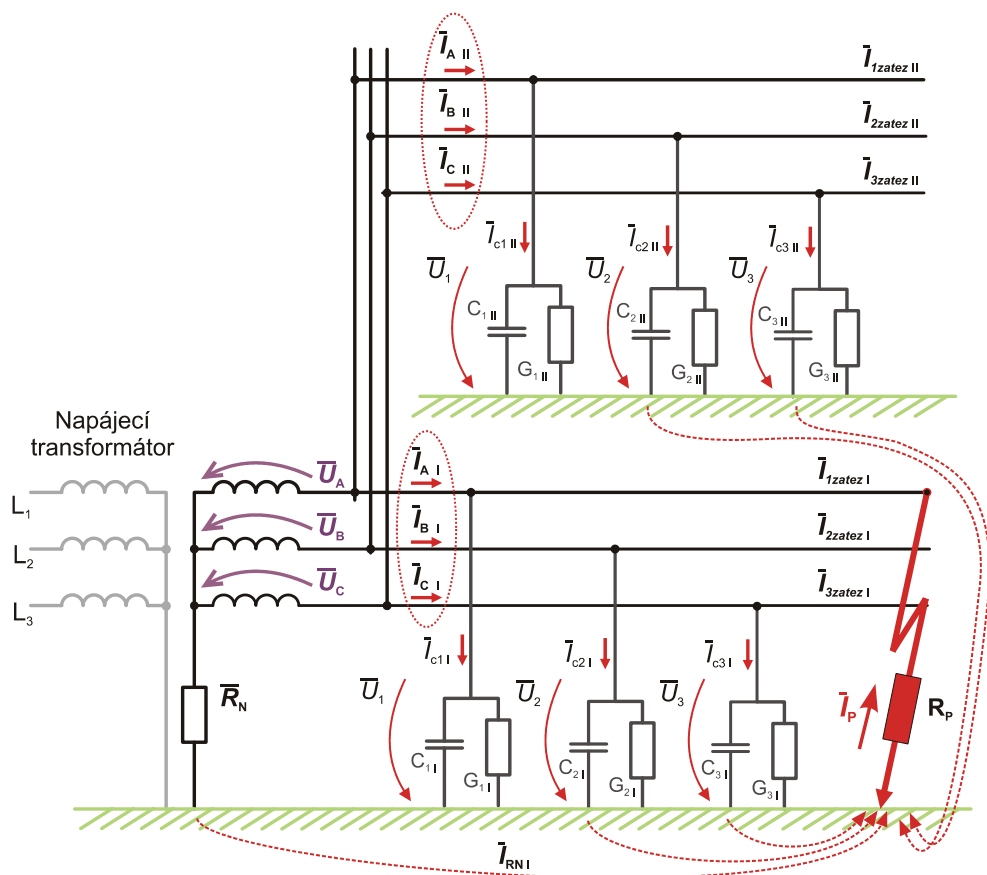
3.2.8 Síť uzemněné přes odporník

Z hlediska analýzy ustáleného stavu soustavy nepřímo uzemněné přes indukčnost je možné zopakovat její výhodu v provozu s trvalým zemním spojením na omezenou dobu, která je dána oteplením zhášecí tlumivky a získat tak čas potřebný k vyhledání místa poruchy. Provoz s poruchou však není možný v provezech se zvýšeným nárokem na bezpečnost – vlastní spotřeby jaderných elektráren, doly, atd.

U kabelových sítí vn se výhody kompenzace zemních kapacitních proudů neprojevují tak jednoznačně jako u sítí venkovních. Většina poruch je trvalá a zmenšení poruchového proudu se projeví ve „samozhášení“ jako při obloukových poruchách u venkovního vedení. Zhášecí tlumivka sice omezuje přepětí při vzniku zemního spojení, ale provoz sítě při zemním spojení namáhá izolaci zdravých fází sdruženým napětím a přináší riziko vzniku vícenásobných poruch. Zařazení činného odporu do uzlu způsobí omezení proudu zemních spojení s ohledem na dimenzování uzemnění, zajistí dostatečné tlumení přepětí při vzniku zemního spojení a umožní použití jednoduchých číslicových ochranných vyhodnocujících zemní poruchy. Spolu s rychlým vypínáním všech zemních poruch se toto projevuje tak příznivým ovlivněním vlastností, že se u tohoto typu sítí téměř nevyskytují vícenásobné poruchy.

Vliv uzemnění uzlu přes činný odpor se nejvíce projevuje při jednopólových poruchách. U ostatních druhů poruch jsou poměry v podstatě shodné se soustavami nepřímo uzemněnými přes indukčnost, či soustavami s izolovaným uzlem.

Pro dodržení návaznosti na analýzu ustálených stavů v soustavách izolovaných a soustavách nepřímo uzemněných přes indukčnost budou napěťové a proudové poměry v této síti popsány podobně - schématem na Obr. 3.52. Indexové značení jednotlivých veličin ve schématu značí příslušnost k danému vývodovému poli I resp. II. Analýza je rozšířena také o vliv zátěže. Určení proudů a napětí jednotlivých složkových soustav je možné s využitím obecného schématu na Obr. 3.4, podrobné znázornění impedance netočivé složky na Obr. 3.5 bude aktualizováno o trojnásobek rezistance uzlového odporníku v nulovém bodě (uzlu) systému (obecná impedance $\bar{Z}_N$ se nahradí odporem uzlového odporníku R_N).



Obr. 3.52: Schematické znázornění vn soustavy nepřímo uzemněné přes rezistor v okamžiku vzniku 1pólové poruchy (zkratu)

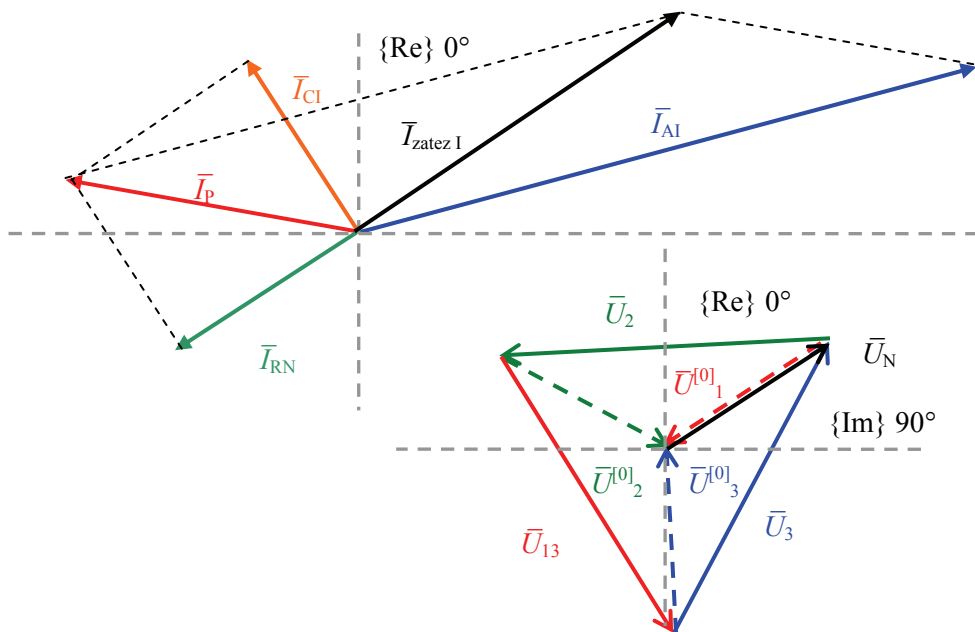
U sítí s odporovým uzemněním uzlu není možné zanedbávat odpory obloukových poruch, kapacity vedení, ale mnohdy je možné zanedbávat reaktance některých částí, popř. je možné zanedbávat i jejich sousledné impedance. Pro proud poruchy při dosazení za netočivou složku impedance platí

$$\bar{I}_P = -\bar{I}_A = -3\bar{I}_{(1)} = \frac{3\bar{U}}{2\bar{Z}_{(1)} + \frac{1}{\frac{1}{3R_N} + j\omega C} + \bar{Z}_{(0)V} + 3R_P} \quad (3.61)$$

Ve většině případů není zapotřebí určovat proud poruchy takto složitě, postačí vycházet ze zjednodušených náhradních schémat a vztahů.

Proud postiženou fází příslušného vývodového pole s poruchou $\bar{I}_{AI}$ je dán vektorovým součtem poruchového proudu $\bar{I}_p$ a proudu zátěže $\bar{I}_{zatez}$. Poruchový proud je pak vektorovým součtem vlastního kapacitního proudu $\bar{I}_{CI}$ a proudu procházejícího uzlovým odporníkem $\bar{I}_{RN}$. U proudu zátěže lze u odporově uzemněných sítí vn předpokládat, že se při jednopólovém zkratu v podstatě nemění, jelikož se prakticky nemění sdružená napětí sítě. Fázorové znázornění napětí a proudů v okamžiku vzniku jednopólového zkratu v odporově uzemněné síti uvádí Obr. 3.53 a na Obr. 3.54 jsou průběhy napětí a poruchového proudu během této poruchy.

$$\bar{I}_{AI} = -\bar{I}_p + \bar{I}_{zatez} = -(\bar{I}_{RN} + \bar{I}_{CI}) + \bar{I}_{zatez} \quad (3.62)$$



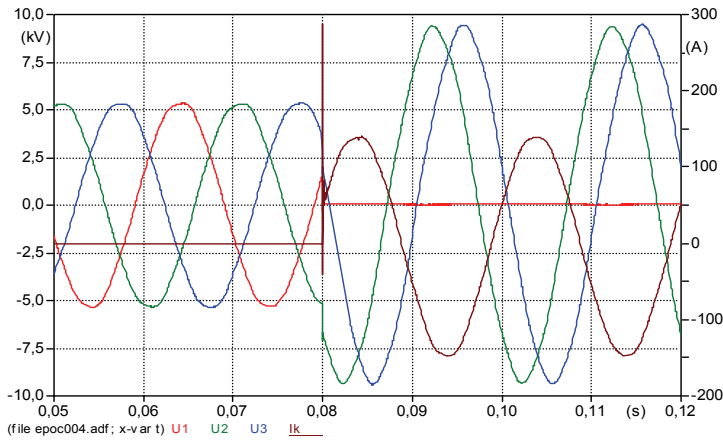
Obr. 3.53: Fázorové znázornění napětí a proudů při 1pólovém zemním zkratu, odpor poruchy $R_p=0$

Vlastní kapacitní proud je dán jeho souslednou a netočivou složkou

$$\bar{I}_{C(1)I} = j\omega C_I \bar{U}, \quad (3.63)$$

$$\bar{I}_{C(0)I} = -j\omega C_1 \frac{(3R_N + \bar{Z}_{(0)T})\bar{Z}_C}{2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_p} = -j\omega C_1 \bar{U}_0, \quad (3.64)$$

kde $\bar{U}_0$ je napětí v nulovém bodě systému a $\bar{U}$ je fázové napětí elektromotorického zdroje.



Obr. 3.54: Okamžitý průběh napětí U_1 , U_2 , U_3 (V) a poruchového proudu I_k (A) v okamžiku vzniku 1pólového zkratu [1]

Pro fázi 1 vývodu I pak pro vlastní kapacitní proud platí:

$$\bar{I}_{1CI} = j\omega C_1 (\bar{U} - \bar{U}_0) \quad (3.65)$$

Proudy ostatních fází jsou dány součtem jejich zatěžovacích a kapacitních proudů. Např. u postiženého vývodu č. 1 pak pro proudy fází bez poruchy platí:

$$\bar{I}_{BI} = \bar{I}_{2zatezI} + \bar{I}_{2CI} = \bar{I}_{2zatezI} + j\omega C_{2I} (\bar{a}^2 \bar{U} - \bar{U}_0), \quad (3.66)$$

$$\bar{I}_{CI} = \bar{I}_{3zatezI} + \bar{I}_{3CI} = \bar{I}_{3zatezI} + j\omega C_{3I} (\bar{a} \bar{U} - \bar{U}_0). \quad (3.67)$$

Takto podrobné určení proudu má význam např. pro stanovení podmínek činnosti distančních nebo srovnávacích ochran. U nejčastěji předpokládaných nadproudových číslicových ochran, zapojených do uzlu transformátorů proudu jednotlivých vývodů, jsou rozhodující součtové proudy fází vývodů.

Součtový proud u vývodu č. 1 s poruchou je

$$I_{\Sigma I} = \bar{U} \left(\frac{3}{2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} + R_p} - j3\omega C_1 \frac{\bar{U}_0}{\bar{U}} \right) \cong \bar{I}_p - \bar{I}_{CI} \quad (3.68)$$

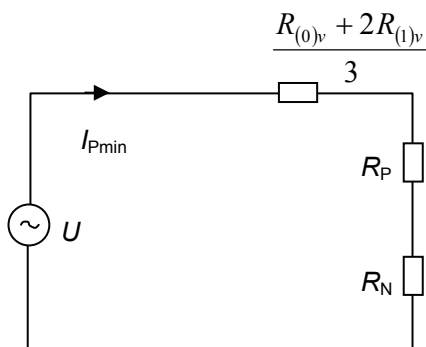
a u zdravého vývodu č. 2

$$I_{\Sigma II} = -j3\omega C_{II} \bar{U}_0 \cong -\bar{I}_{CH}. \quad (3.69)$$

Pro kontrolu rozběhu ochran se výpočtem určuje minimální efektivní hodnota proudu, která může být při poruše na daném zařízení k dispozici. U těchto sítí je tím rozuměna hodnota proudu při zanedbání kapacitního proudu sítě, při uvažování největšího přechodového odporu obloukové poruchy, která je na konci chráněného úseku. Obvykle je v tomto případě možné zanedbat impedanci napájecího zdroje a pro určení proudu použít náhradní schéma na Obr. 3.55 a z něho vyplývající vztah

$$I_{pmin} = \frac{U}{R_v + R_N + R_P}, \quad (3.70)$$

kde $R_v = 2R_{(1)v} + R_{(0)v})/3$ je činný odpor smyčky vodič-země.



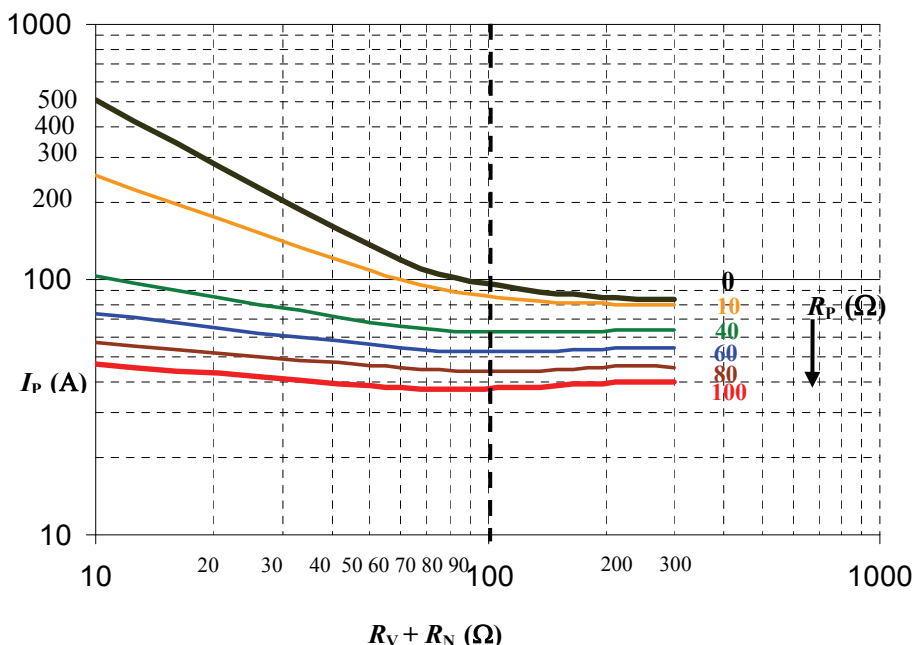
Obr. 3.55: Náhradní schéma pro určení minimálního poruchového proudu

Jelikož existuje vzájemná závislost mezi odporem poruchy a poruchovým proudem, což by komplikovalo praktické použití vztahu (3.70), je na Obr. 3.56 uvedena vypočtená závislost I_{pmin} na součtu $R_v + R_N$. Grafická závislost minimálního poruchového proudu na součtu proudu odporníkem a poruchovou smyčkou byla do současnosti odvozena pouze pro vn soustavy 35 kV, s tím, že byla využita i pro síť 22 kV. Do současnosti však tato závislost nebyla odvozena pro soustavy 6kV. Pro potřebu definování uvedené závislosti pro soustavu vn 6kV byly využity výsledky z experimentu simulace odporových zemních spojení v Elektrárně Počeradý [3]. Pro vytvoření dostatečného statistického souboru byly dále využity výsledky z matematického modelování v EMTP-ATP. Výsledky simulací a experimentů na reálném provozu rozvodny odsíření Elektrárny Počeradý jsou zobrazeny na Obr. 3.56.

Jak je zřejmé, v celém rozsahu změny součtu rezistence uzlového odporníku a poruchové smyčky je poruchový proud cca 50 % z hodnoty, kterou bychom určili při zanedbání odporu poruchy (pro $R_P=0$).

Proto je možné pro určení minimálního proudu 1pólové poruchy ve vn soustavě pro kontrolu rozběhu popudových článků číslcových ochran doporučit vztah

$$I_{\text{pmin}} = \frac{0,5U}{R_v + R_N}. \quad (3.71)$$



Obr. 3.56: Závislost minimálního poruchového proudu na změně rezistence uzlového odporníku a poruchové smyčky

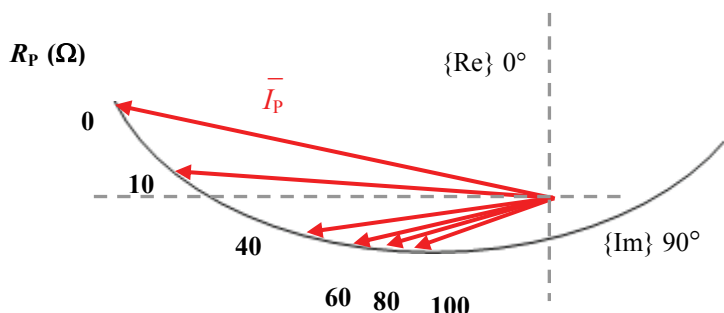
Grafická závislost na Obr. 3.56 byla odvozena pro případ přechodných obloukových poruch do cca 100Ω. Je tedy zřejmé, že se jedná o interpretaci vztahu (3.69) na základě podstatného zjednodušení za předpokladu konstantního průběhu přechodného odporu obloukové poruchy. Vliv odporu poruchy na fázorové znázornění poruchového proudu je uveden na Obr. 3.57.

Matematický popis fázových napětí v místě nesymetrie byl odvozen ve vztazích ((3.8)(3.9)(3.10)), pro zajímavost je možné uvést výsledné vztahy pro sdružená napětí soustavy

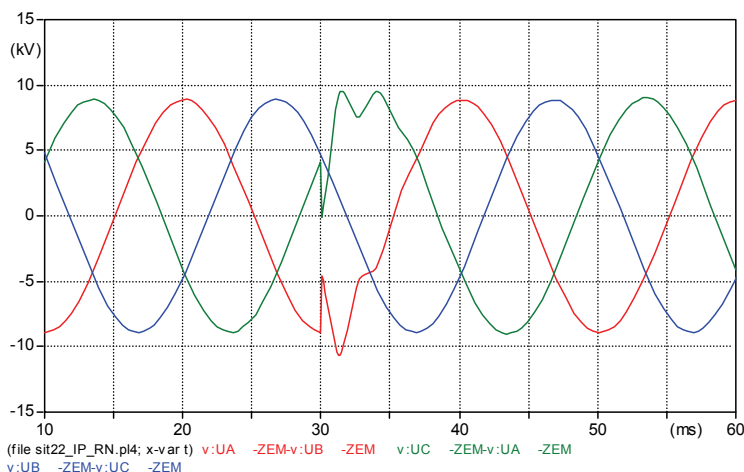
$$\bar{U}_{12} = \bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \bar{U} \left(\frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)} + 3R_p}{2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_p} - \bar{a}^2 \right), \quad (3.72)$$

$$\bar{U}_{31} = \bar{U} \left(\bar{a} - \frac{\bar{Z}_{(0)} - \bar{Z}_{(1)} + 3R_p}{2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_p} \right). \quad (3.73)$$

Pokud u sítě platí $\bar{Z}_{(0)} \gg \bar{Z}_{(1)}$, je ovlivnění sdružených napětí malé a jak z hlediska vlivu na spotřebiče, tak i na proudy zátěže, je zanedbáváme. Uvedená skutečnost je potvrzena i grafickým znázorněním okamžitých průběhů sdružených napětí v případě vzniku jedнопólového zemního zkratu (Obr. 3.58). V čase 30 ms je iniciace zemního zkratu, po odeznění přechodného děje přejdou sdružená napětí systému plynule na ustálené průběhy jako před zkratem.



Obr. 3.57: Fázorové znázornění poruchového proudu při změně přechodného odporu obloukové poruchy v soustavě 6 kV



Obr. 3.58: Průběh okamžitých hodnot sdružených napětí systému U12, U23, U31 (kV) v okamžiku vzniku jedнопólového zemního zkratu [3]

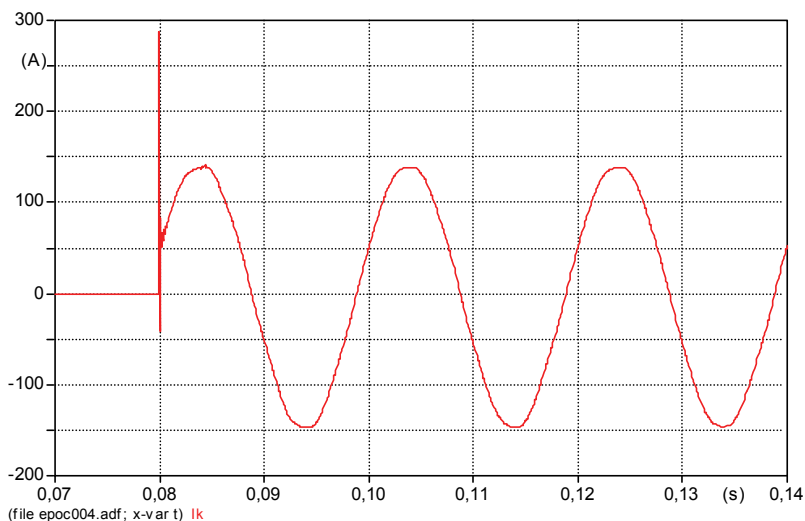
Z hlediska úplnosti je v rovnici (3.74) odvozen vztah pro velikost napětí v nulovém bodě systému, tzv. netočivá složka napětí na přípojnici. Její znalost je důležitá z hlediska využití vybraných číslicových ochran. Pro její velikost platí:

$$\bar{U}_0 = \bar{U} \frac{(3R_N + \bar{Z}_{(0)l})\bar{Z}_C}{(2\bar{Z}_{(1)} + \bar{Z}_{(0)} + 3R_p)(3R_N + \bar{Z}_{(0)l} + \bar{Z}_C)}. \quad (3.74)$$

3.2.9 Detekce poruch v sítích uzemněných přes odporník

Ze vztahu pro poruchový proud (3.12) je zřejmé, že v přímo uzemněných a nepřímo uzemněných systémech mohou zemní poruchové proudy dosahovat velkých hodnot. Tyto vysoké hodnoty poruchového proudu jsou v síti uzemněné přes odporník omezeny především netočivou složkou impedance a vyžadují pro odstranění zemní poruchy vypnutí linky s poruchou. Netočivá složka impedance se určí jako

$$\bar{Z}_{(0)REZ} = \frac{1}{\frac{1}{3R_N} + j\omega C} + \bar{Z}_{(0)V} \doteq \frac{1}{\frac{1}{3R_N} + j\omega C}. \quad (3.75)$$



Obr. 3.59: Průběh okamžité hodnoty zkratového proudu (A) v soustavě nepřímo uzemněné přes rezistor [3]

Při zemních poruchách v přímo a nízkoimpedančně uzemněných systémech mohou téct velké zemní proudy, které vyžadují vypnutí vypínače příslušného obvodu. V těchto systémech jsou používány pro detekci zemních poruch směrové články.

Klasické zemní směrové ochrany měří netočivé nebo zpětné složky. U těchto klasických zemních směrových ochrany je nutné zvolit, která z těchto složkových veličin bude používána. Většinou se toto volí s volbou typu ochrany. Ochrana pak tyto složky využívá vždy. Toto omezení může způsobit ne zcela přesnou detekci některých typů zemních poruch při měnící se konfiguraci systému.

Nové typy zemních směrových ochrany volí nejvhodnější složkovou veličinu pro každou zemní poruchu podle podmínek v systému. U těchto ochrany je pak možné použít směrový článek založený na měření zpětných složek pro jednu poruchu a směrový článek založený na měření netočivých složek pro další zemní poruchu.

Tento nový typ zemní směrové ochrany obsahuje kombinaci tří směrových článků: směrový článek polarizovaný netočivou složkou proudu, polarizovaný zpětnou složkou napětí a polarizovaný netočivou složkou napětí [3].

Proudem polarizovaný směrový článek

Vstupními veličinami tohoto článku jsou pracovní veličina $3\bar{I}_{(0)}$ a polarizační veličina $\bar{I}_{\text{POL}}$. Směrový článek vypočítává velikost pracovní veličiny a vzájemný úhel mezi vstupními veličinami (3.76). Směrový článek porovnává výsledek výpočtu T s nastavením náběhu. Pokud je T kladné a větší než kladná nastavená prahová hodnota, článek naběhne a určí, že se jedná o dopřednou poruchu. Pokud je T záporné a menší než záporná nastavená prahová hodnota, článek naběhne a určí, že se jedná o zpětnou poruchu

$$T_{(0)} = |\bar{I}_{\text{POL}}| \cdot |3\bar{I}_{(0)}| \cdot \cos(\Theta_{\bar{I}_{\text{POL}}} - \Theta 3\bar{I}_{(0)}), \quad (3.76)$$

kde $\Theta_{\bar{I}_{\text{POL}}}$ je úhel polarizační veličiny vztahený k referenčnímu fázoru a $\Theta 3\bar{I}_{(0)}$ je úhel netočivé složky proudu vztahený k referenčnímu fázoru.

Směrový článek polarizovaný zpětnou složkou napětí

Analogovými vstupními hodnotami tohoto článku jsou zpětná složka napětí $\bar{U}_{(2)}$ a zpětná složka proudu $\bar{I}_{(2)}$. Směrový článek vypočítává zpětnou složku impedance $Z_{(2)}$ (efektivní hodnota) měřenou ochranou s využitím rovnice (3.77). Pokud je $Z_{(2)}$ pod nastavením $Z_{(2)F}$, pak článek určí, že se jedná o dopřednou poruchu. Pokud je $\bar{Z}_{(2)}$ nad nastavením $Z_{(2)R}$, pak článek určí, že se jedná o zpětnou poruchu

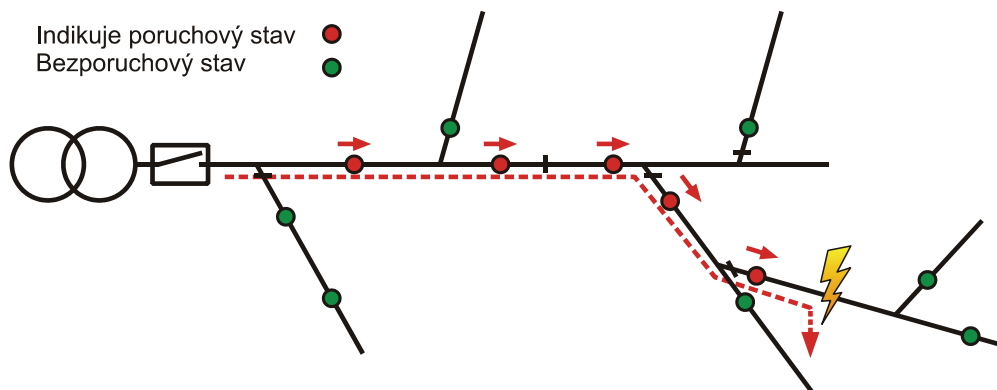
$$Z_{(2)} = \frac{\text{Re}[\bar{U}_{(2)} \cdot (1\Theta \bar{Z}_{(2)} \cdot \bar{I}_{(2)})^*]}{|\bar{I}_{(2)}|^2}, \quad (3.77)$$

kde $\Theta \bar{Z}_{(2)}$ je úhel zpětné složky impedance chráněné linky vztažený k referenčnímu fázoru.

3.2.10 Lokalizace poruchy v sítích provozovaných přes odporník

Podobně jako v případě sítí kompenzovaných využívá se pro dohledání místa poruchy ve velmi složitých kabelových soustavách indikátorů poruch. Jelikož tato zařízení indikují průchod zkratového proudu (soustava uzemněná přes omezující uzlový odporník) mluvíme o indikátorech zkratového proudu (IZP)

Indikátor zkratového proudu je zařízení, které umožňuje indikovat průchod zkratového proudu fázovým vodičem v soustavách vn. Jedná se o třífázové měřicí zařízení, které vyhodnocuje nezávisle velikost proudu protékajícího v jednotlivých fázích. Pokud tento monitorovaný proud překročí popudovou hodnotu a čas zpoždění, dojde k indikaci poruchového stavu. Díky indikaci průchodu poruchového proudu umožňuje obsluze rychleji dohledat místo poruchy uvnitř složitých kabelových sítí a zkrátit tak dobu nutné beznapěťové pauzy. Princip lokalizace místa poruchy s využitím IZP je zobrazen na Obr. 3.60. V případě vzniku poruchy začnou jednotlivé IZP umístěné na vedení, které je protékáno poruchovým proudem, indikovat poruchový stav. Stopováním těchto indikátorů lze dohledat místo poruchy, jelikož je toto místo umístěno mezi posledním indikátorem indikujícím poruchový stav a indikátorem v klidové poloze (neindikujícím poruchový stav), jak naznačuje Obr. 3.60.

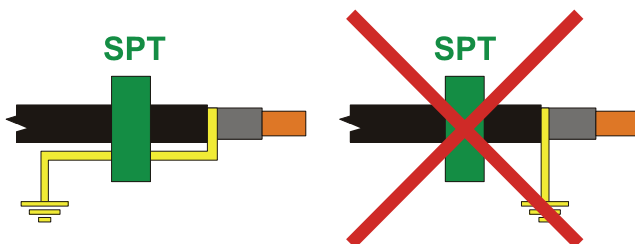


Obr. 3.60: Lokalizace místa poruchy za pomoci indikátorů zkratového proudu

Indikátor zkratového proudu se skládá ze dvou základních částí a to vlastní jednotky IZP a z tří měřících (snímacích) transformátorů proudu (SPT). Tyto tři SPT jsou instalovány na jednotlivé fáze vedení L1, L2, L3 a poskytují měřený signál jednotce IZP. Pro jednoduchou instalaci jsou tyto transformátory obvykle konstruovány s děleným jádrem, aby nemuselo být měřené vedení rozpojováno. Překročí-li monitorovaný proud nastavenou vybavovací hodnotu a trvá-li tento stav nepřetržitě po předvolenou vybavovací dobu, jsou iniciovány indikační prvky dané (poškozené) fáze. Napájení indikátoru zkratového proudu je buď ze soustavy nn nebo je zajištěno SPT, které odebírají energii z kontrolovaného obvodu.

Pro indikaci zkratového proudu nevyžadují tyto indikátory potřebný odběrový proud v chráněném kabelu, jelikož si energii potřebnou ke své funkci odebírají přímo ze zkratového proudu. Pro optimalizaci funkce indikátoru jsou k dispozici dva charakteristické parametry. Prvním parametrem je popudová hodnota proudu (vybavovací proud) a druhým je vybavovací doba indikátoru.

Pro správnou funkci indikátoru je mimo jiné důležitá zejména korektní instalace měřicích transformátorů proudu. Jelikož jsou veškerá kabelová vedení opatřena stíněním, je nezbytné, aby byl proud procházející tímto stíněním kompenzován a nedocházelo ke zkreslení monitorovaného fázového proudu. Tato kompenzace se provede zpětným provlečením stínění skrz měřicí transformátor proudu tak, aby tento transformátor měřil pouze proud procházející jádrem monitorovaného kabelu, jak je naznačeno na Obr. 3.61. Při každé instalaci IZP je tedy nutné zpětně provléct veškerá uzemněná stínění skrz SPT.



Obr. 3.61: Správná a chybná instalace měřicího transformátoru proudu jednotky SPT na kabelové vedení

3.3. Literatura

- [1] EGE [on-line]. 2010 [cit. 2011-10-11]. Dostupné z www.ege.cz
- [2] ČSN 33 3070: 2002. Kompenzace kapacitních zemních proudů v sítích vysokého napětí. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1. 1. 1979, s. 19
- [3] Mišák, S. Analýza napěťových a proudových poměrů 1pólových poruch ve vlastní spotřebě vn elektrárenských a průmyslových provozů. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2007. s. 131. Vedoucí dizertační práce Prof. Ing. Karel Skokanský, CSc.
- [4] Pospíšil, J., Čech, M., Effenberger, T. Indikace zemních spojení v sítích vn. In Referáty konference ČK CIREN 2000. Český komitét CIREN, 2000, s. 3/30-3/35.
- [5] Druml, G., Seifert, O., Fickert, L. New Improvements for Transient Relays. Kaunas University of Technology and Aalto University organized seminar on Methods and techniques for earth fault detection, indication and location. Espoo (Finland). 2011
- [6] Topolánek, D. Lokalizace místa zemního spojení v kompenzované distribuční síti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. s. 148. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [7] Topolánek, D., Orságová, J., Toman, P., Dvořák, J. Vliv přizemňování postižené fáze na bezpečnost sítí vn. In Referáty konference ČK CIREN 2010. Na Hroudě 1492/ 4, 100 05, Praha 10: Český komitét CIREN, 2010. s. 1-7. ISBN: 978-80-254-8519- 4
- [8] Wahlroos, A., Altonen, J., Compensated Network and Admittance Based Earth-Fault Protection. Kaunas University of Technology and Aalto University organized

- seminar on Methods and techniques for earth fault detection, indication and location. Espoo (Finland). 2011
- [9] Roberts, J., Altuve, H. J., Hou, D. Přehled metod detekce zemních poruch v uzemněných, neuzemněných a kompenzovaných distribučních systémech. 28th Western Protective Relay Conference. Washington (USA), 2001
 - [10] Druml, G., Kugi, A., Seifert, O., A New Directional Transient Relay for High-Ohmic Earth Faults, In CIREN 2003 - 17th International Conference on Electricity Distribution. Barcelona (Spain), 2003
 - [11] Mišák, S. Analýza poruchových dějů v průmyslových vn rozvodech a možnosti jejich omezení. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2009. s. 156
 - [12] RCC Ground Fault Neutralizer : Modern Neutral Grounding in High Voltage Grids. Swedish Neutral: Premium Power Protection [online]. 2004 [cit. 2011-04-03]. Dostupný z www.swedishneutral.se/Frames.html
 - [13] HORÁK, M. Nové metódy lokalizácie porúch v sieťach 22 kV: Slovenská technická univerzita v Bratislave, Fakulta elektrotechniky a informatiky, 2011. s. 127. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Anton Beláň, Ph.D.

4. Distribuční sítě nízkého napětí

Sítě nízkého napětí jsou navrhovány s ohledem na charakter napájeného objektu nebo oblasti, které se vyznačují odlišnou velikostí požadovaných výkonů a stupněm důležitosti zajištění dodávky elektrické energie. Uvedená kritéria pak rozhodují nejen o dimenzování jednotlivých částí sítě, ale také o jejich konfiguraci a způsobu připojení odběrů.

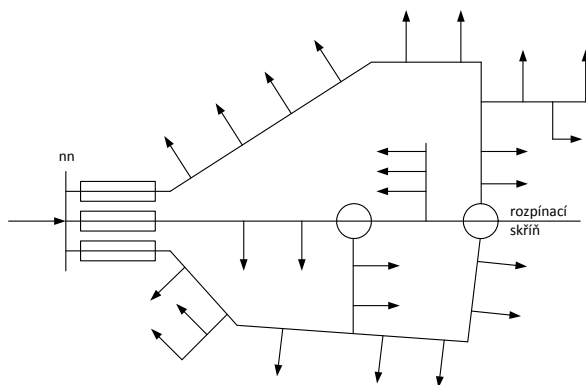
4.1. Typy sítí nn

4.1.1 Síť paprskové

V paprskových sítích, jejichž topologie odpovídá obr. 1.3a), vedení vycházejí z napájecího místa (transformovny nebo spínací stanice) a zásobují jednotlivé odběry. Každý vývod (paprsek) je samostatný a nelze je vzájemně spojovat. Tento způsob rozvodu je obvykle nejlevnější, avšak jistota zásobování je nejmenší. Přerušení dodávky může být několik hodin. Paprsková síť se obvykle používá v obcích, v malých městech i v průmyslu.

4.1.2 Síť okružní

Síť okružní je možno provozovat rozepnutou nebo sepnutou. Jednotlivé paprsky nebo polosmyčky jsou vedeny tak, aby se daly sepnout do uzavřených smyček (Obr. 4.1). V obvyklých provozních stavech se tedy jedná o síť paprskové. Při poruše vedení lze však snadno postižený obvod přepnout na vývod sousední a to buď ručně, nebo automaticky. Síť okružní jsou dražší než paprskové, protože pro vzájemné spojení je třeba větších délek vedení.

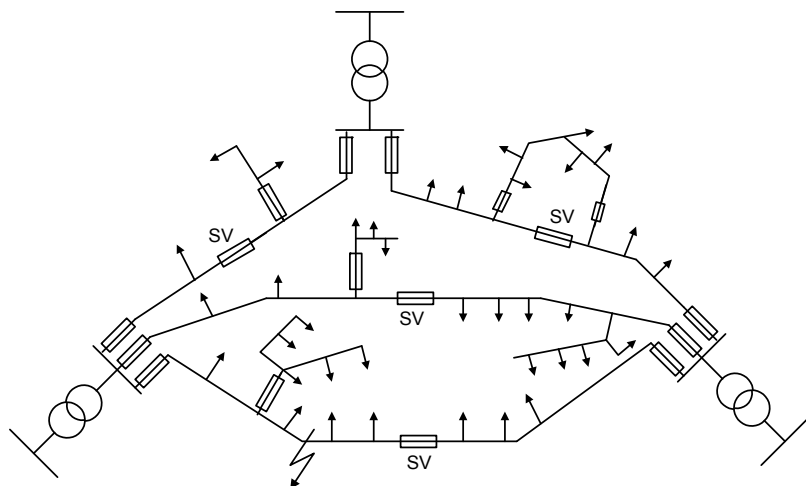


Obr. 4.1: Okružní síť nn

4.1.3 Zjednodušená mřížová síť

Zjednodušenou mřížovou síť nn (Obr. 4.2) lze vytvořit tehdy, pracují-li do společné sítě alespoň dva transformátory vn/nn. Mezi těmito transformátory je spojení hlavními vedeními obvykle s většími průřezy, jistěnými výkonovými

(hlavními) pojistkami na vývodech z DTS. Ve vhodných místech těchto hlavních vedení jsou slabší pojistky zvané pojistky slabé vazby (SV). Podle zkušeností i zkoušek v provozu má být poměr jmenovitých proudů pojistek hlavních ku pojistkám slabé vazby 2 : 1. Vyskytne-li se zkrat např. v označeném místě sítě, reaguje nejprve pojistka slabé vazby SV 4 a teprve v dalším zlomku vteřiny hlavní pojistka v DTS 2. Ostatní síť zůstává v provozu. Zjednodušená mřížová síť reaguje na poruchy na straně nn, nikoliv na straně vn. Distribuční transformovny DTS 1, DTS 2 a DTS 3 jsou většinou napájeny jedním vedením vn, obvykle venkovním.

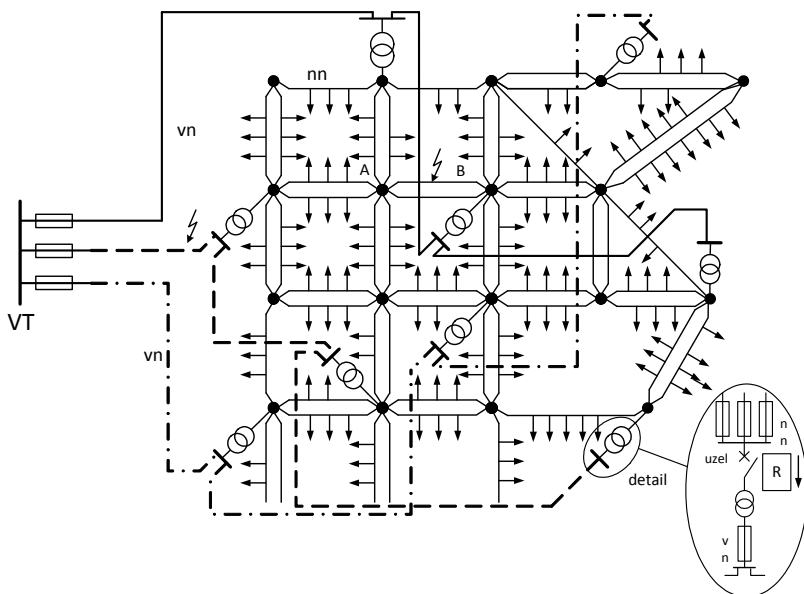


Obr. 4.2: Zjednodušená mřížová síť nn

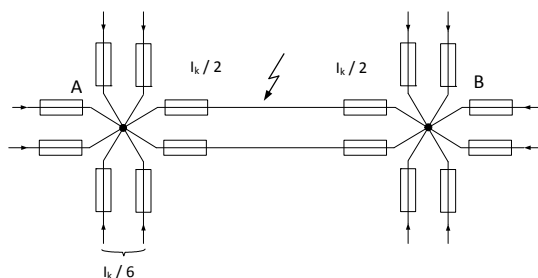
4.1.4 Klasická mřížová síť

Klasické mřížové sítě nn (Obr. 4.3) se zpravidla používají ve větších městech s měrnou hustotou 1 MW/km a více, kde je několik transformoven napájených nejméně dvěma, lépe třemi až pěti napáječi vn. Kabelové vedení nn se spojí na křižovatkách ulic do uzlu. Jsou to skříně s pojistkami za zděné na vhodných místech v domovních zdech nebo umístěné do samostatných pilířů. Pojistky nn mají mít pomalou charakteristiku a ve všech skříních stejnou jmenovitou hodnotu. Nastane-li porucha v úseku sítě nn mezi dvěma skříněmi, rozdělí se proud, jak je naznačeno v obrázku (Obr. 4.4). Z charakteristiky pojistek je zřejmé, že se pojistky na porušeném vývodu přetaví za kratší čas, a to tak rychle, že ostatní pojistky zůstanou neporušeny. Vyřadí se tak z provozu pouze porušený úsek A-B.

V klasické mřížové síti je vyšší spolehlivost zásobování odběratelů při poruše některého napáječe vn než v ostatních typech sítí. Nastane-li porucha na napáječi vn (např. prostřední vývod, Obr. 4.3), teče zkratový proud do místa zkratu nejen z místa napájení VT, ale i ze strany sítě nn. Pro tento případ jsou na straně nn každého transformátoru spínače ovládané směrovými relé, která dají popud k vypnutí vadného napáječe v případě toku výkonu z nn do vn. Téměř současně vypne spínač ve stanici VT, takže napáječ č. 2 zůstane bez napětí, ale zásobování mřížové sítě zůstane neporušeno.



Obr. 4.3: Klasická mřížová síť nn



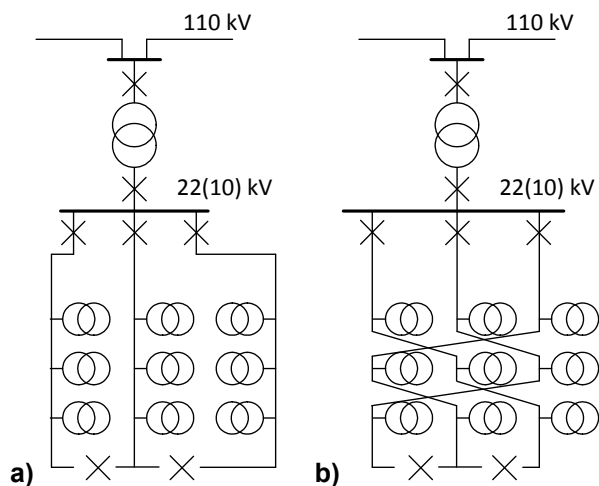
Obr. 4.4: Klasická mřížová síť - rozložení proudů v mřížové síti při zkratu

Klasické mřížové sítě dělíme podle počtu transformátoru 110 kV/vn, na které jsou připojeny distribuční transformátory vn/nn napájející mřížovou síť, na jednosystémové (Obr. 4.5), dvousystémové (Obr. 4.6) příp. vícesystémové. Schéma napájení jednosystémové mřížové sítě s prostřídánými napáječi je na Obr. 4.6b). Při poruše jednoho napáječe se tak zatížení rozloží na ostatní napáječe rovnoměrněji.

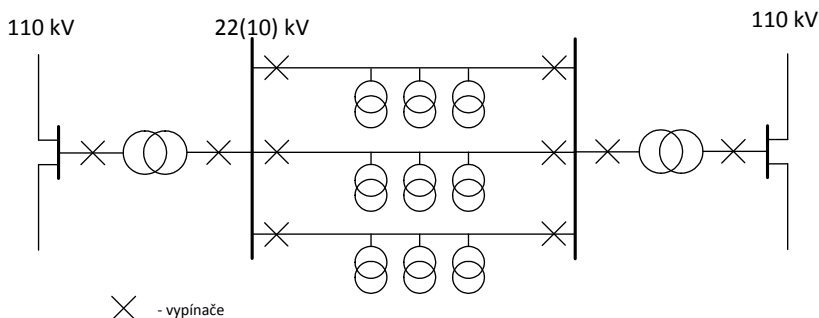
Porovnání některých vlastností tří typů sítí nn je uvedeno v tabulce [1].

Vlastnosti	klasická mřížová síť	zjednodušená mřížová síť	paprsková síť
pravděpodobnost výpadku	1	4÷5krát vyšší	9000krát vyšší
jistota zásobování	největší	větší	malá
napětí – kvalita (kolísání) úbytek ΔU	stabilní U , nejmenší ΔU	méně kolísá než v paprskové síti asi $\frac{1}{2} \Delta U$ než v paprskové síti	nestabilní U velký ΔU
připojování koncentrovaných odběrů	až do $1/2 S_n$ transformátoru	až do $1/4 S_n$ transformátoru	nelze
využití transformátoru a vedení	ušetří 30 % S_n transformátoru nejlepší využití	střední	malé využití nestejnoměrné zatěžování
ztráty el. energie	až o 30% menší než paprsková síť	střední	velké
zkratové proudy	nejvyšší	střední	nejnižší
přehlednost sítě	malá	střední	velká
zpětné napětí při rozpojení	ano	ano	ne
poruchy v síti vn	neovlivní napájení	výpadek U	výpadek U
poruchy v síti nn	neovlivní napájení	neovlivní napájení	výpadek U
cena zařízení	závisí na zatížení	vyšší	nízká

Tab. 4.1: Porovnání sítí nn



Obr. 4.5: Jednosystémová mřížová síť



Obr. 4.6: Dvousystémová mřížová síť

4.2. Výpočtové zatížení sítí nn

Výpočtové zatížení je fiktivní elektrický výkon, který zohledňuje poměrné zatížení současně připojených spotřebičů. Výpočtové zatížení a z něho určený výpočtový proud nejlépe odpovídají reálnému zatížení části soustavy a jsou základními veličinami potřebnými pro dimenzování prvků rozvodného zařízení v normálních provozních stavech.

4.2.1 Výpočtové zatížení pro výrobní provoz, objekt nebo závod jako celek

Tohoto výpočtového zatížení se užije pro dimenzování napájecího zdroje, přívodu, rozvodny, počtu a velikosti napájecích transformátorů, případně rozváděčů a jejich napájecích vedení. Je dáno výrazem

$$P_p = P_i \cdot \beta, \quad (4.1)$$

kde β je součinitel náročnosti objektu jako celku [-],

P_i je celkový instalovaný výkon spotřebičů objektu [W].

Součinitel náročnosti β lze definovat vztahem

$$\beta = \frac{P_{\max}}{P_i} \leq 1, \quad (4.2)$$

kde P_i je instalovaný výkon všech spotřebičů objektu [W],

$P_{\max}$ je hodinové maximum odběru elektrické energie v období celého roku [W].

Pro stanovení součinitele náročnosti existuje řada metod, jejichž použití závisí na podkladech, které jsou k dispozici. Metody lze shrnout takto:

- a) Stanovení β u stávajících objektů - součinitel náročnosti se stanoví z výsledků měření ročního odběrového diagramu (ROD) a podle definice (4.2).
- b) Stanovení β u nových objektů, u nichž je znám seznam hlavních spotřebičů a způsob jejich provozu. Tady je možno součinitel náročnosti stanovit:
 - sestrojením odběrového diagramu alespoň pro jednu směnu a pak podle definice (4.2) nebo
 - ze vztahu:

$$\beta = \frac{k_s \cdot k_z}{\eta_m \cdot \eta_s}, \quad (4.3)$$

kde $k_s = \frac{P_{ip}}{P_i} \leq 1$ je součinitel současnosti, tj. poměr instalovaných výkonů spotřebičů, které jsou současně v chodu P_{ip} [W] k instalovanému výkonu všech spotřebičů P_i [W],

$k_z = \frac{P_{vp}}{P_{ip}} \leq 1$ je součinitel využití, tj. poměr skutečného výkonu spotřebičů P_{vp} [W], které jsou současně v chodu k jejich instalovanému výkonu P_{ip} [W],

η_m je účinnost spotřebičů při daném využití [-],

η_s je účinnost napájecí soustavy od uvažovaného místa až ke spotřebičům [-].

- c) Stanovení β v případě, že nejsou známy spotřebiče nebo jejich provoz - součinitel náročnosti lze v tomto případě stanovit:
 - odhadem na základě porovnání s existujícími podobnými objekty daného odvětví
 - využitím informativních hodnot z [5].

4.2.2 Výpočtové zatížení pro jednu skupinu spotřebičů

Použije se pro dimenzování rozváděče, z něhož je daná skupina spotřebičů napájena, a přívodu k rozvaděči. Vypočte se buď podle vztahu (4.2), v němž P_i a β se zde týkají dané skupiny nebo ze vztahu (4.4), který se také nazývá dvojčlenný vzorec.

$$P_p = a \cdot P_x + b \cdot P_n, \quad (4.4)$$

kde P_x je součet x největších spotřebičů charakterizujících danou skupinu [W],

P_n je instalovaný výkon všech spotřebičů [W],

a, b jsou součinitelé náročnosti pro skupinu [-].

Hodnoty a, b, x jsou uvedeny pro některé skupiny spotřebičů v [5]. Následující Tab. 4.2 je uvedena jako příklad.

Charakteristika skupiny	a	b	x	střední účinník
Elektromotory pro individuální pohon kovoobráběcích strojů	0,5	0,14	5	0,5
Elektrické odporové pece	0,3	0,5	2	1
Jeřáby v montážních halách	0,2	0,06	5	0,5
Elektromotory ventilátorů, čerpadel a transmisí	0,25	0,65	5	0,8
Pohony v chemických závodech s nepřetržitou technologií	0,5	0,5	5	0,59

Tab. 4.2: Informativní hodnoty součinitelů náročnosti jednotlivých skupin spotřebičů pro dvojčlenné vzorce podle [5]

4.2.3 Výpočtové zatížení několika skupin spotřebičů

Jestliže z jednoho rozváděče je napájeno několik samostatných skupin spotřebičů, pak pro dimenzování tohoto rozváděče a přívodu k němu lze použít výpočtového výkonu stanoveného takto:

$$P_p = \max_{j=1, \dots, k} (a \cdot P_x)_j + \sum_{j=1}^k (b \cdot P_n)_j, \quad (4.5)$$

jestliže pro jednotlivé skupiny platí

$$P_{pj} = (a \cdot P_x)_j + (b \cdot P_n)_j \quad j = 1, 2, \dots, k, \quad (4.6)$$

kde P_{pj} je výpočtové zatížení j -té skupiny spotřebičů [W],

k je počet skupin [-].

4.2.4 Výpočtové zatížení pro jeden spotřebič

Tohoto výpočtového zatížení se použije pro dimenzování přívodu ke spotřebiči. Jeho stanovení je různé podle toho, je-li spotřebič určen pro trvalý provoz nebo provoz s cykly.

Je-li spotřebič určen pro trvalý provoz, je jeho výpočtové zatížení přívodu dáno jeho příkonem dle vztahu (4.7).

$$P_p = \frac{P_n}{\eta}, \quad (4.7)$$

kde P_n je jmenovitý instalovaný výkon spotřebiče [W]

η je účinnost spotřebiče [-].

Je-li spotřebič určen pro přerušovaný nebo krátkodobý chod nebo zatížení postupuje se při určování výpočtového výkonu individuálně, případ od případu. Jsou možné tyto způsoby:

$P_p = P(t)$ nebo $I_p = I(t)$, tj. udá se časový průběh příkonu $P(t)$ (nebo lépe proudu $I(t)$), nejčastěji pomocí zatěžovatelů a poměrů příkonů (proudů) v jednotlivých časových intervalech k maximálnímu příkonu (proudu).

$P_p = P_{\text{stálé}} \leq P_n$ nebo $I_p = I_{\text{stálé}}$, kde $P_{\text{stálé}}$ ($I_{\text{stálé}}$) je stálý příkon (proud) stanovený početně nebo graficky, který způsobí stejné maximální oteplení vodiče přívodu jako skutečný průběh příkonu $P(t)$ (proudu $I(t)$). Kromě časového průběhu zatížení vyžaduje tento způsob uvažovat i časové oteplovací konstanty vodičů. Někdy je možné uvažovat hodnoty $P_{\text{stálé}}$ ($I_{\text{stálé}}$) jako stálý příkon (proud), kterým se vyvine v zařízení (vodiči přívodu) stejné množství tepla jako skutečným průběhem proměnného zatížení $P(t)$ ($I(t)$). Potom bude za předpokladu konstantního účinníku

$$I_{\text{stálé}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt}, \text{ nebo } P_{\text{stálé}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P^2(t) dt}, \text{ kde } T \text{ je celková doba}$$

proměnného zatížení.

Je třeba zdůraznit, že takto stanovené výpočtové zatížení lze užít jen pro dimenzování z hlediska dovolené provozní teploty, nikoliv například pro úbytek napětí.

4.2.5 Výpočtový proud

Výpočtový proud se stanoví z výpočtového zatížení P_p určeného podle předchozích kapitol. Pro trojfázový spotřebič je

$$I_p = \frac{P_p}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot \cos \varphi}, \quad (4.8)$$

kde $\cos \varphi$ je účinník v okamžiku maxima odběru, a to v místě, kde teče počítaný proud (vodiče a kabely rozvodu, přípojnice aj.) [-],

U_n je jmenovité sdružené napětí spotřebiče [V].

Výpočtový proud I_p je určen jednou ze dvou skutečností - požadavkem na kompenzaci účinníku nebo vlastnostmi samotných spotřebičů - to podle místa kompenzace. V prvním případě je to hodnota volená, v druhém případě je třeba ji obecně stanovit z výpočtového činného příkonu P_p a jalového příkonu Q_p . Předpokládá-li se, že průběh $Q(t)$ se příliš neliší od průběhu $P(t)$ tj. že maximum Q nastane při maximu P , lze pro stanovení Q_p objektu jako celku nebo skupin

spotřebičů použít obdobných vztahů jako v předchozích kapitolách se stejnými součiniteli náročnosti. Pro odhad účinníku lze též použít středních hodnot $\cos \varphi$ uvedených pro jednotlivá odvětví a skupiny spotřebičů v [16], tak jak jsou uvedeny např. v Tab. 4.2.

4.2.6 Výpočtové zatížení pro bydlení a občanskou vybavenost

V případě stanovení výpočtového zatížení trafostanic pro bydlení a občanskou vybavenost bude záležet především na charakteru napájené oblasti nebo objektu, které odpovídá příslušná hodnota hustoty zatížení v MW/km^2 , pro kterou je napájecí trafostanice určena. Postupy ke stanovení výkonu distribučního transformátoru jsou obvykle zpracovány přímo distributory ve formě podnikových norem a předpisů, které vycházejí z místních zkušeností s provozem stávajících distribučních sítí. Lze je rozdělit do dvou základních skupin:

4.2.6.1 Výpočtové zatížení pro bytovou zástavbu

Hodnota součinitele náročnosti v **soustředěné bytové zástavbě** se pro výpočet zatížení sítě nn určuje podle [4] jako

$$\beta_n = \beta_\infty + (1 - \beta_\infty) \frac{1}{\sqrt{n}}, \quad (4.9)$$

kde β_n je soudobost pro n bytů

β_∞ je soudobost pro nekonečně velký počet bytů (obvykle je $\beta_\infty = 0,15 \div 0,20$)

n je počet bytů ve skupině.

Výpočtové zatížení vedení nn se pak určí jako

$$P_{p\,nn} = \beta_n \cdot (n_A \cdot P_A + n_B \cdot P_B + n_C \cdot P_C), \quad (4.10)$$

kde n_A je počet bytů kategorie A

n_B je počet bytů kategorie B

n_C je počet bytů kategorie C

$n = n_A + n_B + n_C$ je celkový počet bytů

$P_A = 3,5 \text{ kW}$ a $P_B = 5,5 \text{ kW}$ jsou soudobé příkony bytů kategorií A a B, které se počítají jako polovina jejich instalovaného příkonu.

P_C je soudobý příkon bytu kategorie C, který se počítá jako $0,7 \div 0,9$ násobek jeho instalovaného příkonu.

Koeficient náročnosti pro vyjádření soudobosti zatížení distribuční trafostanice dále závisí na hustotě a uspořádání sítě nn. Pro byty (RD) s el. vytápěním (akumulace, přímotopy) je nutno volit $\beta_n = 0,7 \div 0,9$.

4.2.6.2 Výpočtové zatížení pro nebytové odběry

Výkonové požadavky nebytových odběrů jsou obvykle stanoveny na základě rozlohy napájeného objektu, stanovené podle předem zvoleného parametru – např. počtu tříd pro školy, rozlohy užité plochy pro obchody a restaurace nebo počtu lůžek pro nemocnice. Celkový instalovaný výkon je pak dán stupněm elektrizace objektu - měrným instalovaným výkonem na jednotku rozlohy. Koeficient náročnosti se stanovuje obvykle podle maximálních zatížení jednotlivých objektů stanovených na základě obchodních měření stávajících objektů stejného charakteru.

4.3. Literatura

- [1] Štroblová, M., Hejtmánková, P. Elektrické sítě městské a průmyslové. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1994, s. 149, ISBN 80-7082-154-X
- [2] Horák, K. Výpočet elektrických sítí. Praha: SNTL, 1980, s. 307
- [3] Pavlovský, B., List, V. a kol. Elektrotechnika: Část 1 Elektrické sítě. Praha: SNTL, 1964, s. 393
- [4] ČSN 33 2130: 2009. Elektrické instalace nízkého napětí – Vnitřní elektrické rozvody, Český normalizační institut
- [5] ČSN 34 1610: 1993. Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách, Český normalizační institut

5. Prvky distribučních sítí

K nejvýznamnějším prvkům distribučních sítí patří elektrická vedení, rozvodny a transformovny.

5.1. Vedení

Elektrické vedení je základním prvkem jak přenosových tak i distribučních sítí a představuje soubor vodičů, izolačních materiálů a konstrukcí určených pro přenos elektrické energie mezi dvěma body elektrické sítě; mezi jejími uzly. Elektrická vedení je možné dělit na kabelová a venkovní. Využití kabelového či venkovního vedení je z velké části závislé na místních topografických či technických podmínkách, a také na stanovených požadavcích na bezpečnost i spolehlivost provozu vedení. V poslední době také roste význam ekologických otázek souvisejících nejen s výstavbou, ale i s provozem distribučních soustav, důsledkem čehož dochází také k dynamickému růstu v oblasti izolovaných vedení.

5.1.1 Venkovní vedení

Venkovní vedení tvoří převážně holé vodiče, které jsou vedeny nad terénem. Tyto vodiče jsou přichyceny k izolátorům a jsou podpírány vhodnými podpěrnými stožáry. Venkovní (nadzemní) vedení se používají tam, kde je pro ně dostatek prostoru. Při výstavbě nových vedení jsou preferovány, přestože jejich náklady na provoz a údržbu jsou vyšší než u kabelových vedení. Významnou roli při rozhodování o výstavbě nového vedení hrají investiční náklady. Ty jsou u venkovních vedení v porovnání s vedením kabelovým značně nižší. Dle hladiny napětí lze venkovní distribuční vedení soustavy ČR dělit na vedení 110 kV, vn a nn.

5.1.1.1 Vedení 110 kV

Vedení 110 kV (vvv), které slouží k přenosu velkých výkonů z místa propojení s přenosovou soustavou do míst s velkou koncentrací odběru. Délky těchto vedení mohou činit i několik desítek kilometrů. Tato vedení musí být vysoce spolehlivá, s čímž souvisí i jejich poměrně vysoké investiční a provozní náklady. Tato vedení bývají většinou dvojitá a provozují se jako okružní rozvod. Tvoří je holá ocelohliníková lana AIFe.

5.1.1.2 Vedení vn

Vedení vn (nejčastěji 22 kV a 35 kV) se využívají pro přenos elektrické energie do center její spotřeby, jako jsou obce, města a velkoodběratelé. Tato vedení dosahují kratších délek nežli vedení 110 kV, avšak jsou daleko hustější. Rovněž se u nich vyžaduje vysoká spolehlivost dodávky, ovšem ne tak velká, jak je tomu u vedení 110 kV. Provozují se převážně jako paprsková síť. Pro venkovní vedení vn se používají holé vodiče, jednoduché izolované vodiče a slané závěsné kabely. Dále uvedené informace jsou přebrány z podkladu [1].

a) Vodiče

Holé vodiče

Holé vodiče jsou základním typem proudovodného vodiče ve venkovních sítích vn. Standardně se používají lana AIFe - hliníkové slaněné s nosnou ocelovou duší, podle normy PN ZSNP 1/83, těchto typů: AIFe 42/7, AIFe 70/11-1, AIFe 110/22, pro hlavní vedení také AIFe 180/31. Z důvodu zvýšení přenosové schopnosti je přípustné u AIFe 110/22 zdvojení (svazkování) holých vodičů v jednotlivých fázích.

Jednoduché izolované vodiče vn

Jednoduché izolované vodiče vn jsou komprimovaná lana, slaněná z drátů z hliníkové slitiny, opatřená jednoduchou izolací. Protože tato izolace je pouze základní, jsou vedení s těmito vodiči považována z hlediska ochrany před nebezpečným dotykem živých částí za vedení bez ochrany. Venkovní vedení s izolovanými vodiči se proto konstruuje obdobně jako vedení s vodiči holými, pouze mezifázová vzdálenost vodičů je menší a ochranné pásmo vedení je stanoveno na 2 m od krajního vodiče. Svojí konstrukcí však vyžadují zvýšenou ochranu proti přepětí. V ČR se nejčastěji používají izolované vodiče o průřezech: 50 mm², 70 mm² a 120 mm².

Použití vedení vn s jednoduchými izolovanými vodiči:

- V místech se zvýšeným nebezpečím pádu stromů do vedení, umožňují kácení zúžených lesních průseků.
- Do míst, kde je požadavek na zúžení ochranného pásma. Bezpodmínečně nutné je však dodržet požadované vzdálenosti od budov, jež jsou větší, než ochranné pásmo vedení.
- Ve výjimečných a zdůvodněných případech lze izolovaná vedení budovat jako vícenásobná, např. jako vývody z rozvodu.

Slaněné závěsné kabely vn

Slaněné závěsné kabely vn jsou svazkované třížilové závěsné kabely s plnou izolací a stíněním, zavěšené pomocí nosného ocelového pozinkovaného lana. Nevyžadují další izolaci. Vzhledem k vyšší ceně tohoto zařízení bývají používány zpravidla pouze v těchto případech:

- V hustě zastavěných lokalitách, kde není možné přivést přípojku venkovního vedení k TS a řešení zemním kabelem je technicky nevhodné. V tomto případě je možné použít společné podpěry s izolovaným vedením nn.
- V místech, kde nelze z technických, ekologických, prostorových nebo jiných důvodů použít zemní kabel.
- Pro dočasné a havarijní odběry.
- Výjimečně při průchodu venkovního vedení v blízkosti jiných objektů nebo zalesněným prostorem.

b) Podpěrné body venkovních vedení vn

Jako podpěrné body venkovních vedení vn jsou používány betonové sloupy, příhradové stožáry, dřevěné sloupy a ocelové plechové sloupy, postavené za účelem umístění vodičů. Za podpěrné body venkovního vedení lze také považovat konstrukce stožárových trafostanic, objekty zděných trafostanic a rozvoden, portály rozvoden vvn/vn a budovy připojených objektů.

Podle druhu použití vedení musí být podpěrné body dimenzovány na zatížení, které na ně působí. Kromě výjimečných případů (zcela nepřístupná nebo zneprůstředněná místa, oplocené prostory rozvoden) není dovoleno používat trvalé kotvení podpěrných bodů. Kotvy lze použít pouze pro dočasná kotvení v průběhu stavby venkovního vedení.

Betonové sloupy

Betonové sloupy jsou základním a nejčastěji používaným typem podpěrného bodu. Používají se pro jednoduchá a dvojitá vedení všech průřezů a druhů vodičů. Podpěrné body mohou být z jednoho sloupu nebo zdvojené, složené ze dvou betonových sloupů s dvojnásobným dovoleným vrcholovým namáháním. Podle použití ve vedení se rozlišují na nosné, rohové, odbočné i koncové, a jsou podle toho také dimenzovány. Sloupy musí být opatřeny betonovým základem, navrženým podle typu betonového sloupu a únosnosti základové zeminy. Dovolené jsou betonové základy prstencové a válcové do vrtaných základových jam, deskové a hranolové do kopaných základových jam. Vrcholy sloupů musí být chráněny proti zatékání vody plastovými čepičkami. Na sloupy jsou montovány konzoly pro upevnění vodičů, příp. další zařízení, např. spínače.

Příhradové stožáry

Příhradové stožáry vyrobené podle příslušné normy jsou, vzhledem ke své konstrukci, určeny pro dvojnásobná a vícenásobná vedení holých a jednoduchých izolovaných vodičů. V jednoduchých vedeních se použijí v případě nutnosti umístění vyššího podpěrného bodu, nebo při vyšších vrcholových silách vodičů jako stožáry rohové, odbočné, křižovatkové, výztužné a koncové. Příhradový stožár vyrábějí výrobci podle zadané specifikace. Betonové základy se u příhradových stožárů budují monolitické blokové, v závislosti na typu příhradového sloupu a únosnosti základové zeminy. Součástí stožáru jsou konzoly pro upevnění vodičů, v typech podle normy a schváleného standardu materiálu. Na stožáry lze dále montovat další konstrukce – špičky zemnicího lana, pomocné konstrukce pro kabelové svody, konstrukce pro spínače apod. Všechny ocelové konstrukce by měly být chráněny před účinky koroze žárovým pozinkováním.

Dřevěné sloupy

Dřevěné sloupy se používají pro jednoduchá vedení všech průřezů a druhů vodičů, jako podpěrné body v místech těžko přístupných pro mechanizaci k postavení betonových sloupů, v chráněných krajinných oblastech a národních parcích, v obcích, kde požadují územní orgány dodržet ráz krajiny. Pro specifické vlastnosti (pružnost) je vhodné je používat v lesních průsecích. Dřevěné sloupy se používají jako jednoduché, nebo pro zvýšení vrcholových tahů jako dvojitě. Pro podpěrné body se používají dřevěné sloupy přímo vetknuté do země. Tyto

sloupy musí být při použití borové dřeviny hloubkově impregnované, při použití smrkové dřeviny bude přechodová část do země perforována a pata dodatečně impregnována kreosotovým olejem. Základy pro dřevěné sloupy vetknuté do země se používají podle typu a únosnosti základové zeminy jako válcové a hranolové. Základ se provádí kamenivem. Dřevěné sloupy na patky se používají pouze při opravách pro montáž na stávající nepoškozené železobetonové patky. Vrcholy sloupů se opatřují stříškami proti zatékání vody. Na sloupy jsou montovány konzoly pro upevnění vodičů, příp. další zařízení, např. spínače.

Ocelové plechové sloupy

Ocelové plechové sloupy se používají pro jednoduchá vedení všech typů vodičů v místech, kde není přístup pro mechanizaci, nutnou pro dopravu a stavbu betonových a dřevěných sloupů, a vzhledem ke své štíhlosti i pro výstavbu vedení vn v příměstských oblastech. Sloupy jsou podélně svařované z ocelového plechu. Mají konický tvar kruhového nebo mnohoúhelníkového průřezu. Ochrana proti korozi by měla být provedena žárovým pozinkováním. Výhodou ocelových plechových sloupů je nízká váha a vyšší životnost oproti dřevěným a betonovým sloupům. Připevnění armatur a konzol se provádí prošroubováním do předem připravených otvorů. Základy pro ocelové plechové sloupy se zhotovují obdobně jako u sloupů betonových.

c) Konzoly venkovních vedení vn

Konzoly pro venkovní vedení s holými a jednoduchými izolovanými vodiči vn na betonových, dřevěných a ocelových plechových sloupech musí odpovídat schválenému Standardu materiálu. Volba konfigurace vodičů a typu konzol je závislá na typu použitého vodiče.

Konzoly pro holé vodiče

Jednoduché vedení:

- rovinné uspořádání se třemi vodiči vedle sebe, vyložení krajního vodiče od osy vedení je cca 1,5 m,
- trojúhelníkové uspořádání s vyvýšeným středním vodičem v ose vedení (např. systémy Delta a Pařát), vyložení krajního vodiče od osy vedení je cca 0,8 až 1 m.

Pro výstavbu nových vedení v nových trasách je preferováno trojúhelníkové uspořádání.

Dvojitě vedení na příhradových stožárech - základní konfigurací je „soudek“, v odůvodněných případech (např. limitovaná výška vedení) je možný, při použití atypických konzol, systém dvou trojúhelníků, příp. všechny vodiče v rovině. Dvojitá vedení na betonových sloupech bývají typu „soudek“ s vodiči ve třech výškových rovinách. Max. vyložení krajního vodiče je 1,5 m (standardní systémy) nebo 0,8 m až 1 m (zúžené systémy).

Vícenásobná vedení (trojnásobná, čtyřnásobná) na příhradových stožárech jsou řešena pomocí atypických konstrukcí, buď „dvojitý soudek“, nebo 2x 6 vodičů pod sebou.

Konzoly pro jednoduché izolované vodiče

Minimální vzdálenost mezi jednoduchými izolovanými vodiči jak na konstrukci, tak i v rozpětí je 30 cm u napětí 22 kV a 40 cm u napětí 35 kV. V ČR se nejčastěji používají pro obě napěťové hladiny konzoly s jednotnou mezifázovou vzdáleností 50 cm.

Jednoduché vedení – základní konfigurace vodičů je rovinný systém při šířce vedení cca 1 m. Další možnou konfigurací jsou vodiče pod sebou, s variantami podpěrných izolátorů upevněných svisle na ramenech konzoly, nebo upevněných šikmo.

Dvojitě vedení – jednotlivá vedení mívají fázové vodiče vždy pod sebou. Základním předpokladem je, že vzdálenost mezi vodiči různých vedení bude větší, než mezi vodiči téhož vedení a že zvolená konfigurace systému bude dodržena v celé délce izolovaného vedení.

Konzoly pro slané závěsné kabely

Slané závěsné kabely se uchycují pomocí nosných a kotevních svorek, k jejichž připevnění na stožár se používají kotevní objímky, konzoly, příp. nástavce na betonové sloupy, které mohou sloužit i jako konstrukce pro připevnění souběžných izolovaných vedení nn.

d) Izolátory

Izolátory a izolátorové závěsy musí splňovat současně dvě základní funkce – mechanicky upevňují vodiče na konstrukci vedení a elektricky oddělují vodiče pod napětím od části vedení, kde napětí být nesmí (konzoly). Zásadním požadavkem na izolátory vn, podpěrné i závěsné je, že musí být neprůrazné.

Podpěrné izolátory

Podpěrné izolátory se používají pro holé i jednoduché izolované vodiče na podpěrných bodech nosných (v přímé trase) a rohových, do max. dovolené pevnosti izolátoru. Dále se použijí na vytvoření bezpečnostního závěsu holých vodičů a na připevnění různých šablon a propojení vodičů na stožárech.

Závěsné izolátory

Závěsné izolátory jsou určeny pro jednoduché nebo dvojitě nosné a kotevní závěsy, holých a izolovaných vodičů. Keramické závěsné izolátory jsou pro svoji větší hmotnost vhodné především pro nosné řetězce.

Plastové závěsné izolátory mají dřík ze skelného vlákna navinutého mnoha závitů do smyčky tvaru „∞“ a používají se především pro kotevní závěsy.

5.1.1.3 Vedení nn

Nejnižší hladina napětí používaná v naší rozvodné soustavě je 400 V. Vedení 400 V má omezené možnosti přenosu výkonu na určitou vzdálenost, která je zejména limitována úbytkem napětí na vedení. Nové venkovní sítě nn se budují zejména v malých obcích s řídkou zástavbou, u síťových výběžků a samot, či v případech, kde by se při pokládání zemních kabelů muselo počítat s velkými

technickými potížemi a bylo finančně náročné. Pro tato vedení se používají holé vodiče AlFe, izolované vodiče nebo závěsné kabely. Níže uvedené informace jsou přebrány z podkladu [2].

- Slaněné izolované vodiče se používají jako čtyři slaněné vodiče stejného průřezu s hliníkovým jádrem a s izolací z lineárního polyetylenu, které jsou stočené do svazku.
- Závěsné kabely používané pro venkovní sítě nn jsou zpravidla s hliníkovým jádrem s izolací žil a obalu z měkčeného PVC s nosným ocelovým lanem ve společném plášti PVC.
- Holé vodiče se používají hliníkové s nosným ocelovým lanem a v současnosti zpravidla pouze pro dílčí opravy a přeložky venkovních sítí nn. Při výstavbě nových a při celkových rekonstrukcích se holé vodiče použijí jen ve zdůvodněných případech, např. odbočky k samotám, kde lze zvolit dlouhá rozpětí.

Podpěrné body vedení nn

Sloupy pro výstavbu venkovních vedení se používají betonové, dřevěné a ocelové.

Betonové sloupy se používají z předpjatého odstředovaného betonu v rozsahu délek 9 až 13,5 m a dovolené vrcholové síly 3 až 20 kN. Podle účelu se používají jako nosné, rohové, odbočné i koncové pro jednoduchá nebo násobná vedení. Každý sloup bývá opatřen označovacím štítkem, na kterém jsou údaje výrobce, typ sloupu a datum výroby. Pod štítkem je ve stěně sloupu otvor pro protažení uzemnění. Betonové sloupy se používají jako jednoduché, nebo pro zvýšení vrcholových tahů jako dvojité typu D. Základy pro betonové sloupy se navrhují podle typu betonového sloupu a únosnosti zeminy. Jsou zhotovovány z betonové směsi. Pro sloupy s malými vrcholovými silami vyhovují základy vrtaných děr s prstencovými základy, pro sloupy s velkými vrcholovými silami se navrhují základy válcové a hranolové. Vrcholy sloupů se chrání proti zatékání vody plastovými čepíčkami. Nosné armatury se na sloupy připevňují svěrným spojením. Betonové sloupy tvoří v současné době rozhodující část ze všech podpěrných konstrukcí vedení nn.

Dřevěné sloupy se používají jako podpěry elektrických vedení v místech nepřístupných pro mechanizaci k postavení betonových sloupů, v místech chráněných krajinných oblastech a národních parcích, v obcích kde požadují územní orgány dodržet ráz krajiny. Pro dobré vlastnosti je vhodné je používat v lesních průsecích. Dřevěné sloupy se dělí na sloupy určené pro montáž na betonové patky a na sloupy určené pro montáž přímo do země. Dřevěné sloupy jsou charakterizované použitou dřevinou, způsobem impregnace, průměrem v čepu a délkou sloupu. Používané dřeviny a způsoby impregnace jsou shodné s dřevěnými sloupy pro vedení vn. Dřevěné sloupy se používají je v délkách 8 až 14 m v průměrech čepů 16 až 21 cm. Základy pro dřevěné sloupy vetknuté do země se používají podle typu a únosnosti zeminy jako válcové a hranolové. Základ se provádí kamenivem. Dřevěné sloupy na patky se používají v délkách 7 až 12 m v průměrech čepů 16 až 21 m. Dřevěné sloupy na patky se používají

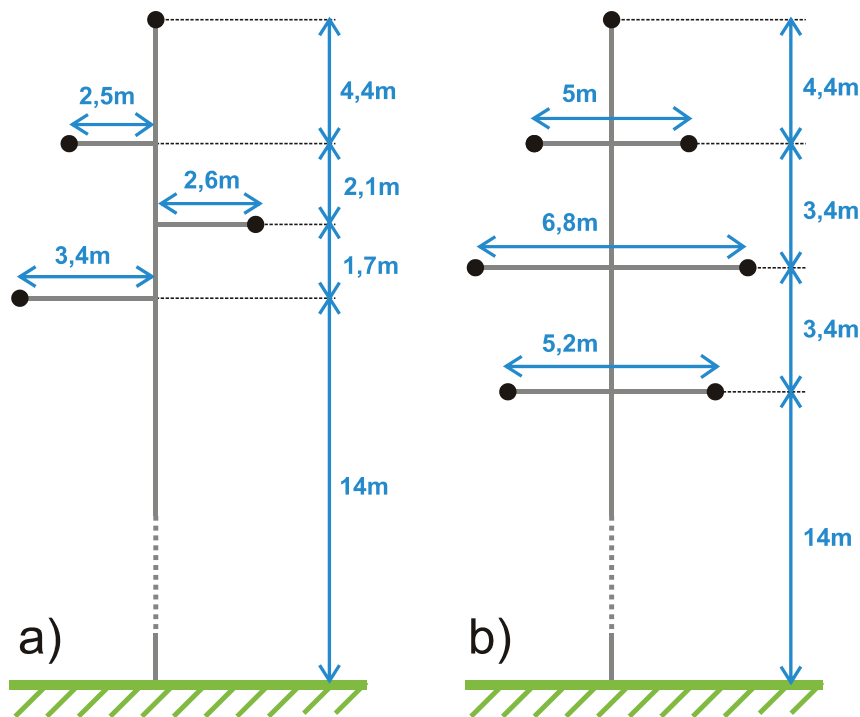
pouze při opravách pro montáž na stávající nepoškozené železobetonové patky. Dřevěné sloupy se používají jako jednoduché, nebo pro zvýšení vrcholových tahů jako dvojité typu D, U, Š, A. Vrcholy sloupů se opatřují stříškami proti zatékání vody.

Ocelové plechové sloupy se používají pro výstavbu elektrických vedení v příměstských oblastech a v místech kde není přístup pro mechanizaci. Sloupy jsou svařované z ocelového plechu. Mají konický tvar kruhového nebo mnohoúhelníkového průřezu. Ochrana proti korozi bývá provedena žárovým pozinkováním. Výhodou ocelových plechových sloupů je nízká váha a vysoká životnost. Proti dřevěným a betonovým sloupům je životnost více než dvojnásobná. Připevnění armatur se provádí prošroubováním svorníků otvory, které na základě specifikací zajistí výrobci. Charakteristické údaje ocelových plechových sloupů jsou normové zatížení, délka, průměr čepu, průměr paty. Základy pro ocelové plechové sloupy se zhotovují obdobně jako u sloupů betonových.

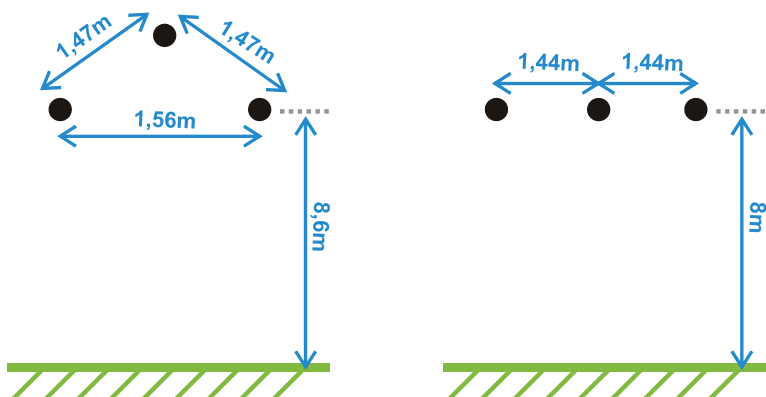
Střešníky jsou ocelové trubky upevněné do konstrukcí domů, používají se tam, kde je nutné zvýšit závěsnou výšku vodičů. V případě, že přenášejí vodorovné síly, zvyšuje se jejich stabilita vzpěrami a kotvami.

Konzoly jsou ocelové profily vetknuté do konstrukcí domů.

Střešníky a konzoly se využívají jako podpěrné body pouze pro přípojky k odběratelům. Hlavní vedení se na ně připevňuje jen ve výjimečných případech.



Obr. 5.1: Příklad uspořádání vodičů na vedení 110 kV: a) jednoduché vedení, b) dvojité vedení (soudok)



Obr. 5.2: Příklad uspořádání vodičů na vedení 22 kV pro trojúhelníkové a rovinné uspořádání

5.1.2 Parametry venkovních vedení vvn a vn

Pro výpočet potřebných parametrů každého typu vedení je nezbytná znalost technických i elektrických parametrů použitých vodičů, a také jejich vzájemné uspořádání. Příklady nejčastěji používaného uspořádání vodičů na vedení 110 kV a 22 kV jsou uvedeny na obrázcích Obr. 5.1 a Obr. 5.2.

Příklady parametrů užívaných vodičů či vedení v distribučních sítích české republiky jsou uvedeny pro příklad dále v následujících tabulkách [3].

Parametry venkovních vedení 110 kV používaných v ČR						
Provedení	Vodiče AlFe (mm ²)	Stožáry	R (Ω.km ⁻¹)	X (Ω.km ⁻¹)	B (μS.km ⁻¹)	I _d (A)
Jednoduché	150/6	Jednodřík	0,200	0,4165	2,744	400
	185/6	Jednodřík	0,156	0,4091	2,796	455
Dvojité	150/6	Soudek	0,200	0,4220	2,713	800
	185/6	Soudek	0,156	0,4143	2,766	910
	210/3	Soudek	0,130	0,4023	2,852	1 100
	240/6	Soudek	0,125	0,4070	2,817	1 060
	450/6	Soudek	0,065	0,3854	2,982	1 640
	670/8	Donau	0,042	0,3661	3,142	2 200

Tab. 5.1: Příklad parametrů používaných vedení 110 kV

Parametry hliníkových lan s ocelovou duší AlFe 6				
Jmenovitý průřez lana (mm ²)	Průměr lana (mm)	Hmotnost 1 km délky (kg)	Největší odpor 1 km délky (Ω)	Zaručená pevnost lana (N)
16	5,40	62,5	1,882	5250
25	6,75	97,6	1,205	8150
35	8,10	140,5	0,837	11450
50	9,60	197,3	0,596	15850
70	11,55	277,1	0,434	23200
95	13,35	370,9	0,319	30750
120	15,65	509,2	0,234	41900
150	17,25	619,4	0,193	50200
185	19,20	765,5	0,156	62300
210	20,43	868,7	0,137	69650
240	21,70	979,2	0,122	78300
300	24,20	1217,2	0,097	97250

Tab. 5.2: Příklad parametrů hliníkových lan s ocelovou duší AlFe6

Parametry hliníkových lan s ocelovou duší AlFe 4				
Jmenovitý průřez lana (mm ²)	Průměr lana (mm)	Hmotnost 1 km délky (kg)	Největší odpor 1 km délky (Ω)	Zaručená pevnost lana (N)
50	11,20	280,8	0,476	25000
70	12,60	355,4	0,376	31600
95	14,00	438,8	0,305	39000
120	15,75	555,3	0,241	49400
150	17,85	713,3	0,188	62750
185	19,60	860,0	0,156	74800
210	21,00	978,2	0,136	85900
240	22,55	1126,9	0,119	97100
300	25,65	1456,1	0,094	126950
350	27,20	1636,8	0,085	143350

Tab. 5.3: Příklad parametrů hliníkových lan s ocelovou duší AlFe4

Parametry hliníkových lan s ocelovou duší AlFe3				
Jmenovitý průřez lana (mm ²)	Průměr lana (mm)	Hmotnost 1 km délky (kg)	Největší odpor 1 km délky (Ω)	Zaručená pevnost lana (N)
35	9,35	195,3	0,803	18700
50	11,22	261,3	0,558	26450
70	13,30	395,1	0,514	36800
95	14,40	509,	0,397	49050
120	16,80	693,1	0,230	66750
150	18,00	795,6	0,201	76650
185	20,79	1003,7	0,156	95150
210	22,02	1125,2	0,139	105750
240	23,65	1298,1	0,121	122000
300	26,25	1642,1	0,093	155050
350	27,90	1855,3	0,081	173050

Tab. 5.4: Příklad parametrů hliníkových lan s ocelovou duší AlFe3

5.1.3 Kabelová vedení

Kabelová vedení nachází uplatnění tam, kde nelze z prostorových, bezpečnostních případně jiných důvodů (silná námrazová oblast, chemicky agresivní prostředí) použít vedení venkovní. Pořizovací náklady těchto vedení jsou oproti venkovním vedením podstatně vyšší. Kabelová vedení naší DS lze opět rozdělit na:

5.1.3.1 Vedení 110 kV

Tato vedení se díky vysokým investičním nákladům a jejich technické náročnosti používají ojediněle. Můžeme se s nimi setkat v oblastech, které je nutné zásobit velkými výkony, jedná se tedy především o velká města a průmyslové zóny. Umístění kabelového vedení 110 kV je realizováno převážně v kolektorech. Zřídka se vyskytují instalace kabelových vedení 110 kV ve volném terénu.

5.1.3.2 Vedení 22 kV

Vedení 22 kV jsou v největší míře zastoupeny v kabelových rozvodech velkých měst. Nejčastěji se provozují jako okružní síť. Jsou na ně kladeny velké nároky, co se týče pronikání vlhkosti. Kabely s polyetylenovou izolací lze dělit z hlediska opláštění a odolnosti proti vniknutí vody následovně [1].:

a) z hlediska opláštění kabelu na:

- jednoplášťový kabel,
- dvouplášťový kabel,

b) z hlediska bariéry proti vniku vody:

- standardní bariéra pod pláštěm – je vždy obsažena v každém provedení kabelu,
- přídatná bariéra v jádře kabelu – zvýšená ochrana proti podélnému vniknutí vody,
- vodotěsné provedení kabelu – zvýšená ochrana proti vniknutí tlakové vody.

Volba jednopláštěvého kabelu se základní bariérou proti vniku vody

Standardně používaný vn kabel je kabel s jedním pláštěm z lineárního polyetylénu s bariérou proti podélnému vniknutí vody pod pláštěm. Tento kabel se používá v těchto případech:

- pro uložení do země a netlakové spodní vody (hladina vodního sloupce je níže než 2 m, zjistí se geologickým průzkumem),
- pro přívod do první DTS od místa napojení na dvouplášťový kabel jdoucí z rozvodny vn,
- pro propojovací distribuční vedení mezi jednotlivými DTS (smyčkování bez protipožárního opatření v DTS),
- pro opravy poruch klasických kabelů (vývody na přechodové stožáry či sloupy, v trasách kabelových vedení).

Volba jednopláštěvého kabelu se zvýšenou bariérou proti vniku vody

Kabely v tomto provedení se standardně nepoužívají. Lze je použít pouze ve zdůvodnitelných případech.

Volba jednopláštěvého kabelu s vodotěsným provedením

Kabel v uvedeném provedení se používá jen v případě křížení vodního toku či uložení do zeminy, kde se vyskytuje tlaková spodní voda (hladina vodního sloupce vyšší než 2 m).

Volba dvouplášťového kabelu se základní bariérou proti vniku vody

Tento kabel má přídatný plášť z PVC, který mu zajišťuje odolnost proti šíření plamene. Proto se používá tam, kde hrozí nebezpečí šíření plamene v případě zahoření kabelu. Tyto případy jsou:

- v kolektorech,
- na propoje mezi TR 110/22, 35 kV a kobkami,
- vývody z kobek rozvodny vn k přechodovým stožárům,
- vývody z kobek rozvodny vn po první spojky kabelového vedení (napojení na jednopláštěvý kabel).

Dvouplášťový kabel se zvýšenou bariérou proti vniku vody či ve vodotěsném provedení se standardně nepoužívá.

5.1.3.3 Vedení 400 V

Vedení se jmenovitým napětím 400 V slouží k rozvodu elektrické energie od transformátorů 22/0,4 kV až do přípojkové skříně spotřebitele. Hlavní kabelová vedení nn se navrhují a provozují převážně jako okružní vedení, rozpojené na jednotlivé paprsky.

5.2. Transformátory

Transformátor je elektrický netočivý stroj, sloužící k přenosu elektrické energie mezi dvěma (nebo více) obvody střídavého proudu prostřednictvím střídavého magnetického pole. V elektroenergetické soustavě se transformátorů nejčastěji používá pro změny napětí v elektrických sítích, ale někdy se používá i pro galvanické oddělení propojených elektrických obvodů střídavého proudu.

Transformátory lze dělit podle :

- převodu – zvyšovací, snižovací, oddělovací,
- soustavy – jednofázové a vícefázové (obvykle trojfázové),
- chlazení – vzduchové (třída A), olejové (třída O),
- účelu – blokové, vlastní spotřeby, spojovací, průmyslové, distribuční, izolační, trakční.

Transformátor blokový - transformátor je v sérii s alternátorem. Používá se v elektrárnách, které nemají odběr přímo na alternátorovém napětí. Z hlediska počtu vinutí se používají transformátory dvouvinuťové nebo trojvinuťové (2 alternátory připojené na jeden transformátor) a z hlediska konstrukce se používají transformátory třífázové nebo jednofázové (3 jednotky).

Transformátor spojovací - spojuje dvě různé elektrické sítě o rozdílném napětí. Při transformaci vvn/vn se používá transformátorů trojfázových a při spojování soustav vvn transformátorů třífázových, jednofázových (3 jednotky + 1 záložní) nebo autotransformátorů.

Transformátory průmyslové distribuční nebo **transformátory vlastní spotřeby** napájí vnitřní rozvody objektů. Jsou to transformátory s výstupním napětím vn nebo nn, trojfázové.

Transformátory izolační - mají převod 1:1 a galvanicky oddělují výrobní zdroje od venkovních vedení, čímž je chrání proti atmosférickým přepětím nebo slouží ke snižování zkratových proudů.

Transformátory s příčnou regulací – speciální typ transformátoru, který posouvá fázi napětí. Hlavním přínosem takových transformátorů je ochrana vedení a transformátorů před tepelným přetížením a zlepšení stability přenosové soustavy. Tyto transformátory umožní řídit tok energie mezi jednotlivými sítěmi, u dlouhých souběhů venkovních vedení, nebo u paralelních kabelů. Transformátor posouvající fázi je navíc velmi často tím nejúspornějším řešením pro řízení toku energie.

5.2.1 Parametry transformátorů

5.2.1.1 Jmenovitý výkon

Jako jmenovitý výkon se zásadně udává zdánlivý výkon S_n [MVA, (kVA)], který vyjadřuje trvalou zatížitelnost transformátoru. Jmenovitý výkon je zdánlivý výkon, který do transformátoru vstupuje. Na straně výstupního vinutí je hodnota zdánlivého výkonu nižší vlivem ztrát transformátoru. Pro transformátory do 10 MVA doporučuje [8] volit hodnoty jmenovitého výkonu přednostně z řady čísel:

100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000.

Nejčastěji používané výkony transformátorů v české přenosové a rozvodné soustavě se vstupním napětím vvn jsou:

- 400/242 kV: 400; 630 [MVA]
- 400/121 kV: 200; 250; 330 [MVA]
- 220/121 kV: 200 MVA (3 x 66 MVA)
- 110/ 23 kV: 10; 16; 25; 40 [MVA]
- 110/6,3 kV: 31,5 [MVA].

Výkony uvedených transformátorů odpovídají spotřebě napájené oblasti se zahrnutím budoucího výhledu rozvoje.

Výkony blokových transformátorů jsou dány výkonem alternátoru a vlastní spotřeby bloku.

Výkony transformátorů vn/vn a vn/nn distribučních a průmyslových jsou určeny výpočtovým zatížením objektu, podrobnější popis výpočtu viz kapitola 4.2.4. Výkon běžných transformátorů vn/nn používaných v sítích je omezen na 1250 kVA pro výstupní síť o normalizovaném napětí 400 V a na 1600 kVA pro 500 V. Důvodem tohoto omezení je dimenzování rozváděčů nn s ohledem na účinky zkratových proudů.

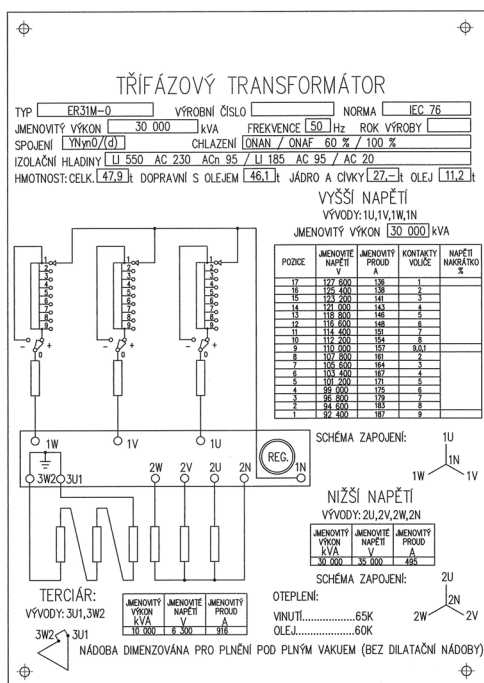
S_n [MVA]	16	25	40	63/31,5 /31,5	250	1 200
převod	110/23/6,3	110/23/6,3	110/23/6,3	110/6,3	400/121	420/24
u_k [%]	8,5	9	9	9/9/18	12,5	14
i_o [%]	2,2	2	1,8	1,7	1,6	1,3
ΔP_k [kW]	141	195	270	100/100 /200	650	750
ΔP_o [kW]	37	51	72	54	110	240

Tab. 5.5: Příklad parametrů vybraných transformátorů

5.2.1.2 Převod transformátoru

Převod transformátoru je dán poměrem závitů vyšší napěťové strany (vstupní) a nižší napěťové strany (výstupní). Označení "vstupní" a "výstupní" napětí jsou uvažována tak, že na vstupní straně je definováno napětí z normalizované řady. Ve většině případů transformátorů (výjimkou jsou transformátory blokové) toto označení vyjadřuje i směr toku činného výkonu. Převod je definován napěťovým údajem (ne počty závitů). Na výstupní straně jsou napětí vyšší, než udaná v normalizované řadě. Převod definuje stav naprázdno a je tedy nutné počítat s určitým poklesem napětí na výstupní straně při zatížení (viz 5.2.2).

Distribuční transformátory vvn/vn jsou realizovány jako regulační při zatížení. Na vinutí vyššího napětí jsou vyvedeny odbočky nejčastěji $\pm 8 \times 2\%$ od střední odpovídající jmenovitému převodu. Číslování odboček se obvykle provádí od nejnižší, odpovídající nejmenšímu počtu závitů vstupního vinutí a tím i nejmenšímu převodu. Číslo 9 má odbočka střední (viz Obr. 5.3). V závislosti na způsobu regulace je dále v technickém popisu regulačního transformátoru uvedeno také maximální zatížení nebo napětí krajních odboček.



Obr. 5.3: Ukázka transformátorového štítku – transformátor

110 $\pm$ 8x2%/35/6,3 kV

Distribuční transformátory vn/nn, se řeší jako regulační bez zatížení. Na vstupní vinutí jsou vyvedeny odbočky $\pm 2 \times 2,5\%$ od střední, případně i $\pm 5\%$. Odbočky je nutné mechanicky přepojit v beznapěťovém stavu transformátoru. Tato

regulace slouží k eliminaci úbytků napětí na dlouhých vedeních a ke srovnávání napěťových poměrů za transformátory různě vzdálenými od společného uzlu sítě (rozdávěče, rozvodny).

5.2.1.1 Ztráty transformátoru

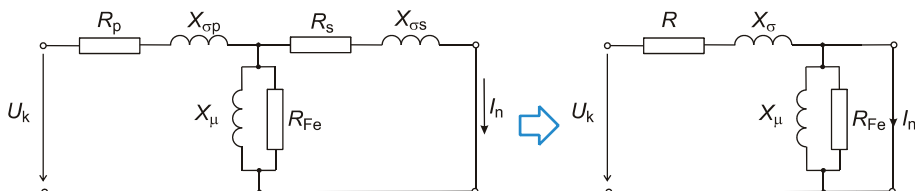
Jako každý stroj, má i transformátor ztráty. To znamená, že na vstupní stranu je nutné přivést větší výkon, než je odebrán na straně výstupní. Ztráty v transformátoru jsou:

Ztráty v železe, nazývané také ztráty naprázdno, označované ΔP_{Fe} nebo ΔP_o . Vznikají stálou změnou magnetického toku a závisí při konstantní frekvenci na velikosti napětí. Protože se napětí mění v poměrně malém rozmezí, jsou tyto ztráty v železe prakticky stálé a nezávisí na zatížení transformátoru. S těmito ztrátami je nutno počítat ať se jedná o transformátor naprázdno nebo zatížený.

Ztráty ve vinutí, nazývané také ztráty nakrátko, označované ΔP_{Cu} nebo ΔP_k . Vznikají průchodem proudu vinutím a jsou tedy pro jednu fázi rovny $R_{Cu}I^2$. Z toho tedy vyplývá, že se zvyšujícím se zatížením se ztráty nakrátko kvadraticky zvyšují.

5.2.1.2 Napětí nakrátko

Napětí nakrátko U_k je velikost napětí na vstupní straně transformátoru při spojení výstupní strany transformátoru nakrátko, přitom velikost proudu výstupní strany je stejná jako velikost jmenovitého proudu I_n této strany vinutí (viz Obr. 5.4). Hodnota napětí nakrátko se udává v procentech jmenovité hodnoty napětí U_n a označuje se u_k . U transformátorů nad 10 MVA je obvykle blízké 10 %, u menších transformátorů je menší než 10 %. Pro náhradní obvod transformátoru se v teorii elektrických strojů obvykle používá „T“ článek. Pro většinu úloh v elektroenergetice je tento způsob nevýhodný neboť zavádí do náhradního schématu další uzel. Častěji se proto používá pro náhradní schéma transformátoru „I“ článek (Obr. 5.4), pro který platí, že $R = R_p + R_s$ a $X_\sigma = X_{\sigma p} + X_{\sigma s}$.



Obr. 5.4: Zjednodušené náhradní schéma transformátoru nakrátko

V poměrných hodnotách platí rovnost mezi napětím nakrátko a podélnou impedancí transformátoru (při zanedbání proudu příčnou admitancí), viz vztah (5.1).

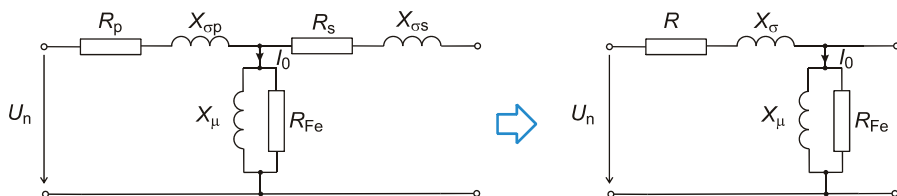
$$\begin{aligned}
 u_k &= \frac{\sqrt{3}U_k}{U_n} = \frac{\sqrt{R^2 + X_\sigma^2}}{U_n} \sqrt{3}I_n = \\
 &= \frac{\sqrt{R^2 + X_\sigma^2}}{Z_n} = \sqrt{r^2 + x^2} = z
 \end{aligned}
 \tag{5.1}$$

kde $r = \frac{R}{Z_n} = \frac{\sqrt{3}I_n}{U_n} R = \frac{3I_n^2 R}{\sqrt{3}I_n U_n} = \frac{\Delta P_k}{S_n}$ je poměrná hodnota odporu vinutí transformátoru,

$x = \frac{X_\sigma}{Z_n} = \frac{I_n}{\sqrt{3}U_n} X_\sigma = \sqrt{z^2 - r^2}$ je poměrná hodnota rozptylové reaktance transformátoru.

5.2.1.3 Proud naprázdno

Obdobně jako předchozí údaj – napětí nakrátko – je i proud naprázdno udáván v procentech a označuje se i_0 . Proud naprázdno je velikost proudu procházejícího transformátorem při výstupní straně rozpojené (naprázdno) a při jmenovitém napětí na vstupní straně U_{1n} (viz Obr. 5.5).



Obr. 5.5: Zjednodušené náhradní schéma transformátoru naprázdno

V poměrných hodnotách platí rovnost mezi proudem naprázdno a příčnou admitancí transformátoru (při zanedbání úbytku napětí na podélné impedanci), protože

$$i_0 = \frac{I_0}{I_n} = \frac{U_n \sqrt{G_{Fe}^2 + B_\mu^2}}{\sqrt{3}I_n} = \sqrt{g^2 + b^2} = y
 \tag{5.2}$$

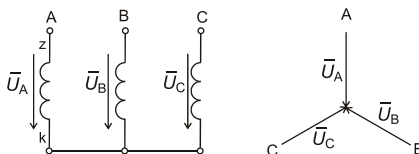
kde $g = \frac{Z_n}{R_{Fe}} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n R_{Fe}} = \frac{U_n^2}{\sqrt{3}I_n U_n R_{Fe}} = \frac{\Delta P_0}{S_n}$ je poměrná hodnota příčné vodivosti transformátoru,

$$b = \frac{Z_n}{X_\mu} = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_n X_\mu} = \sqrt{y^2 - g^2}$$
 je poměrná hodnota magnetizační susceptance transformátoru.

5.2.1.4 Spojení vinutí

Vinutí fází při trojfázové soustavě lze uspořádat do hvězdy, trojúhelníka nebo lomené hvězdy. V těchto uspořádáních se může spojit nezávisle jak vinutí fází vstupních, tak i výstupních.

Při spojení vinutí do hvězdy (vinutí s vyšším napětím má symbol Y, vinutí s nižším napětím y) se spojí konce (k) fází dohromady a vytvoří uzel (nazývá se také nulový, příp.střední bod). Začátky fází (z) se vyvedou ke svorkám - Obr. 5.6.

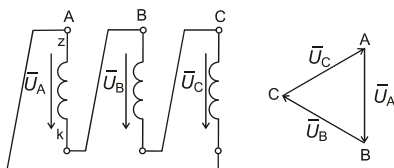


Obr. 5.6: Spojení vinutí transformátoru do hvězdy

Přednosti spojení vinutí do hvězdy spočívají v:

- hospodárnosti pro vyšší hodnoty napětí,
- možnosti využití nulového (středního) bodu vinutí k jeho přímému uzemnění, nebo uzemnění přes impedanci,
- možnosti umístění odboček vinutí a přepínače odboček u konce vinutí každé fáze (u středního bodu),
- možnosti jednofázového zatížení proudem v nulovém bodě.

Při spojení do trojúhelníku (symboly D,d) se konec jedné fáze spojí se začátkem fáze sousední. Spojky sousedících fází se vyvedou ke svorkám (A ,B, C), viz Obr. 5.7.



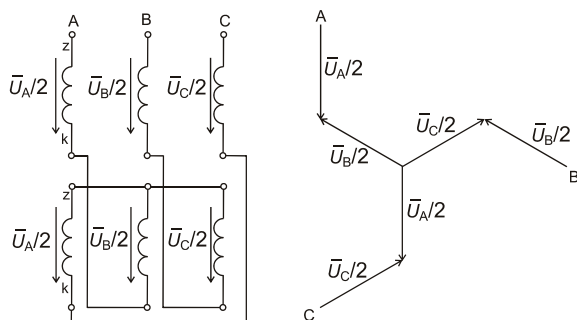
Obr. 5.7: Spojení vinutí transformátoru do trojúhelníka

Tento typ vinutí:

- je hospodárnější pro vinutí s nižšími hodnotami napětí a velkými proudy,

- zmenšuje v kombinaci s vinutím do hvězdy netočivou impedanci tohoto vinutí.

Při spojení do lomené hvězdy (symboly Z,z) se vinutí fází skládá ze dvou polovin na různých sloupcích. Začátky horních polovin vinutí jednotlivých fází se vyvedou ke svorkám, kdežto začátky spodních polovin vinutí se vzájemně spojí do uzlu. Konce obou polovin fází se spojí způsobem patrným z Obr. 5.8, kde je též fázorový diagram napětí. Vinutí spojené do lomené hvězdy potřebuje pro totéž napětí o 15 % více závitů, než vinutí spojené do hvězdy. Jeho výhodou je, že zmenšuje nerovnost napětí v soustavách s nerovnoměrným zatížením jednotlivých fází.



Obr. 5.8: Spojení vinutí transformátoru do lomené hvězdy

U **spojení Yy** je jak vstupní, tak i výstupní vinutí spojeno do hvězdy, je výrobně levnější. Při vyvedení uzlu poskytuje dvojí napětí (fázové a sdružené). Transformátor s tímto spojením vinutí ale není vhodný pro nesouměrné zatížení, tj. nestejně zatížení jednotlivých fází. Nehodí se tedy pro světelné sítě, kde nesouměrnost zatížení je větší než 20 % [6]. Je však vhodný tam, kde jsou fáze stejně zatížené; např. jde-li o síť zatíženou převážně trojfázovými motory. V ČR se používá tohoto způsobu při transformaci 110kV/vn.

U **spojení Dy** je vinutí vyššího napětí spojeno do trojúhelníku, vinutí nižšího napětí do hvězdy. Je dražší než předcházející spojení, poněvadž vinutí D potřebuje o 73 % více závitů a to lépe izolovaných než vinutí do Y (při stejném napětí). Vinutí nižšího napětí spojené do y umožňuje při vyvedení uzlu použít jak fázového tak i sdruženého napětí. Snáší dobře nestejně zatížení jednotlivých fází. Od výkonu 315 kVA výše je nejvýhodnějším transformátorem pro světelné sítě. V ČR se používá tohoto způsobu při transformaci vn/400/230 V.

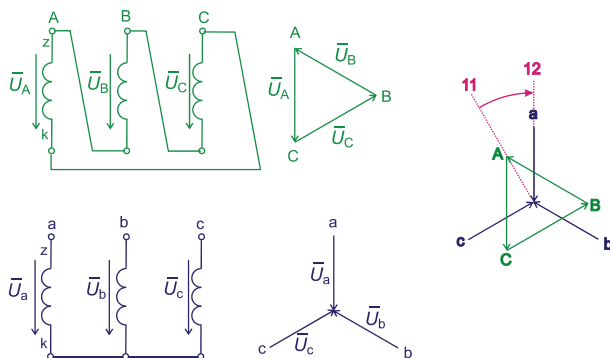
Spojení Yz má vinutí vyššího napětí do hvězdy a vinutí nižšího napětí do lomené hvězdy. Snáší nestejně zatížení jednotlivých fází, avšak má při nesouměrném zatížení nestejná napětí jednotlivých fází. Je dražší než spojení Yy. Používá se ho často ve světelných sítích, ale jen do výkonu 315 kVA. Ztráty v mědi jsou u transformátoru Yz asi o 10 až 15 % vyšší než u spojení Yy.

Spojení Yd má vinutí vyššího napětí do hvězdy, vinutí nižšího napětí do trojúhelníka. Používá se jako blokový transformátor. Ostatních spojení, to jest spojení Dd, Dz atd. se používá v praxi velmi zřídka.

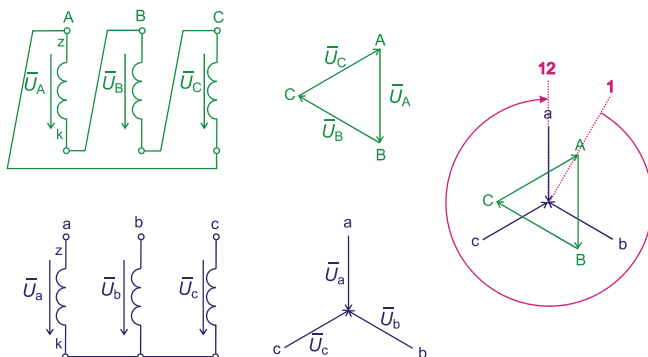
Pro transformátory vvn/vvn a vvn/vn se také používá **spojení Yyd**, kde třetí vinutí do trojúhelníka slouží pro kompenzaci nesymetrie. Je řešeno na úrovni napětí vn, dosti často je nevyužito. Někdy je přes něj napájena vlastní spotřeba elektrické stanice nebo je na ně připojen kompenzátor.

5.2.1.5 Hodinový úhel

Hodinovým úhlem se vyjadřuje posun fázového napětí sekundární strany transformátoru vůči fázovému napětí strany primární. Úhel se uvažuje vždy ve směru hodinových ručiček a vyjadřuje se celým číslem – násobkem úhlu 30° , tj. úhlu jedné hodiny. Jako příklad jsou na Obr. 5.10 a Obr. 5.9 uvedeny dva nejčastěji používané způsoby zapojení distribučních transformátorů vn/nn – Dyn1 a Dyn11, přičemž uzel sekundárního vinutí je přímo uzemněn.



Obr. 5.9: Transformátor Dy1



Obr. 5.10: Transformátor Dy11

5.2.2 Úbytek napětí na transformátoru

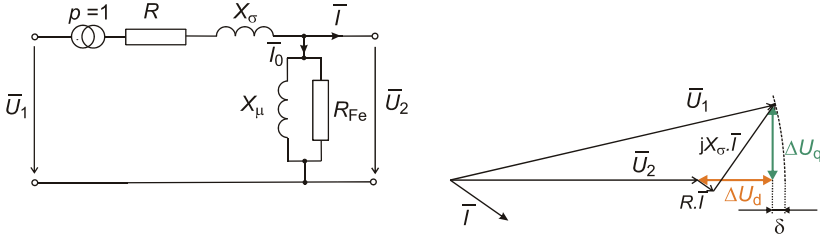
Úbytek napětí na transformátoru se určí podle Obr. 5.11 jako rozdíl velikosti napětí na primární straně transformátoru a velikosti napětí na sekundární straně transformátoru přepočítané pomocí jmenovitého převodu na primární stranu - viz vztah (5.3).

$$\Delta U = U_1 - U_2 \quad (5.3)$$

kde U_1 je velikost napětí na primární straně transformátoru

U_2 je velikost napětí sekundární strany přepočtená na primární stranu

Pro odvození budeme vycházet z náhradního schématu a fázorové diagramu na Obr. 5.11, kde uvažujeme převod transformátoru $p = 1$ a velikost proudu naprázdno $I_0 = 0$.



Obr. 5.11: Úbytek napětí na transformátoru

Poměrnou hodnotu úbytku napětí obdržíme vydělením rovnice (5.3) velikostí napětí na sekundární straně U_2

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_2} = \frac{U_1 - U_2}{U_2} = \frac{U_1}{U_2} - 1, \quad (5.4)$$

kdy velikost napětí U_1 lze vyjádřit podle Obr. 5.11 jako

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_q^2}, \quad (5.5)$$

kde $U_2 = \frac{U_{n2}}{\sqrt{3}}$ je nominální fázové napětí sekundární strany,

$$\Delta U_d = R.I. \cos \varphi + X_\sigma.I \sin \varphi,$$

$$\Delta U_q = X_\sigma.I \cos \varphi - R.I. \sin \varphi,$$

I je velikost proudu zatížení transformátoru.

Potom poměr napětí U_1 a U_2 v rovnici (5.5) bude

$$\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{(U_2 + \Delta U_d)^2}{U_2^2} + \frac{\Delta U_q^2}{U_2^2}} = \sqrt{1 + 2.\Delta u_d + \Delta u_d^2 + \Delta u_q^2}, \quad (5.6)$$

$$\text{kde } \Delta u_d = \frac{\Delta U_d}{U_2} = \frac{RI \cos \varphi}{U_2} + \frac{X_\sigma I \sin \varphi}{U_2},$$

$$\Delta u_q = \frac{\Delta U_q}{U_2} = \frac{X_\sigma I \cos \varphi}{U_2} - \frac{RI \sin \varphi}{U_2}.$$

Úpravou výrazů pro Δu_d a Δu_q dostaneme

$$\Delta u_d = \frac{RI_n \sqrt{3}}{U_n} \frac{I}{I_n} \cos \varphi + \frac{X_\sigma I_n \sqrt{3}}{U_n} \frac{I}{I_n} \sin \varphi, \quad (5.7)$$

$$\Delta u_d = ri \cos \varphi + xi \sin \varphi,$$

$$\Delta u_q = xi \cos \varphi - ri \sin \varphi. \quad (5.8)$$

Hodnoty r a x lze určit tak, jak je uvedeno v 5.2.1.2.

Odmocninu v rovnici (5.6) lze řešit pomocí Taylorova rozvoje

$$\sqrt{1+y} = 1 + \frac{1}{2}y - \frac{1}{8}y^2 + \frac{1}{48}y^3 \dots \text{pro } |y| \leq 1, \quad (5.9)$$

kde za hodnotu y dosadíme

$$y = 2\Delta u_d + \Delta u_d^2 + \Delta u_q^2 \quad (5.10)$$

a použijeme-li pouze první tři členy z rozvoje, lze výraz (5.6) přepsat na

$$\frac{U_1}{U_2} = 1 + \frac{1}{2}(2\Delta u_d + \Delta u_d^2 + \Delta u_q^2) - \frac{1}{8}(2\Delta u_d + \Delta u_d^2 + \Delta u_q^2)^2 \quad (5.11)$$

a poměrný úbytek napětí bude

$$\begin{aligned} \Delta u = \Delta u_d + \frac{1}{2}\Delta u_q^2 - \frac{1}{2}\Delta u_d^3 - \frac{1}{2}\Delta u_d\Delta u_q^2 - \dots \\ - \frac{1}{4}\Delta u_d^2\Delta u_q^2 - \frac{1}{8}\Delta u_d^4 - \frac{1}{8}\Delta u_q^4 \end{aligned} \quad (5.12)$$

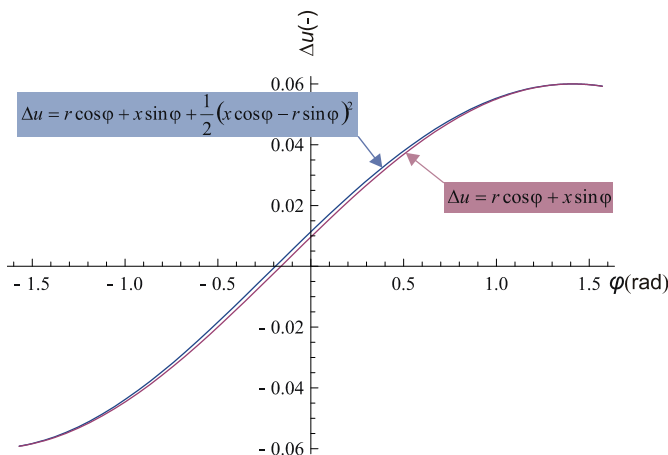
Pro výpočet úbytku napětí se obvykle používají pouze první dva členy součtu (5.12) do kterých dosadíme z (5.7) a (5.8)

$$\begin{aligned} \Delta u = \Delta u_d + \frac{1}{2}\Delta u_q^2 \\ \Delta u = ri \cos \varphi + xi \sin \varphi + \frac{1}{2}(xi \cos \varphi - ri \sin \varphi)^2. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Při jmenovitém zatížení $I = I_n$ bude $i = 1$ a výraz pro poměrnou hodnotu úbytku napětí můžeme zjednodušit dle rovnice (5.14).

$$\Delta u = r \cos \varphi + x \sin \varphi + \frac{1}{2} (x \cos \varphi - r \sin \varphi)^2. \quad (5.14)$$

Na příkladu výpočtu úbytku napětí na transformátoru s parametry $S_n = 2500$ kVA, $\Delta P_k = 24$ kW, $u_k = 6\%$ (Obr. 5.12) můžeme vidět, jaké chyby δ se ve výpočtu dopustíme, pokud budeme uvažovat, že $\Delta u = u_d = r \cos \varphi + x \sin \varphi$. Chyba je zobrazena pro jmenovité zatížení transformátoru v rozsahu úhlu mezi proudem a napětím od $\varphi = -90^\circ$ (kapacitní zátěž) až po $\varphi = 90^\circ$ (induktivní zátěž).



Obr. 5.12: Chyba Δu – hodnota δ - v závislosti na charakteru zatížení

5.2.3 Stanoviště transformátorů

Provedení stanoviště transformátoru závisí na velikosti a provedení transformátoru a na okolním zařízení. Podle provedení rozeznáváme transformátory suché se silikonovou izolací, které se používají převážně v průmyslu a lze je umísťovat přímo do skříní ve výrobních halách. Jsou to transformátory vn/nn.

Větší skupinu tvoří transformátory olejové, které lze umísťovat do skříňových rozváděčů s olejovou jímkou, do transformátorových komor, na venkovní stanoviště a na stožáry. Takto jsou řešeny všechny transformátory vvn/vvn, vvn/vn, vn/vn a v převážné většině vn/nn.

Transformovna musí být umísťována tak, aby neohrozila bezprostřední kontaminací podzemních a povrchových vod (vodotečí, nádrží, rybníků) ani studní a to i v případě havárie transformátoru. Transformovnu nelze umísťovat v 1. a 2. hygienickém pásmu ochrany vodních zdrojů. Umístění transformovny musí být odsouhlaseno příslušným hygienikem dané oblasti.

5.2.3.1 Umístění v transformátorových komorách

Vnitřní olejové transformátory se umísťují s ohledem na požární bezpečnost do samostatných větracích komor, jejichž stěny, strop a dveře jsou z nehořlavého materiálu. Transformátorové komory se řeší tak, aby plameny, plyny apod. při havárii transformátoru neznemožnily používání schodišť a východu. Komory se umísťují na severní, příp. východní stranu budovy, aby na větrání působily co nejméně sluneční paprsky. Dimenzují se nejméně pro transformátory 400 kVA.

5.2.3.2 Chlazení transformátorů umístěných v komorách

Větrání v transformátorových komorách může být provedeno buď přirozeným tahem nebo umělé. V obou případech je transformátor v komoře umístěn tak, aby byl v proudu chladicího vzduchu. Otvor pod transformátorem se provádí pokud možno stejný nebo menší než je půdorys transformátoru. Vývod ohřátého vzduchu z komory se umísťuje do nejvyšší části, pokud možno v protilehlém směru vstupního vzduchu.

5.2.3.3 Venkovní transformátory

Stanoviště venkovních transformátorů sestává z betonového základu, jehož výška závisí na způsobu dopravy transformátoru. Je opatřeno jámkou nebo šterkovým ložem pro zachycení popř. odvedení oleje. Půdorysné rozměry jámky musí přesahovat na všech stranách půdorys transformátoru asi o 1 m.

V distribučních sítích jsou transformátory vn/nn často umísťovány na koncovém stožáru vedení vn.

5.2.3.4 Výpočet chlazení transformátoru

Potřebné množství větracího vzduchu M [kg.s⁻¹] je určeno z rovnice tepelné bilance na základě chladicího výkonu, který je podle [10]

$$P_{ch} = 0,6P_z = M \cdot c \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1). \quad (5.15)$$

Toto množství vzduchu musí procházet vstupním otvorem S_1 [m²] do trafokomory a platí tedy

$$M = S_1 v_1 \rho_1 = S_1 \sqrt{2\Delta p_p \rho_1} = S_1 \sqrt{2(\rho_1 - \rho_s) \frac{h}{2} g \rho_1}, \quad (5.16)$$

kdy rychlost proudění vzduchu v místě vstupního otvoru v_1 [m.s⁻¹] závisí na účinném přetlaku v trafokomoře a hustotě vzduchu ρ_1 [kg.m⁻³], jak je patrné z Obr. 5.13.

$$\frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = \Delta p_p = (\rho_1 - \rho_s) \frac{h}{2} g \quad \Rightarrow \quad v_1 = \sqrt{\frac{2\Delta p_p}{\rho_1}}, \quad (5.17)$$

dosazením za M do rovnice (5.15) dostaneme výsledný vztah (5.18) pro výpočet minimální plochy vstupního větracího otvoru.

$$S_1 \geq \frac{0,6P_z}{c(\vartheta_2 - \vartheta_1) \sqrt{2(\rho_1 - \rho_s) \frac{h}{2} g \rho_1}} . \quad (5.18)$$

Stejně musí být určena i velikost výstupního otvoru

$$M = S_2 v_1 \rho_2 = S_2 \sqrt{2 \Delta p_p \rho_2} = S_2 \sqrt{2(\rho_1 - \rho_s) \frac{h}{2} g \rho_2} , \quad (5.19)$$

$$S_2 \geq \frac{0,6P_z}{c(\vartheta_2 - \vartheta_1) \sqrt{2(\rho_1 - \rho_s) \frac{h}{2} g \rho_2}} . \quad (5.20)$$

V praxi se dále ještě používá úpravy výše uvedených vztahů tzv. výtokovým součinitelem μ pro zahrnutí vlivu použitého krytí vstupního a výstupního otvoru žaluziemi nebo pletivem

$$\mu_1 S_1 \geq \frac{0,6P_z}{c(\vartheta_2 - \vartheta_1) \sqrt{2(\rho_1 - \rho_s) \frac{h}{2} g \rho_1}} , \quad (5.21)$$

$$\mu_2 S_2 \geq \frac{0,6P_z}{c(\vartheta_2 - \vartheta_1) \sqrt{2(\rho_1 - \rho_s) \frac{h}{2} g \rho_2}} , \quad (5.22)$$

kde S_1, S_2 je průřez vstupního a výstupního větracího otvoru, šachty, kanálu [m^2],

h je sací výška – rozdíl ve výšce větracích otvorů [m],

M je množství chladícího vzduchu [kg/s],

ΔP_z jsou ztráty transformátoru v hodině maximálního zatížení [W],

$\vartheta_p = 60^\circ\text{C}$ je přípustná povrchová teplota transformátoru,

$\vartheta_1 = 25^\circ\text{C}$ je teplota nasávaného vzduchu,

$\vartheta_s = \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{2} = 35^\circ\text{C}$ je střední maximálně přípustná teplota vzduchu v komoře,

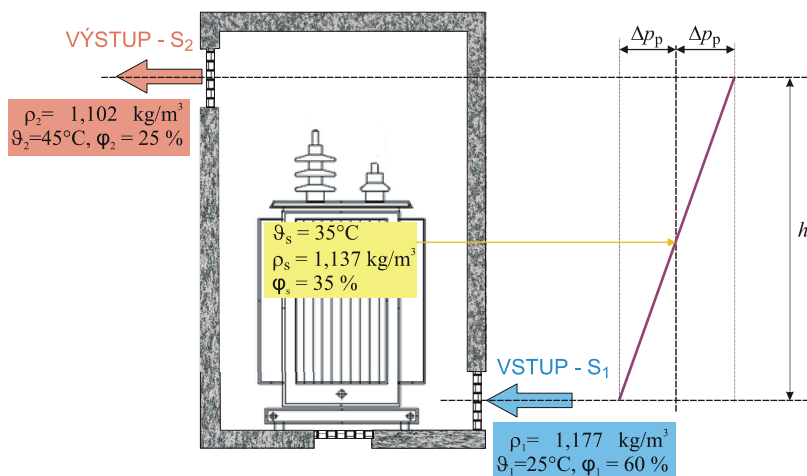
$\vartheta_2 = 45^\circ\text{C}$ je teplota výstupního vzduchu,

ρ_1, ρ_s, ρ_2 je hustota vzduchu – uvažuje se:

$\rho_1 = 1,177 \text{ kg/m}^3$ při $\vartheta_1 = 25^\circ\text{C}$ a $\varphi_1 = 60 \%$,

$\rho_s = 1,137 \text{ kg/m}^3$ při $\vartheta_s = 35^\circ\text{C}$ a $\varphi_s = 35 \%$,

$\rho_2 = 1,102 \text{ kg/m}^3$ při $\vartheta_2 = 45^\circ\text{C}$ a $\varphi_2 = 25 \%$,
 $c = 1010 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ je specifické teplo vzduchu.



Obr. 5.13: Profil transformátorové komory

5.3. Provoz transformátorů

5.3.1 Krátkodobé přetížení transformátoru

Pro stanovení krátkodobého přetížení transformátorů lze použít provozních grafů Obr. 5.14, které vyjadřují závislost počátečního poměrného zatížení $K_1 = S_1/S_n$ a dovoleného poměrného přetížení $K_2 = S_2/S_n$, parametrem jednotlivých křivek je doba trvání přetížení t v hodinách. Konkrétní aplikaci je možné vidět na následujících příkladech.

Olejový transformátor o výkonu $S_n = 1250 \text{ kVA}$ je zatížen výkonem $S_1 = 750 \text{ kVA}$. Jakým výkonem S_2 může být přetěžován po dobu 4 hodiny, jestliže teplota okolí je $\vartheta_o = 20^\circ\text{C}$.

$$K_1 = \frac{S_1}{S_n} = 0,6 \quad \text{a} \quad t = 4 \text{ hod} \quad \rightarrow$$

$$\rightarrow K_2 = 1,29 \quad \Rightarrow \quad S_2 = K_2 \cdot S_n = 1612 \text{ kVA}$$

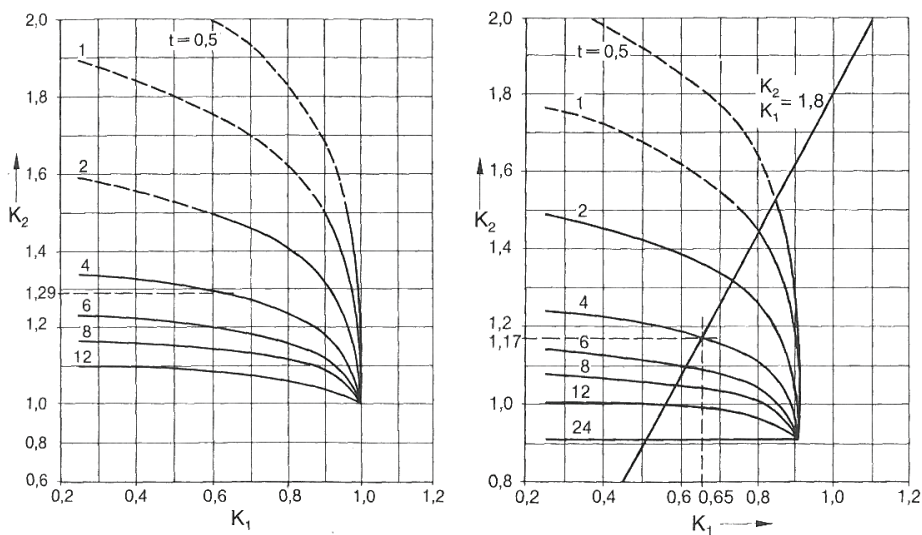
Jaký jmenovitý výkon transformátoru je vhodné zvolit pro provoz, ve kterém se předpokládá trvalé zatížení 250 kVA s dočasným zatížením 450 kVA po dobu 4 hodiny. Volíme olejový transformátor pracující při teplotě okolí $\vartheta_o = 30^\circ\text{C}$. $S_1 = 250 \text{ kVA}$, $t_1 = 20 \text{ hod}$, $S_2 = 450 \text{ kVA}$, $t_2 = 4 \text{ hod}$.

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{K_2}{K_1} = \frac{450}{250} = 1,8$$

Z průsečíku přímky $K_2=1,8K_1$ s křivkou o parametru 4 (viz Obr. 5.14b) odečteme hodnoty K_1 a K_2

$$S_n = \frac{S_1}{K_1} = \frac{S_2}{K_2} = \frac{250}{1,17} = \frac{450}{0,65} = 385 \text{ kVA} \rightarrow 400 \text{ kVA}$$

je hodnota z řady jmenovitých výkonů.



Obr. 5.14: Graf přetížení transformátoru s olejovým chlazením a) pro teplotu okolí $\vartheta_o = 20^\circ\text{C}$, b) pro teplotu okolí $\vartheta_o = 30^\circ\text{C}$ [10]

5.3.1.1 Paralelní chod transformátorů

Pro paralelní chod transformátorů je nezbytné, aby byly shodné v následujících parametrech:

- napětí nakrátko,
- převod a přibližně stejný rozsah odboček,
- hodinový úhel.

Důsledkem nedodržení podmínek paralelního chodu je nerovnoměrné zatížení transformátorů ve skupině a tím i omezení přenášeného výkonu. S ohledem na to je účelné dodržovat některá další ustanovení:

- při paralelním chodu transformátorů s rozdílným napětím nakrátko má skupina přenést alespoň 95% součtového výkonu,
- nespojovat k paralelní spolupráci transformátory, jejichž výkon se liší více než 1 : 2,

- transformátor s menším výkonem má mít poněkud větší napětí nakrátko,
- rozdíl v převodu způsobený rozdílným rozsahem odbočky by neměl překročit $\pm 0,5\%$.

Rozdíl v napětí nakrátko

Jak se projeví nedodržení stejného napětí nakrátko u_k ukážeme na příkladu paralelního spojení tří paralelně pracujících transformátorů s těmito štítkovými hodnotami: $S_{n1} = 100 \text{ kVA}$, $u_{k1} = 4\%$, $S_{n2} = 250 \text{ kVA}$, $u_{k2} = 6\%$, $S_{n3} = 500 \text{ kVA}$, $u_{k3} = 4,5\%$

Podle I. a II. KZ v obvodu se třemi paralelními impedancemi Z_1 , Z_2 , Z_3 platí

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \rightarrow \frac{U}{Z} = \frac{U}{Z_1} + \frac{U}{Z_2} + \frac{U}{Z_3} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{U}{u_{k\Sigma} Z_n} = \frac{U}{u_{k1} Z_{n1}} + \frac{U}{u_{k2} Z_{n2}} + \frac{U}{u_{k3} Z_{n3}},$$

a dalším dosazením za impedance obdržíme

$$\frac{U}{u_{k\Sigma} Z_n} = \frac{U}{u_{k1} Z_{n1}} + \frac{U}{u_{k2} Z_{n2}} + \frac{U}{u_{k3} Z_{n3}},$$

kde za hodnoty nominálních impedancí Z_n jednotlivých transformátorů dále dosadíme $Z_n = \frac{S_n}{U_n^2}$ a po vykrácení $U = U_n$ dostaneme

$$\frac{\sum_1^3 S_{ni}}{u_{k\Sigma}} = \frac{S_{n1}}{u_{k1}} + \frac{S_{n2}}{u_{k2}} + \frac{S_{n3}}{u_{k3}},$$

$$u_{k\Sigma} = \frac{\sum_1^3 S_{ni}}{\frac{S_{n1}}{u_{k1}} + \frac{S_{n2}}{u_{k2}} + \frac{S_{n3}}{u_{k3}}} = \frac{S_{n1} + S_{n2} + S_{n3}}{\frac{S_{n1}}{u_{k1}} + \frac{S_{n2}}{u_{k2}} + \frac{S_{n3}}{u_{k3}}}.$$

Poměrné napětí nakrátko reprezentující skupinu paralelních transformátorů

bude $u_{k\Sigma} = \frac{100 + 250 + 500}{\frac{100}{4} + \frac{250}{6} + \frac{500}{4,5}} = 4,78\%$ a celkové zatížení se rozdělí v poměru

impedancí jednotlivých transformátorů:

$$S_{n1}u_{k\Sigma} = S_1u_{k1} \Rightarrow S_1 = S_{n1} \frac{u_{k\Sigma}}{u_{k1}} = 120\text{kVA},$$

$$S_{n2}u_{k\Sigma} = S_2u_{k2} \Rightarrow S_2 = S_{n2} \frac{u_{k\Sigma}}{u_{k2}} = 199\text{kVA},$$

$$S_{n3}u_{k\Sigma} = S_3u_{k3} \Rightarrow S_3 = S_{n3} \frac{u_{k\Sigma}}{u_{k3}} = 531\text{kVA}.$$

Musí platit, že součet zatížení se rovná celkovému výkonu skupiny transformátorů

$$\sum_{i=1}^3 S_{ni} = S_1 + S_2 + S_3 = 120\text{kVA} + 199\text{kVA} + 531\text{kVA} = 850\text{kVA}.$$

Rozdělení výkonu na jednotlivé transformátory podle jejich impedancí vyjádřených napětím nakrátko způsobí přetížení transformátorů s nižší hodnotou u_k . V případě, že bychom snížili celkové zatížení na S' tak, aby $u'_{k\Sigma} = u_{k1}$, nebyl by žádný z transformátorů přetížený:

$$S'_1 = S_{n1} \frac{u'_{k\Sigma}}{u_{k1}} = 100 \frac{4}{4} = 100\text{kVA},$$

$$S'_2 = S_{n2} \frac{u'_{k\Sigma}}{u_{k2}} = 167\text{kVA},$$

$$S'_3 = S_{n3} \frac{u'_{k\Sigma}}{u_{k3}} = 444\text{kVA}.$$

Celkový přenášený výkon pak bude

$$\frac{S'}{u'_{k\Sigma}} = \frac{S_{n1}}{u_{k1}} + \frac{S_{n2}}{u_{k2}} + \frac{S_{n3}}{u_{k3}},$$

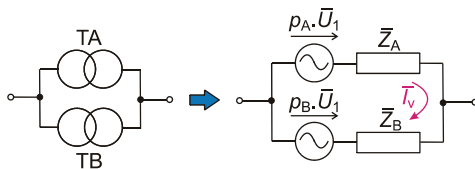
$$S' = u'_{k\Sigma} \left(\frac{S_{n1}}{u_{k1}} + \frac{S_{n2}}{u_{k2}} + \frac{S_{n3}}{u_{k3}} \right) = 4 \left(\frac{100}{4} + \frac{250}{6} + \frac{500}{4,5} \right) = 711,11\text{kVA},$$

$$S' = S'_1 + S'_2 + S'_3 = 100\text{kVA} + 167\text{kVA} + 444\text{kVA} = 711\text{kVA},$$

$$\frac{S'}{\sum_{i=1}^3 S_{ni}} = \frac{S'_1 + S'_2 + S'_3}{S_{n1} + S_{n2} + S_{n3}} = \frac{711\text{kVA}}{850\text{kVA}} = 0,84.$$

Rozdíl v převodu

Jestliže jsou dva transformátory s rozdílnými převody zapojeny paralelně, bude mezi nimi protékat vyrovnávací proud. Tento vyrovnávací proud lze přibližně určit na základě jednoduché úvahy, ve které nahradíme paralelní spojení transformátorů naprázdno podle Obr. 5.15.



Obr. 5.15: Vyrovnávací proud mezi transformátory s rozdílným převodem

Podle II. KZ musí platit

$$p_A \bar{U}_1 + \bar{I}_v \bar{Z}_A = p_B \bar{U}_1 - \bar{I}_v \bar{Z}_B. \quad (5.23)$$

Pokud za napětí zdrojů dosadíme velikost fázového napětí transformátoru

$\bar{U}_1 = \frac{U_n}{\sqrt{3}}$, pro vyrovnávací proud můžeme psát

$$\bar{I}_v = \frac{U_n (p_B - p_A)}{\sqrt{3} (\bar{Z}_A + \bar{Z}_B)}. \quad (5.24)$$

Směr proudu je dán rozdílem převodů p_A a p_B . Charakter proudu je dán impedancemi Z_A a Z_B , protože se jedná o podélné impedance transformátorů TA a TB bude vyrovnávací proud jalový induktivního charakteru a bude zvyšovat zatížení transformátoru s menším převodem a snižovat zatížení transformátoru s větším převodem.

Pro představu o velikosti vyrovnávacího proudu můžeme určit jeho velikost pro případ paralelního spojení dvou transformátorů Yy0d1 každý s převodem $110 \pm 8 \times 2 \% / 23 \text{ kV}$, napětím nakrátko $u_k = 10 \%$ a stejným jmenovitým výkonem. Rozdíl v převodech budeme uvažovat jako rozdíl jedné odbočky, tj. $p_B - p_A = 2 \%$.

$$\frac{I_v}{I_n} = \frac{U_n (p_B - p_A)}{\sqrt{3} I_n (Z_A + Z_B)} = \frac{p_B - p_A}{u_{kA} + u_{kB}} = \frac{2\%}{20\%} = 0,1.$$

Velikost vyrovnávacího proudu představuje 10 % nominálního proudu.

Rozdíl v hodinovém úhlu

Rozdíl v hodinovém úhlu dvou paralelně spojených transformátorů se projeví podobně jako nestejný převod, tedy vyrovnávacím proudem.

5.3.2 Stanovení instalovaného výkonu transformovny

Instalovaný výkon trafostanice, tj. instalovaný výkon transformátorů se stanoví ze vztahu (5.25).

$$S_T = \frac{P_p}{\gamma \cos \varphi}, \quad (5.25)$$

kde P_p je výpočtové zatížení trafostanice [W]

$\cos \varphi$ je střední účinník výkonu tekoucího transformátory [-]. O jeho určení platí 4.2.5.

γ je koeficient využití transformátorů - volí se s ohledem na budoucí rozšiřování a možné výpadky 0,5 – 0,8 [-].

Na základě stanoveného výkonu trafostanice S_T se určí jednotková velikost S_{ni} a počet transformátorů n tak, aby platilo

$$\sum_{i=1}^n S_{ni} \geq S_T, \quad (5.26)$$

nebo v případě volby stejných jednotek, což je nejčastější způsob, nerovnosti:

$$nS_n \geq S_T. \quad (5.27)$$

Volí se raději menší počet větších transformátorů, minimální počet je však dán maximálním použitelným (vyráběným) jednotkovým výkonem, požadovaným stupněm zabezpečení dodávky a též vlastnostmi technologického zařízení. Spotřebiče s různými vlastnostmi je vždy snaha od sebe co nejvíce elektricky vzdálit v zájmu zamezení vzájemného ovlivňování - napájí se proto přes samostatné transformátory. Dodávky 1. a 2. stupně vyžadují vytvoření zálohy - při výpadku jednoho transformátoru musí ostatní převzít jeho zatížení.

Zapojení transformátorů je možné v zásadě provést dvěma způsoby. V prvním případě, kdy není předem určen rezervní stroj, pracuje v normálních provozních stavech n strojů, při poruše $(n-1)$ strojů. Vzniká zde požadavek paralelního provozu. V druhém případě je předem vyčleněn rezervní stroj, ve všech stavech pracuje $(n-1)$ strojů, paralelní provoz není nutný.

Skutečné využití navržených transformátorů lze zjistit ze vztahu:

$$\gamma_s = \frac{P_p}{n_p S_n \cos \varphi}, \quad (5.28)$$

kde γ_s je skutečné využití transformátorů.

Toto využití by v normálních i poruchových provozních stavech nemělo být větší, než je dovolená přetížitelnost jednotek. Návrh počtu a velikosti jednotek i způsobu jejich zapojení by měl být proveden ve více variantách.

5.4. Uzemnění

Uzemnění je, podle definice z [15], provedení nutných spojení, aby určené místo přístroje, zařízení nebo sítě bylo udržováno pokud možno na potenciálu země. Účelem uzemnění je:

- udržovat na potenciálu země nějakou část elektrického obvodu,
- umožňovat funkci elektrických strojů, přístrojů a zařízení nebo jí napomáhat,
- chránit elektrické stroje a zařízení před účinky přepětí a velkých proudů,
- svést atmosférické proudy a omezit přepětí,
- chránit lidi a zvířata před úrazem elektrickým proudem při dotyku neživých částí.

Rozeznáváme dva základní typy uzemnění:

Pracovní uzemnění – trvalé nebo přechodné spojení se zemí části elektrického zařízení, které patří k proudovému obvodu, jímž se má zabránit škodlivému vzrůstu napětí nebo přepětí (uzemnění uzlu transformátoru, uzemnění středního vodiče nebo uzemnění svodičů přepětí).

Ochranné uzemnění – spojení se zemí neživých částí elektrických zařízení, jímž se má zabránit vzniku nebezpečného napětí na těchto částech.

Uzemnění může sloužit současně jako ochranné i pracovní nebo se mohou provádět samostatně.

Návrh uzemnění a uspořádání zemničů vychází ze stanovených parametrů uzemnění, kterými jsou:

- požadovaný zemní odpor,
- přípustné napětí na uzemňovací soustavě,
- přípustné dotykové a krokové napětí,
- proudová zatížitelnost,
- mechanická a korozní odolnost.

5.4.1 Teorie uzemnění

Základem pro výpočet jednotlivých parametrů zemniče je teorie vstupu elektrického proudu do země a jeho šíření zemí. Důležitou hodnotou pro výpočet je rezistivita půdy ρ , která se obvykle považuje za konstantní veličinu, odpovídající homogennímu půdnímu prostředí. V některých případech lze heterogenní půdní prostředí nahradit více horizontálními vrstvami o různých hodnotách rezistivity.

Nejjednodušším příkladem výpočtu je proudové pole polokulové elektrody na povrchu země. Odtéká-li z povrchu polokoule do země proud I [A], je v zemi ve vzdálenosti x [m] od středu polokoule proudová hustota σ [Am^{-2}] (5.29).

$$\sigma = \frac{I}{2\pi x^2}, \quad (5.29)$$

a při rezistivitě půdy ρ [Ωm] je ve vzdálenosti x od středu elektrody intenzita elektrického pole E [Vm^{-1}]

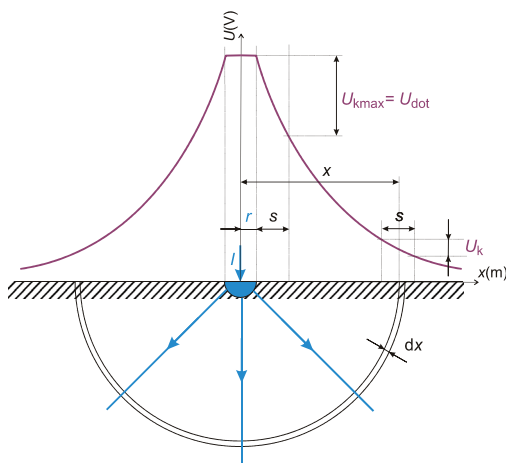
$$E = \rho\sigma = \frac{\rho I}{2\pi x^2}, \quad (5.30)$$

napětí U [V] mezi povrchem r a místem o vzdálenosti x

$$U = \int_r^x E dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_r^x \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right), \quad (5.31)$$

a celkové napětí na takovém zemniči U_0 (celkový potenciál elektrody)

$$U_0 = \int_r^\infty E dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - 0 \right) = \frac{\rho I}{2\pi r}. \quad (5.32)$$



Obr. 5.16: Polokulová elektroda z jejíhož povrchu odtéká do země proud I

Zemní odpor R [Ω] polokulové elektrody je

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\rho}{2\pi r}, \quad (5.33)$$

Rozdíl potenciálu, který člověk překlene při kroku je krokové napětí U_k – jeho hodnota závisí na vzdálenosti x od středu elektrody a délce kroku s (obvykle se předpokládá 1 m), viz vztah (5.34).

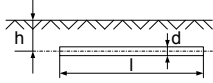
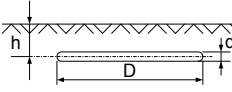
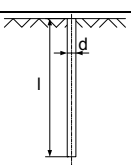
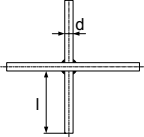
$$U_k = \int_{x-\frac{s}{2}}^{x+\frac{s}{2}} E dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_{x-\frac{s}{2}}^{x+\frac{s}{2}} \frac{dx}{x^2} \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{x-\frac{s}{2}} - \frac{1}{x+\frac{s}{2}} \right). \quad (5.34)$$

Maximální krokové napětí $U_{k \max}$ je ve vzdálenosti $x = r + s/2$ od středu zemniče. Pokud uvažujeme, že délka kroku je 1m odpovídá toto napětí zároveň definici dotykového napětí

$$U_{k \max} = U_{\text{dot}} = \frac{\rho I}{2\pi} \cdot \frac{s}{r^2 + sr}. \quad (5.35)$$

5.4.2 Odpor a rozložení povrchového potenciálu typických provedení uzemnění

Jednoduché povrchové uzemňovací elektrody jsou kovové tyče, pasy nebo trubky umístěné pod povrchem země v dané hloubce h , jak ukazuje Tab. 5.6. Obvykle délka těchto elementů l je mnohem větší než h . Povrchový potenciál těchto jednoduchých elektrod lze odvodit obdobným způsobem jako v případě polokulové elektrody. V praxi se pro výsledné vztahy používá zjednodušených vztahů, které jsou uvedeny v Tab. 5.6 zároveň s podmínkami pro jejich použití.

Typ zemniče	Uložení	Zemní odpor [Ω] (přesnější vzorec)	Podmínky použití	Zemní odpor [Ω] (přibližný vzorec)	Podmínky použití
Páskový nebo drátový vodič		$R = \frac{\rho}{2\pi l} (\ln \frac{2l}{d} + \ln \frac{l}{2h})$	$l \gg d$ $h \ll l/4$	$R = 2 \frac{\rho}{l}$	$l \gg d$ $h \ll l/4$ $l = 10 \div 50 \text{ m}$
Páskový nebo drátový vodič v kruhu		$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} (\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{\pi D}{2h})$	$D \gg d$ $h \ll D/4$	$R = 2,1 \frac{\rho}{l}$	$D \gg d$ $h \ll 2/d$ $D/h \gg 10$
Tyč		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$	$l \gg d/2$	$R = 0,9 \frac{\rho}{l}$	$l \gg d/2$ $l = 1 \div 3 \text{ m}$
Páskový nebo drátový vodič paprskový		$R = \frac{\rho}{4\pi l} (\ln \frac{2l}{d} + 1)$	$l \gg d$	$R = 0,7 \frac{\rho}{l}$	$l \gg d$ $l \ll 30 \text{ m}$

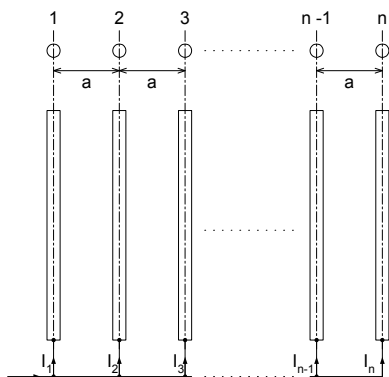
Tab. 5.6: Zemní odpor jednoduchých zemničů

5.4.3 Soustavy zemničů

5.4.3.1 Vodorovné zemniče

V praxi se často setkáváme se soustavou zemničů, zejména při uzemňování venkovních rozvodů nebo větších rozvodných objektů. Zemničí soustava může být provedena například jako několik vodorovných, rovnoběžně uložených zemničích vodičů, které jsou na obou koncích propojeny. Předpokládáme-li rozmístění zemničích tyčí kruhového průřezu r_0 a délky l při vzdálenosti sousedních tyčí a tak, jak je uvedeno na Obr. 5.17, lze vyšetřit potenciál této soustavy, do které je přiveden proud I . Ten se rozdělí na dílčí proudy jednotlivých tyčí $I_1, I_2, \dots, I_n$. Rozdělení proudů řešíme za předpokladu, že celkový proud I přivádíme do středu soustavy a protože rozměry tyčí i jejich vzájemné vzdálenosti jsou stejné a rovněž vodivost půdy předpokládáme konstantní, budou dílčí proudy rozděleny symetricky ke středu soustavy.

Nejprve vyšetříme potenciály jednotlivých zemničích tyčí. Potenciál každého zemniče se bude skládat z vlastního potenciálu, vytvořeného vlastním proudem a z potenciálu vyvolaného na něm proudem odtékajícím ostatními zemniči.



Obr. 5.17: Soustava vodorovných zemničů

$$\begin{aligned}
 V &= k_{11}I_1 + k_{12}I_2 + \dots + k_{1n}I_n \\
 V &= k_{21}I_1 + k_{22}I_2 + \dots + k_{2n}I_n \\
 V &= k_{31}I_1 + k_{32}I_2 + \dots + k_{3n}I_n, \\
 &\dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
 V &= k_{n1}I_1 + k_{n2}I_2 + \dots + k_{nn}I_n
 \end{aligned} \tag{5.36}$$

Potenciálové koeficienty jsou určeny jako zemní odpor drátového zemniče uloženého na povrchu a jsou stejně jako dílčí proudy symetrické (5.37).

$$\begin{aligned}
k_{11} &= k_{22} = \dots = k_{nn} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{r}, \\
k_{12} &= k_{21} = k_{23} = k_{32} = \dots = k_{nn-1} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{a}, \\
k_{13} &= k_{31} = k_{24} = k_{42} = \dots = k_{nn-2} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{2a}, \\
k_{mn} &= k_{nm} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{l}{(m-n)a}, \\
I_1 &= I_n \quad I_2 = I_{n-1} \quad I_k = I_{n-k+1}
\end{aligned} \tag{5.37}$$

Soustavu lze tedy zjednodušit dosazením proudů podle uvedených rovnic

$$\begin{aligned}
V &= I_1(k_{11} + k_{1n}) + I_2(k_{12} + k_{1,n-1}) + \dots + I_k(k_{1k} + k_{1,n-k+1}) \\
V &= I_1(k_{21} + k_{2n}) + I_2(k_{22} + k_{2,n-1}) + \dots + I_k(k_{2k} + k_{2,n-k+1}) \\
V &= I_1(k_{31} + k_{3n}) + I_2(k_{32} + k_{3,n-1}) + \dots + I_k(k_{3k} + k_{3,n-k+1}), \\
&\dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\
V &= I_1(k_{n1} + k_{nn}) + I_2(k_{n2} + k_{n,n-1}) + \dots + I_k(k_{nk} + k_{n,n-k+1})
\end{aligned} \tag{5.38}$$

a díky symetrii koeficientů je patrné, že n -tý řádek je stejný jako první, $n-1$ je stejný jako druhý atd. Soustava n rovnic se redukuje na $n/2$ pro sudý počet rovnic a na $(n+1)/2$ pro lichý počet rovnic.

Řešením této soustavy rovnic stanovíme poměr proudů v jednotlivých tyčích a z tohoto poměru pak jednotlivé dílčí proudy jako podíl celkového proudu I přivedeného do zemniče. Z poměru rozdílu potenciálů a přiváděného proudu lze také učit přechodový zemní odpor uvažované soustavy.

Jde-li o rozsáhlou mřížovou zemní síť je již velmi obtížné stanovit vztah pro výpočet zemního odporu exaktně. Zemní odpor mřížové sítě se proto určuje vztahem zjednodušeným

$$R = \frac{\rho}{2D} + \frac{\rho}{l}, \tag{5.39}$$

ve kterém je prvním členem určen zemní odpor plné desky o ploše kruhu s průměrem D a druhý vyjadřuje odchylku odporu vlivem různé hustoty sítě, kde l je celková délka všech vodičů sítě. Pro nekonečně hustou síť se ρ/l blíží nule a odpor přechází v odpor plné desky.

5.4.3.2 Svislé tyčové zemniče

Často bývá zemnicí soustava rozveden či elektrických stanic menšího rozsahu tvořena nebo doplněna soustavou svislých tyčových elektrod zaražených do země. Odpor jednoho tyčového zemniče délky l a průměru d – z Tab. 5.6

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}. \quad (5.40)$$

Budou-li zemniče uspořádány tak, že vzdálenosti mezi nimi budou značné, pak se teoreticky nebudou vzájemně ovlivňovat a celkový odpor soustavy n tyčových zemničů bude

$$R_\infty = \frac{R_0}{n}. \quad (5.41)$$

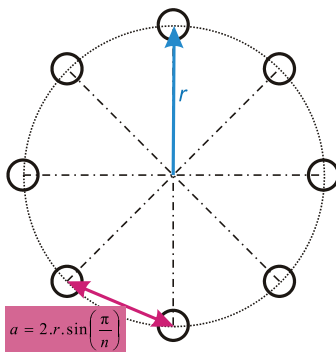
Prakticky se svislé tyčové zemniče ukládají v menších vzdálenostech, takže se svými poli ovlivňují a tím se zmenšuje účinný průřez země, kterým se proud rozptyluje. V důsledku toho se odpor celé soustavy zvětšuje. Skutečný zemní odpor soustavy bude

$$R = \frac{R_\infty}{\eta} = \frac{R_0}{n \cdot \eta}, \quad (5.42)$$

kde $\eta = \frac{R_\infty}{R} = \frac{R_0}{nR}$ je koeficient využití soustavy.

Výsledný potenciál každé k -té svislé elektrody je dán potenciálem vlastním a potenciálem způsobeným ostatními $n-1$ elektrodami

$$V_k = I_k R_0 + \sum_{m=1}^{n-1} I_{mk} \frac{\rho}{2\pi a_{mk}}. \quad (5.43)$$



Obr. 5.18: Uspořádání tyčových zemničů do n - úhelníka

Vzdálenost a_{mk} mezi elektrodami bude v uspořádání elektrod do pravidelného n -úhelníka o poloměru r podle Obr. 5.18

$$a_{mk} = 2r \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n}m\right) \quad (5.44)$$

a výsledný potenciál k -té elektrody určíme jako

$$\begin{aligned} V_k &= I_k R_0 + \sum_{m=1}^{n-1} I_{mk} \frac{\rho}{2\pi x_{mk}} = \\ &= \frac{I}{n} \left[R_0 + \sum_{m=1}^{n-1} \frac{\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{2r \sin\left(\frac{\pi}{n}m\right)} \right]. \end{aligned} \quad (5.45)$$

Protože všechny tyče jsou propojeny, budou jejich potenciály stejné $V_1 = V_2 = \dots = V_k = \dots = V_n = U_o$ a výsledný odpor soustavy bude

$$R = \frac{U_o}{I} = \frac{R_0}{n} + \frac{\rho}{2\pi 2rn} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{n}m\right)}, \quad (5.46)$$

$$R = R_\infty \left[1 + \frac{\rho}{4\pi 2r R_\infty} \cdot f(n) \right] \quad (5.47)$$

kde $f(n) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{n-1} \frac{1}{\sin\left(\frac{\pi}{n}m\right)}$ a hodnoty $f(n)$ pro různý počet tyčí a tedy pro různý

počet stran n -úhelníka jsou uvedeny v Tab. 5.7. podle [19].

n	2	3	4	5	6	8	10	15	20	50	100
$f(n)$	0,5	0,77	0,96	1,1	1,22	1,41	1,55	1,81	1,98	2,57	3,02

Tab. 5.7: Hodnoty $f(n)$ pro různý počet tyčí

Činitel využití soustavy pak můžeme vyjádřit jako

$$\eta = \frac{R_\infty}{R} = \frac{1}{1 + \frac{\rho}{4\pi 2r R_\infty} \cdot f(n)} \quad (5.48)$$

V praxi se pro výpočet zemního odporu soustavy tyčových zemničů spojených paralelně páskovým zemničem používá jednodušší vztah a činitel využití soustavy trubkových nebo tyčových zemničů (η_1) je stanoven z grafu v [19] na základě jejich počtu n , délky l a jejich vzájemné vzdálenosti a .

$$R_z = \frac{1}{\frac{\eta_1 \eta_2 n}{R_1} + \frac{1}{R_o}}, \quad (5.49)$$

kde $R_1 = 0,9 \cdot \frac{\rho}{l}$ je zemní odpor jednoho tyčového (trubkového) zemniče
(Tab. 5.6 zjednodušený vztah),

$R_o = 2 \frac{\rho}{l_o}$ je zemní odpor spojovacího páskového zemniče (Tab. 5.6
zjednodušený vztah),

l je délka tyče,

l_o je délka spojovacího pásku,

ρ je rezistivita půdy,

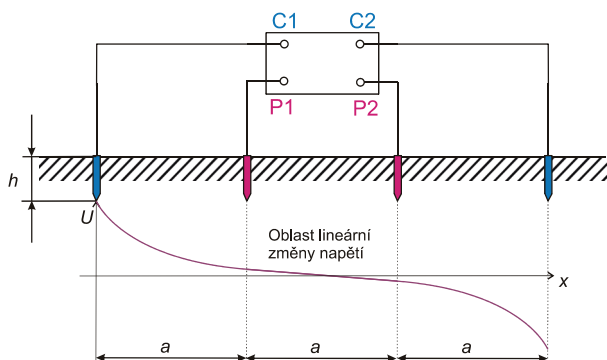
η_1 je činitel využití soustavy tyčových zemničů,

η_2 je činitel využití soustavy tyčí a spojovacího pásku. Pokud není stanoveno jinak, používá se hodnota $\eta_2 = 0,9$.

5.4.4 Měření rezistivity půdy

Rezistivitu půdy je třeba měřit v hloubce, v níž se ukládají zemniče. Pro stanovení zemního odporu rozsáhlých zemničů, jako jsou uzemňovací sítě venkovních rozvodů, však není tato hodnota zcela směrodatná, liší-li se vodivosti spodních vrstev od horních. Z takového zemniče odtéká proud široce do země jako z mohutného tělesa a na odpor má proto vliv vodivost i hluboko položených vrstev. Zde je třeba určit střední rezistivitu půdy do hloubky srovnatelné s celkovými rozměry zemniče a tedy zpravidla do hloubky několika desítek metrů.

Měření rezistivity půdy pomocí čtyř elektrod označujeme jako geoelektrické měření. Užívá se metoda Schlumbergerova a Wennerova. Obě jsou velmi podobné a liší se jen vzájemnou konfigurací elektrod a z toho plynoucího odlišného vyhodnocení. Metoda Wennerova je více používaná a je uvedena i v [15]. Princip uspořádání elektrod a zapojení přístroje pro měření rezistivity touto metodou je uvedeno na Obr. 5.19. Jako elektrody se použijí tyče o průměru 15 až 20 mm, zaražené v jedné přímce do hloubky 20 cm v rozestupu a . Proudové elektrody (vnější) se připojí na svorky C1 a C2 a potenciálové (vnitřní) na svorky P1 a P2. Rozestup elektrod a se postupně zvětšuje podle požadované hloubky měření a měření se provede na několika místech.



Obr. 5.19: Uspořádání tyčových zemničů do n - úhelníka

Rezistivita půdy ρ v Ωm se vypočítá ze vztahu

$$\rho = 2\pi a R, \quad (5.50)$$

kde R je naměřený odpor [Ω]

a je vzdálenost mezi elektrodami [m]

Tento vztah platí za předpokladu, že hloubka elektrod h je mnohem menší než rozestup elektrod a . Je-li nutné elektrody zarazit do větší hloubky, aby byl dosažen požadovaný zemní odpor elektrod (zpravidla v půdách s velkou rezistivitou) je třeba vynásobit výslednou hodnotu konfigurační konstantou podle Tab. 5.8.

a/h	1/4	1/2	1	2	4	6	8	10	20	>20
k	2	1,9	1,7	1,3	1,1	1,05	1,03	1,02	1,01	1

Tab. 5.8: Konfigurační konstanta k

Takto stanovenou rezistivitu považujeme za střední rezistivitu půdy do hloubky rovné rozestupu elektrod a .

Pro navrhování jednoduchých zemničů postačuje určit rezistivitu půdy tak, že se změří zemní odpor tyče nebo trubky o průměru 20 mm zaražené do hloubky 0,8 m. Tento naměřený zemní odpor se číselně rovná rezistivitě půdy.

Vliv kolísání rezistivity v závislosti na ročním období se eliminuje tak, že se naměřené hodnoty vynásobí koeficientem K podle grafu uvedeném v [15].

5.4.5 Měření zemního odporu uzemnění

Metoda potenciálového spádu

Metoda potenciálového spádu je vhodná pro měření zemních odporů zemničů s menší rozlohou, se zemním odporem větším než $0,5 \Omega$. Jedná se o jednotlivé tyčové nebo paprskové zemniče, uzemnění stožárů, nebo uzemnění malých distribučních trafostanic.

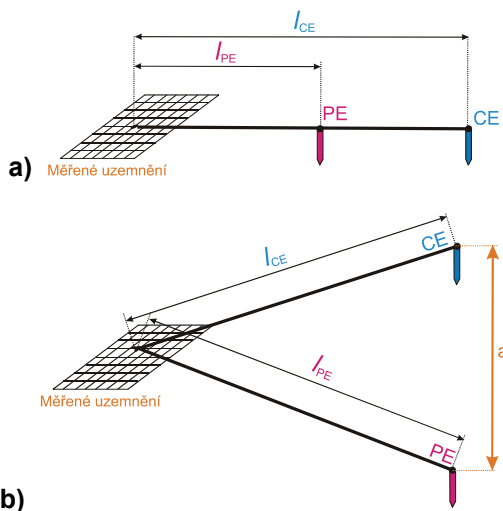
Přesnost měření ovlivňuje zejména:

a) vzdálenost proudové CE elektrody od měřeného uzemnění Obr. 5.20a

- pro jednoduché zemniče do délky 40m se požaduje vzdálenost proudové elektrody - I_{CE} alespoň 40m kolmo na delší rozměr zemniče,
- pro složitý zemnič nebo zemnicí síť musí být I_{CE} alespoň čtyřnásobek největšího rozměru nebo úhlopříčky zemniče,

b) rozmístění proudové CE a potenciálové PE elektrody Obr. 5.20b

- střed měřeného uzemnění a elektrod PE a CE leží na přímce, přičemž platí, že vzdálenost $I_{PE} = 0,625 \cdot I_{CE}$ (minimálně 20 m) [18],
 - střed měřeného uzemnění a měřící elektrody tvoří vrcholy rovnoramenného trojúhelníka, přičemž $I_{PE} = I_{CE}$,
- c) vlastní a vzájemná indukčnost přívodů k měřícím elektrodám a kapacita souběhu přívodů - pro vyloučení chyby při souběhu cca 500m stačí, jsou-li vodiče k elektrodám položeny ve vzdálenosti alespoň 50 cm,
- d) vliv cizích zemničů a rušivých polí - měřící elektrody musí být umístěny mimo potenciální pole jiných zemničů.

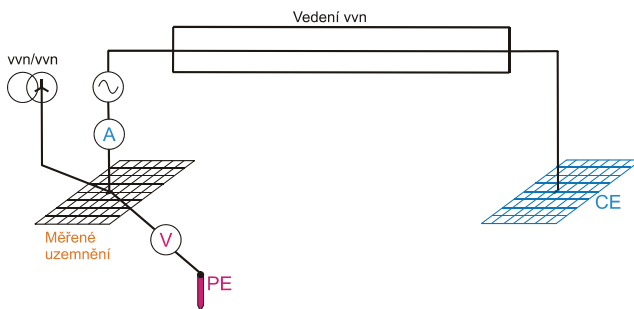


Obr. 5.20: Potenciálová metoda pro měření zemních odporů zemničů – rozmístění elektrod

Během měření je nutno odpojit zemní lana nebo jiná propojení s dalšími zemniči. Pokud to není možné, lze pro měření použít vysokofrekvenční měřič. Frekvence napětí přiloženého na proudových elektrodách musí být dostatečně velká, aby impedance zemního lana a sousedních stožárů na této frekvenci představovala velkou impedanci a nezkreslovala měřený zemní odpor.

Proudová metoda

Tato metoda je určena k měření zemního odporu velkých uzemňovacích soustav. Její podstata spočívá v měření úbytku napětí na uzemnění, který vyvolá vnucený zkušební proud. Zdroj proudu se zapojí mezi měřené uzemnění a vzdálený zemnič - elektrodu CE. Zemní lana a pláště kabelů se v tomto případě neodpojují. Napětí se měří voltmetrem s velkým vnitřním odporem, zapojeným mezi měřené uzemnění a elektrodu PE. Zemní odpor se stanoví z podílu napětí a proudu. Napájecí zdroj se připojí k měřenému uzemnění v blízkosti uzemnění uzlů transformátorů. Jako proudové elektrody se použije uzemnění sousední elektrické stanice.



Obr. 5.21: Měření odporu uzemnění proudovou metodou [20]

Zemní odpor se stanoví ze vztahu:

$$R_z = \frac{U_m}{rI_m}, \quad (5.51)$$

kde U_m je naměřená hodnota napětí [V],

I_m je měřicí proud [A],

r je redukční činitel vedení použitého k elektrodě CE [-].

5.4.6 Napětí na uzemňovací soustavě

Napětí na uzemňovací soustavě se stanoví buď měřením a přepočtem na zkratový proud nebo jako součin zemního odporu a jednofázového zkratového proudu

$$U_z = U_m \frac{I_k}{I_m} w, \quad (5.52)$$

kde U_m je naměřená hodnota napětí [V],

I_m je měřicí proud [A],

I_k je počáteční proud jednofázového zkratu,

w je součinitel zahrnující pravděpodobnost výskytu největšího teoreticky stanoveného zkratového proudu (zpravidla 0,7).

5.4.7 Proudová zatížitelnost zemničů

Půda v okolí zemniče se proudem zahřívá a teplo se rozvádí do okolí. Jak se toto teplo rozvádí, závisí na druhu půdy, její vlhkosti a vodivosti, velikosti a tvaru zemniče a na proudovém zatížení zemniče. Je-li zemnič přetížen, vysušuje se okolní půda, zahřívá se, a tím stoupá její odpor a napětí kolem zemniče.

V [15] se uvádí zatížitelnost zemničů uložených v půdě, vztaženou na plochu povrchu zemniče, v závislosti na době trvání průchodu proudu a rezistivitě půdy. Pro zemniče uložené v betonu platí hodnoty dovolené proudové hustoty vztažené na plochu betonového zákrytu, který je obklopen zeminou. Rovněž zde jsou hodnoty dovoleného proudového zatížení uvedeny v závislosti na době trvání průchodu proudu a rezistivitě půdy. Zde je navíc uvedena hustota nejvyššího dovoleného rázového proudu 50 kA/m^2 . Tato hodnota je stanovena proto, že při vyšší proudové hustotě by mohlo dojít k poškození betonu. U zemničů uložených v půdě toto omezení neplatí. Zde naopak vítáme co nejvyšší hustotu rázového proudu, protože v okamžiku jeho průchodu ze zemniče do země vznikají vlivem zvětšení intenzity pole na hranách zrněk půdy malé jiskry, které do určité míry překlenují přechodové odpory.

Když intenzita pole přesáhne průrazný gradient půdy, nastane úplný průraz zeminy, který "zkratuje" vrstvu zeminy v blízkosti zemniče. Zemnič je v tom okamžiku obklopen dobře vodivou vrstvou. Výsledným efektem je snížení zemního odporu vodiče.

Podle [18] se proudová zatížitelnost uzemňovacích přívodů a zemničů kontroluje pouze z hlediska odolnosti samotného vodiče na tepelné účinky procházejícího proudu.

5.4.8 Typy zemničů

a) Náhodné zemniče

- podzemní část ocelových konstrukcí,
- výztužná ocel v základech,
- celokovové stožáry v běžné trase s odporem půdy $150 \Omega\text{m}$.

b) Strojené zemniče

- Základové,
- tyčové a hloubkové,
- zemní síť,
- zemniče pro vyrovnání potenciálu.

5.4.8.1 Strojený základový zemnič

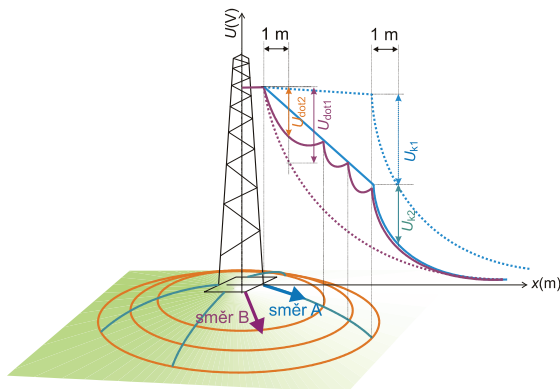
Ocelový pásek nebo drát se uloží pod izolační vrstvy jako obvodový zemnič, cca 5cm nad dnem výkopu, aby byl obklopen betonovou vrstvou. Nedodržení tohoto pravidla by vedlo na přechodu z betonu do země ke vzniku makročlásku a k urychlené korozi. Minimálně na dvou místech se uzemňovací přívod vyvede na povrch tak, aby ze základu již neprocházel zemí. Nelze-li tuto podmínku splnit, musí se provést opatření proti korozi. Podrobně je provedení základového zemniče popsáno v [15] nebo v [20].

5.4.8.2 Strojený zemnič pro vyrovnání potenciálu

Zemnič pro vyrovnání potenciálu (ekviponciální práh) je zemnič uložený ve vhodné hloubce a vzdálenosti od vodorovných předmětů za účelem ovlivnění průběhu potenciálu na povrchu země.

Používá se pro snížení dotykového a krokového napětí zemniče. Na Obr. 5.22 je uveden průběh potenciálu na povrchu půdy kolem stožáru elektrického vedení. V případě, že stožár bude vybaven jednoduchým paprskovým zemničem uloženým po celé své délce ve stejné hloubce, bude průběh potenciálu měřený podél paprsku (ve směru A) odpovídat modré čárkované křivce. Je patrné, že na okraji zemniče vzniká nebezpečné krokové napětí (U_{k1}). Potenciálový spád ve směru B od stožáru je naznačen fialovou čárkovanou čarou a v tomto směru vzniká v blízkosti stožáru nebezpečné dotykové napětí (U_{dot1}).

Jestliže budou paprskové zemniče uloženy v zemi s klesající hloubkou a budou vzájemně spojeny ekvipotenciálními prahy ve tvaru soustředných kružnic, bude se potenciál stožáru v případě průchodu proudu měnit podle plných křivek. Dotykové napětí zemniče ve směru B se sníží (U_{dot2}), stejně jako krokové napětí v blízkosti zemniče ve směru A (U_{k2}).



Obr. 5.22: Strojený zemnič pro vyrovnání potenciálu

5.4.9 Mechanická a korozní odolnost

Koroze vzniká vlivem rozdílných prostředí, kterými části uzemnění prochází - změnou elektrochemického potenciálu zemničů v různém prostředí.

Všechny spoje zemničů a podzemní spoje uzemňovacích přívodů je nutno chránit před korozí pasivní ochranou (litými pryskyřicemi, plastovými smršťovacími hadicemi apod.). Nejkritičtější jsou místa, kde zemnič nebo uzemňovací přívod přecházejí z jednoho prostředí do druhého, např. z betonu do země, do různých druhů zemin, ze země na povrch apod. V těchto místech vzniká vlivem rozdílného prostředí elektrochemický článek, a proto je třeba tyto prostupy různým prostředím omezit a tam, kde to není možné, použít pasivní protikorozní ochranu.

Norma [15] požaduje při přechodu uzemňovacího přívodu do země pasivní ochranu v délce 20 cm nad povrch a 30 cm pod povrch. Přívody od základových zemničů se chrání při přechodu z betonu do země 30 cm v betonu a 100 cm v zemi a na přechodu z betonu na povrch 10 cm v betonu a 20 cm nad povrchem.

Výkopy, ve kterých jsou uloženy strojené zemniče, se mají vyplnit homogenní zeminou. Škvára a stavební odpad nemají přijít do bezprostředního styku se zemničem - rozdílné prostředí - koroze. Ukládání náhodných zemničů do suspenzí z bentonitu nebo sádry, které dočasně zlepšují uzemňovací poměry, není přípustné.

Holé nebo pozinkované ocelové zemniče a uzemňovací přívody uložené v betonu jsou před korozí chráněny betonovou vrstvou. Je nevhodné, i když se tomu nelze vždy vyhnout, jestliže se strojený zemnič, nebo holý uzemňovací přívod uložený v zemi, připojí k armování v betonovém základu. Vznikne tak korozní makročlánek, v němž kov v zemi (který má nižší - zápornější - potenciál), představuje poměrně malou anodu proti rozsáhlé katodě - ocelovému armování v provlhlém betonu, jež má vyšší (kladnější) potenciál. To má za následek rychlou korozi oceli v půdě a ještě rychlejší rozpouštění zinkového povlaku, až dojde k přerušení mezi náhodným a strojeným zemničem, popřípadě mezi základovým zemničem a uzemňovacím přívodem, protože nebezpečí je největší v místě změny prostředí.

Z hlediska koroze je největším nebezpečím spojování strojených nebo náhodných zemničů provedených z různých kovů. Nebezpečí je tím větší, čím je větší rozdíl elektrochemických potenciálů a čím větší je plocha zemniče s vyšším (kladnějším) potenciálem. Proto se zásadně nespojují ocelové a měděné zemniče. Pokud je spojení nevyhnutelné, je třeba, podle důležitosti, zvážit případné použití katodické ochrany.

Základním principem katodické ochrany je záměrné vytvoření elektrického obvodu, v němž je v korozním prostředí předmět chráněný katodou. Dosahuje se toho vodivým spojením chráněného předmětu s kovem, který má v daném prostředí zápornější potenciál než kov chráněný (např. s elektrodou Mg), čímž vznikne umělý galvanický článek. Tétož je možné dosáhnout, když se chráněný předmět připojí k zápornému pólu vnějšího zdroje stejnosměrného proudu. Zpravidla se takto chrání důležitá zařízení, jako jsou podzemní nádrže, potrubí apod.

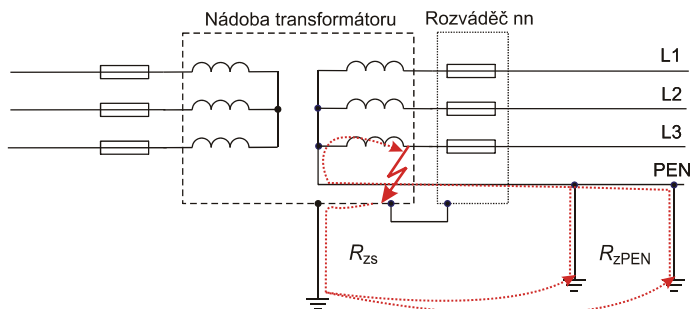
5.4.10 Uzemnění v distribučních transformovných

V této kapitole je uveden rozbor možných poruch v distribuční transformovně z hlediska jejich vlivu na bezpečnost ve stanici a v síti nn při rozděleném nebo společném uzemnění stanice.

5.4.10.1 Oddělená uzemnění

Porucha na zařízení nn

V případě vodivého spojení jedné fáze se zemí na nn straně transformátoru poruchový proud protéká ochranným uzemněním stanice, na které je připojena kostra rozváděče nn a nádoby transformátoru a uzavírá se přes uzemnění nulového vodiče (viz Obr. 5.23). Velikost tohoto proudu je dána sekundárním napětím transformátoru a odporem uzemnění ochranného vodiče PEN a uzemnění stanice $R = R_{zs} + R_{zPEN}$. Předpokládáme-li např. odpor uzemnění ve stanici $R_{zs} = 10 \Omega$ a odpor uzemnění ochranném vodiči PEN $R_{zPEN} = 2 \Omega$, tj. v sérii 12Ω , bude při fázovém napětí 240V protékat obvodem proud 20A. Proud může protékat neomezeně dlouhou dobu, protože není signalizován a zpravidla se objeví až náhodně při revizi. Tento trvalý proud může být příčinou vysoušení zemniče. To je důvod, proč se v tomto případě požaduje pečlivá izolace vodiče PEN. Na uzemnění DTS i na ochranném vodiči PEN a také na všech nulovaných částech sítě nn vznikne napětí, které se rozdělí v poměru odporů, tj. v případě našeho příkladu 1:5. Na uzemnění vn tedy bude 200V a na ochranném vodiči PEN 40 V.



Obr. 5.23: Oddělená uzemnění - porucha na straně nn

Oddělením obou uzemnění se dopouštíme prohřešku proti zásadám nulování, podle kterých nesmí být v soustavě s ochrannou nulováním některé části jen zemněny, jako je v tomto případě nádoba transformátoru a rozváděč nn.

Porucha na zařízení vn

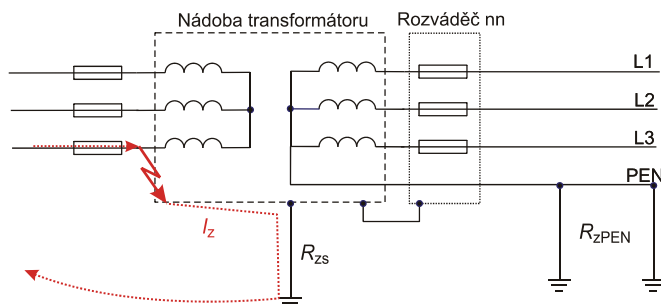
Na Obr. 5.24 je naznačen průraz vinutí vn na nádobu transformátoru. Je-li síť vn kompenzovaná, protéká místem poruchy stálý zbytkový proud a na ochranném uzemnění je napětí dané hodnotou tohoto proudu a zemním odporem uzemnění stanice. Protože ochranný vodič PEN není s tímto uzemněním spojen, nepřenáší se na něj žádné napětí a sekundární síť nn je v bezpečí.

Určité nebezpečí je však v transformovně, protože napětí na ochranném uzemnění může být značně vysoké. Zvláště závažné je, že plné napětí se objeví proti střednímu vodiči v rozváděči nn, jehož kostra je z důvodu bezpečnosti ve stanici připojena na uzemnění vn. Vysoké napětí v okolí stanice se musí eliminovat vhodným způsobem, jakým je např. ekvipotenciální práh nebo izolace povrchu terénu. Protože napětí na uzemnění by mohlo dosáhnout značně vyšších hodnot, než připouští izolační pevnost zařízení nn, je v ČSN 33 3225 stanovena podmínka pro zemní odpor uzemnění R_{zs} ve stanici

$$R_{zs} \leq \frac{2000}{I_z} \quad [\Omega] \quad \text{u sítí s rychlým vypnutím,}$$

$$R_{zs} \leq \frac{500}{I_z} \quad [\Omega] \quad \text{u sítí, kde není zajištěno rychlé vypnutí,}$$

kde - I_z je proud odtékající zemničem do země při poruše na straně vn ve stanici.



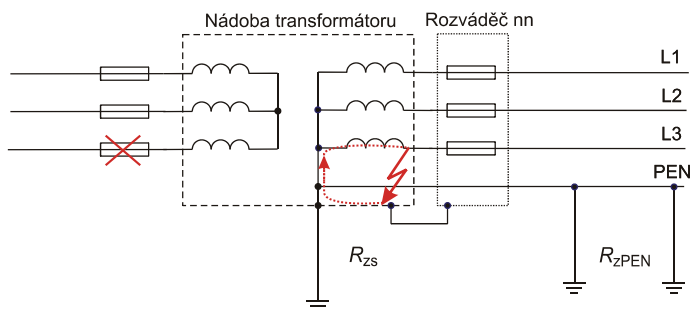
Obr. 5.24: Oddělená uzemnění - porucha na straně vn

Zvýšená pozornost se musí v tomto případě věnovat izolaci středního vodiče nn proti zemi a všem neživým částem ve stanici a uložit jej stejně jako vodiče fázové. Uzemnění vodiče PEN se zřídí až na nejbližším podpěrném bodu každého vývodu ze stanice, v nejbližší rozpojovací skříni všech kabelových vývodů, nebo na odděleném uzemnění připojeném izolovaným vodičem. Obvykle je dostatečná vzdálenost 20 m od uzemnění vn. Před uzemněním středního vodiče soustavy nn se tento nepovažuje za ochranný vodič.

5.4.10.2 Spojená uzemnění

Porucha na zařízení nn

Při stejné poruše jako v předcházejícím případě (5.4.10.1), ale při spojených uzemněních, se stane spojení na kostru kovovým zkratem, který způsobí vypnutí pojistky na straně vn (viz Obr. 5.25). Žádným uzemněním proud neprochází a nikde nevznikají dotyková napětí. Z hlediska této poruchy je spojení obou uzemnění výhodné.



Obr. 5.25: Spojená uzemnění porucha na straně nn

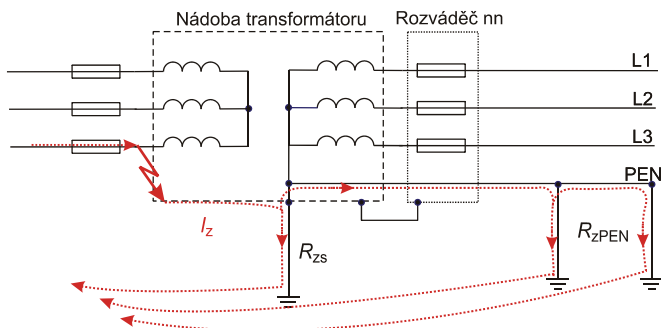
Porucha na zařízení vn

Na Obr. 5.26 je naznačeno zemní spojení v transformovně na zařízení vn. Při spojeném uzemnění protéká poruchový proud do země uzemněním v transformovně a všemi uzemněními ochranného vodiče PEN. Ve stanici je bezpečno, protože na neživých částech nevzniká žádný rozdíl napětí. V síti nn však může za určitých podmínek na ochranném vodiči PEN vzniknout nebezpečné napětí, které je součinem zemního poruchového proudu a odporu uzemnění ochranného vodiče. Toto nebezpečí je reálné zejména ve venkovních sítích nn, které jsou napájeny z venkovní sítě vn s velkým kapacitním proudem, nebo ze sítě vn s odporovým uzemněním uzlu. Přitom pravděpodobnost dotyku neživých částí v síti nn v okamžiku poruchy je velká. Aby nedošlo k přenesení napětí na ochranný vodič PEN, požaduje [13] kontrolu zemního odporu společného uzemnění podle vztahu:

$$R = \frac{R_{zs} R_{zPEN}}{R_{zs} + R_{zPEN}} \leq \frac{U_d}{I_z} \quad [\Omega], \quad (5.53)$$

kde U_d je dovolené dotykové napětí

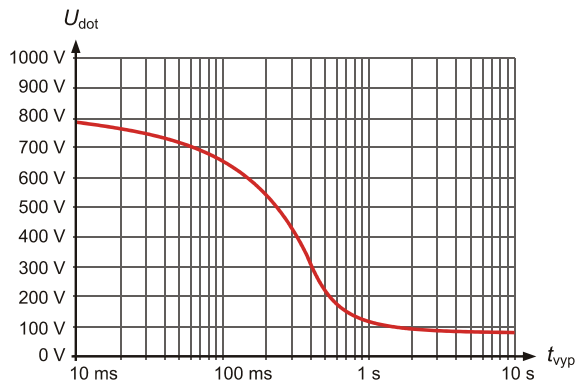
I_z je zbytkový proud na straně vn u sítí kompenzovaných nebo omezený proud jednopólového zkratu u sítí s odporovým uzemněním uzlu.



Obr. 5.26: Spojená uzemnění porucha na straně vn

Ještě nebezpečnější případ by nastal při dvojitým zemním spojení. Protože se předpokládá jen malá četnost takových poruch, nepožaduje [13] při rychlém vypnutí, aby se uzemnění dimenzovalo na dvojitě zemní spojení a ani by to nebylo prakticky možné.

Hodnota dovoleného dotykového napětí U_{dot} je dána s ohledem na dobu trvání průchodu proudu grafem v Obr. 5.27.



Obr. 5.27: Dovolené dotykové napětí v závislosti na době trvání proudu I_z

Z výsledku předcházejícího rozboru vyplývá, že ani spojené, ani rozdělené uzemnění při všech možných poruchách ve stanici není ideálním řešením. Je nutno volit kompromis a provést taková opatření, aby byla v co největší míře zajištěna bezpečnost v síti nn i v transformovně.

Podmínka hodnoty zemního odporu z hlediska poruchy na zařízení vn ve stanici, podle níž se stanoví, zda uzemnění mohou být spojena, platí obecně. Přitom se předpokládá, že dotyková napětí se mohou rovnat celkovému napětí na uzemnění. Tento případ může nastat zejména u menších venkovních sítí nn, na něž jsou připojena převozná zařízení kabelem (např. ve stavebnictví, v zemědělství apod.).

5.5. Literatura

- [1] Secký, F. ČEZ DISTRIBUCE, a. s. Technická politika - rozvoj distribučních sítí a technologických prvků v DSO: Příloha č. 5 - Koncepce venkovních sítí vn. Oddělení Technická politika, 2006
- [2] Secký, F. ČEZ DISTRIBUCE, a. s. Technická politika - rozvoj distribučních sítí a technologických prvků v DSO: Příloha č. 2 - Koncepce venkovních sítí nn. Oddělení Technická politika, 2006
- [3] Parametry vedení a transformátorů [online]. Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava: Katedra elektroenergetiky, [cit. 2012-01-17]. Dostupné z http://fei1.vsb.cz/kat410/studium/f_studium.htm
- [4] Verner, J. Elektrické stanice a vedení. Brno: VUT v Brně, 1985, s. 157
- [5] Štroblová, M., Hejtmánková, P. Elektrické sítě městské a průmyslové. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1994, s. 149, ISBN 80-7082-154-X

- [6] Mertlová, J., Kocmich, M. Elektrické stanice a vedení. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 1997, s. 169, ISBN 80-7082-155-8
- [7] Krychtálek, Z., Pauza, J. Elektrické stanice. Praha: SNTL, 1989, s. 413
- [8] ČSN EN 60076-1: 1999. Výkonové transformátory – Část 1, Český normalizační institut
- [9] ČSN EN 60076-8: 2000. Výkonové transformátory – Pokyny pro použití, Český normalizační institut
- [10] Switchgear manual ABB. 10th edition. Cornelsen Verlag, 1999, ISBN 3-46448236-7.
- [11] ČSN 33 3240: 1989. Stanoviště výkonových transformátorů, Český normalizační institut
- [12] ČSN 33 2000-4-473: 1994. Elektrická zařízení Část 4 – Bezpečnost. Oddíl 473 – Opatření k ochraně proti nadproudům, Český normalizační institut
- [13] ČSN 33 2000-4-43 ed. 2: 2010. Elektrická zařízení Část 4 – Bezpečnost. Oddíl 43 – Ochrana proti nadproudům, Český normalizační institut
- [14] ČSN 33 2000-4-41: 2007. Elektrická zařízení Část 4 – Bezpečnost. Oddíl 41 – Ochrana před úrazem elektrickým proudem, Český normalizační institut
- [15] ČSN 33 2000-5-54: 2007. Elektrické instalace nízkého napětí – Výběr a stavba elektrických zařízení – Uzemnění, ochranné vodiče a vodiče ochranného pospojování, Český normalizační institut
- [16] ČSN 34 1610: 1993. Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách, Český normalizační institut
- [17] ČSN 33 3210: 2002. Rozvodná zařízení. Společná ustanovení, Český normalizační institut
- [18] ČSN EN 50522: 2011. Uzemňování elektrických instalací AC nad 1kV, Český normalizační institut
- [19] Osolsobě, J., Zapletal, M. Zemnění a bezpečnost. Praha: ČSAV, 1964, s. 790
- [20] Kočvara, A. Uzemňování elektrických zařízení. Praha: STRO.M, 1995, s. 94

6. Přepětí v distribučních sítích

6.1. Klasifikace přepětí jako přechodného děje a podmínky jeho řešení

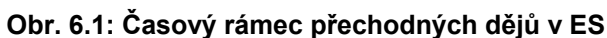
Přepětí je definováno podle [1] jako jakékoli napětí mezi fázemi nebo mezi fází a zemí, které svou velikostí překračuje amplitudu jmenovitého napětí. Norma dále klasifikuje přepětí z hlediska jeho časového průběhu a délky trvání takto:

- **trvalé přepětí** jako napětí síťového kmitočtu, u kterého se efektivní hodnota považuje za konstantní, trvale přivedené k dvojici svorek izolačního uspořádání,
- **dočasné přepětí** jako přepětí síťového kmitočtu poměrně dlouhého trvání,
- **přechodné přepětí** jako krátkodobé oscilační nebo neoscilační obvykle silně tlumené přepětí, které trvá několik milisekund nebo méně. Přechodná přepětí se dále dělí na:
 - přepětí s pomalým čelem - zpravidla unipolární přechodné přepětí s dobou do vrcholu $20 \mu\text{s} < T_1 \leq 5000 \mu\text{s}$ a trváním týlu $T_2 \leq 20 \text{ ms}$,
 - přepětí s rychlým čelem - zpravidla unipolární přechodné přepětí s dobou do vrcholu $0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ a trváním týlu $T_2 < 300 \mu\text{s}$,
 - přepětí s velmi rychlým čelem - zpravidla unipolární přechodné přepětí s dobou do vrcholu $T_1 \leq 0,1 \mu\text{s}$ a se superponovanými oscilacemi s kmitočtem $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ MHz}$ nebo bez nich.

Pro přechodná přepětí se také používá rozdělení na přepětí **spínací** - to jsou přepětí s pomalým čelem a **atmosférická**, což jsou přepětí s rychlým a velmi rychlým čelem. Tato zažitá terminologie vystihuje příčinu vzniku těchto přechodných přepětí v elektrické síti, a proto bude použita i dále v této kapitole. Z výše uvedených definic je patrné, že spínací i atmosférická přepětí jsou velmi rychlými přechodnými ději, které v elektrické síti vznikají buď náhlou změnou v konfiguraci prvků sítě - spínacími operacemi, nebo jako důsledek úderu blesku do některé vnější části sítě.

Přechodný děj je děj plynule spojující dva různé stavy systému a je vždy spojen se změnou energií akumulovaných v jeho jednotlivých částech. Vzhledem k podstatě energie nemohou tyto změny proběhnout skokově a doba, po kterou trvají, vždy odpovídá počtu a typu energetických interakcí, které se ho účastní. Z tohoto pohledu je elektrizační soustava velmi komplikovaným systémem, neboť osahuje značné množství komponent, mezi kterými během přechodného děje dochází k výměnám akumulovaných energií, což samozřejmě plyne z jejího samotného účelu. Pro studium konkrétního přechodného děje v ES je proto důležité vědět v jakém kontextu a z jakých příčin se odehrává a na základě toho vymezit jeho stavový popis. Základní přehled nejčastěji analyzovaných přechodných dějů v elektrizační soustavě dává Obr. 6.1. Jsou v něm zobrazeny ty

Z hlediska klasifikace přechodných dějů jsou tedy přechodná přepětí děje, při kterých dochází k výměnám akumulovaných energií mezi magnetickým polem cívek a elektrickým polem kondenzátorů v elektrických obvodech nahrazujících jednotlivá zařízení elektroenergetického systému a ty budou také reprezentovat dynamický systém, ve kterém se přechodný děj odehrává.



186

6.2. Spínací přepětí

Spínací přepětí vznikají při náhlých změnách parametrů soustavy, jako jsou plánovaná havarijní vypínání a zapínání vedení, transformátorů a jiných elementů sítě a též při zemním spojení a zkratech. Přechodné jevy při těchto pochodech mají oscilační charakter.

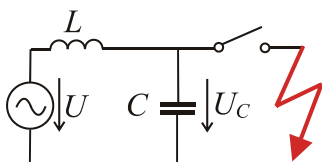
a) Přepětí při zemních spojeních v trojfázových soustavách

Při trvalém zemním spojení v soustavách s izolovaným nulovým bodem nebo se zhášecí tlumivkou vznikají dočasná přepětí o kmitočtu 50 Hz, která mohou být nebezpečná i pro soustavy se jmenovitým napětím větším než 35 kV.

Přechodná přepětí oscilačního charakteru v soustavě s izolovaným nulovým bodem vznikají při zapnutí trvalého zemního spojení, při jeho vypnutí nebo při přerušovaném zemním spojení.

b) Přepětí při vypínání zkratů

Pochody, které vznikají při vypínání zkratových i jiných proudů ve vypínači a v obvodu, jsou podmíněny obvodem (sítí) i vypínačem. Jakmile vypínací mechanismus vypínače dostane impuls, začnou se jeho kontakty oddalovat a vytvoří se mezi nimi oblouk, udržovaný zdrojem proudu až do okamžiku definitivního přerušení proudu. Předpokládejme, že proud vypínáme ideálním vypínačem, jejímuž určíme tyto vlastnosti: před přerušením proudu má vypínací dráha nekonečně velkou vodivost, po přerušení proudu nabude skokem nekonečně velkého odporu a proud se přeruší přesně v nule sinusovky proudu. Hned po přerušení proudu vznikne mezi kontakty vypínače zotavené napětí, které u ideálního vypínače bude určeno jen vlastnostmi obvodu.



Obr. 6.2: Vypínání zkratu - náhradní schéma

Pro výklad pochodu při vypínání proudu uvažujme jednoduchý obvod podle Obr. 6.2. Zdroj o indukčnosti L a kapacitě C je zapojen přes vypínač do zkratu. Předpokládáme zkratový proud, jehož stejnosměrná složka odezněla. Napětí oblouku zanedbáme. Hledáme časový průběh napětí $u_C(t)$ na kontaktech vypínače, tj. průběh zotaveného napětí. Pro napětí v obvodu platí

$$L \frac{di}{dt} + u_C(t) = U \cos \omega t, \quad (6.1)$$

$$\text{kde} \quad i = C \frac{du_C(t)}{dt}. \quad (6.2)$$

Hledané napětí je řešením diferenciální rovnice II. řádu

$$\frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + \frac{u_c(t)}{LC} = \frac{U}{LC} \cos \omega t$$

$$\frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + \omega_0^2 u_c(t) = \omega_0^2 U \cos \omega t$$
(6.3)

kde i je proud obvodu
 U je amplituda napětí zdroje
 ω úhlová frekvence zdroje

Řešení [7]: protože charakteristická rovnice odpovídající výše uvedené diferenciální rovnici má dvojnásobný čistě imaginární kořen, bude úplné řešení této rovnice součtem obecného řešení $u_{c0}(t)$ a partikulárního řešení $u_{cp}(t)$:

$$u_c(t) = u_{c0}(t) + u_{cp}(t),$$
(6.4)

kde

$$u_{c0}(t) = A \cos(\omega_0 t + \varphi),$$
(6.5)

$$u_{cp}(t) = U \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} \cos(\omega t + \Phi),$$
(6.6)

a Φ, φ jsou konstanty.

Počáteční podmínky jsou dány okamžikem přerušení oblouku, kdy je proud vypínačem nulový, stejně jako napětí mezi kontakty vypínače (odpor oblouku je zanedbán)

$$i(0) = C \left. \frac{du_c(t)}{dt} \right|_{t=0} = 0, \quad u_c(0) = 0.$$
(6.7)

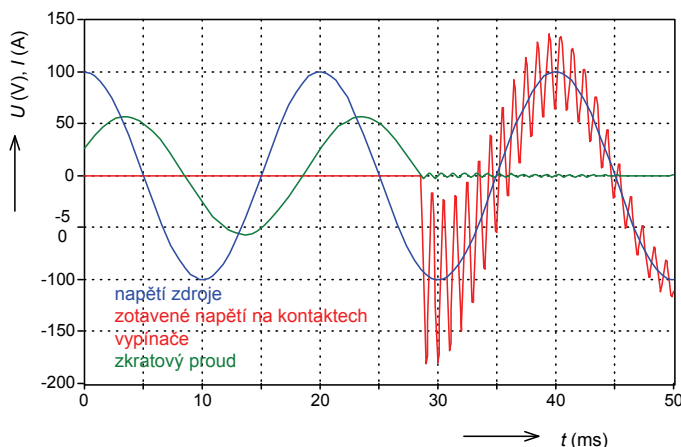
Průběh napětí na kondenzátoru je

$$u_c(t) = U \frac{\omega_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2} (\cos \omega t - \cos \omega_0 t).$$
(6.8)

Za předpokladu, že $\omega_0 \gg \omega$ můžeme psát

$$u_C(t) = U(\cos \omega t - \cos \omega_0 t). \quad (6.9)$$

Po přerušení proudu na kontaktech vypínače se objeví zotavené napětí, které se skládá ze složky o průmyslovém kmitočtu ω , kolem které kmitá přechodná složka kmitočtem rovným vlastnímu kmitočtu obvodu zdroje ω_0 (Obr. 6.3). Frekvence a přechodné složky zotaveného napětí bude záviset na velikosti kapacit a indukčností v obvodu a její útlum bude přímo úměrný velikosti rezistance obvodu.



Obr. 6.3: Průběh zotaveného napětí při vypínání zkratu

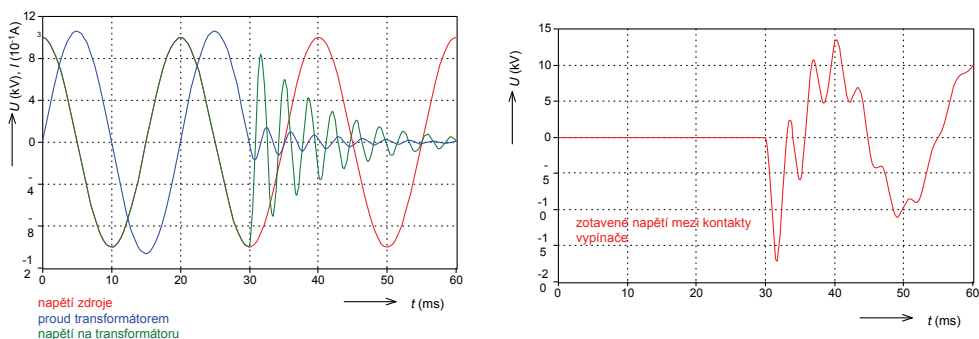
c) Přepětí při vypínání malých induktivních proudů

Vznikají při vypínání transformátorů naprázdno, při vypínání naprázdno motorů s kotvou nakrátko, při vypínání reaktoru nebo kompenzační tlumivky. Přepětí namáhá vypínací dráhu vypínače, která se zpravidla během vypínání prorazí, a tak vzniká tzv. opětový zápal, který se opakuje, dokud vzdálenost mezi kontakty vypínače není tak velká, aby odolala vzrůstu zotaveného napětí.

Nemůže-li se zabránit vzniku přepětí a těmto opětovným zápalům (rychlým vypínačem, paralelními odpory u vypínače), je nutno chránit svorky transformátoru (tlumivky, reaktoru) před přepětím pomocí svodičů. Jako příklad je uveden průběh zotaveného napětí vypínače při vypínání transformátoru (Obr. 6.4)

d) Přepětí při spínání kapacitních proudů

Jako kapacitní označujeme střídavé proudy, které předbíhají napětí zdroje o $\pi/2$. Ke vzniku přepětí může dojít nejen při jejich vypínání, ale na rozdíl od induktivních proudů i při jejich zapínání. Typickými operacemi spínání kapacitních proudů jsou připínání a odepínání kondenzátorové baterie nebo vypínání nezátíženého vedení.



Obr. 6.4: Průběh zotaveného napětí při vypínání transformátoru naprázdno

6.2.1 Atmosférická přepětí

Přepětí vyvolaná bleskem jsou způsobována jednak úbytkem napětí na vodičích, kterými proud blesku prochází, jednak elektromagnetickým polem vzniklým v důsledku bleskového výboje.

a) Přepětí při přímém úderu blesku do vedení

Nejnebezpečnější přepětí vznikají při přímém zásahu blesku do vodiče vedení. Proud blesku se šíří na obě strany od místa zásahu a proto při určitém zjednodušení můžeme velikost přepětí v místě zásahu určit jako úbytek napětí vyvolaný průchodem proudu blesku přes paralelní kombinaci vlnové impedance vedení Z_v . Např. pro vlnovou impedanci vedení 300Ω a amplitudu proudu blesku 30 kA lze očekávat vznik přepětí

$$U = \frac{300}{2} 30000 = 4,5 \text{ MV}.$$

Pravděpodobnost přímého zásahu do vodiče se snižuje zemními lany.

b) Přepětí indukovaná bleskem ve vedeních

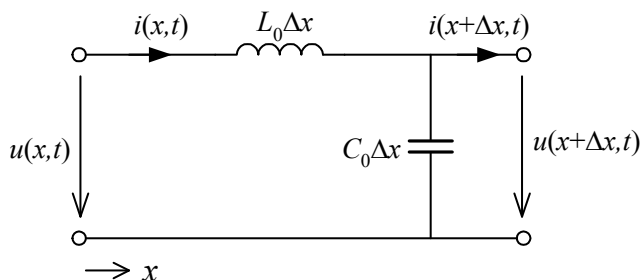
Během bleskového výboje dochází k prudkým změnám elektromagnetického pole, které mohou v elektrických obvodech vyvolat indukovaná napětí. Ke vzniku těchto napětí jsou náchylná zejména venkovní elektrická vedení. Pokud dojde k úderu blesku v malé vzdálenosti od vedení (asi do 5 km), může ve vedení vzniknout napětí nebezpečné pro izolační systém jak vlastního vedení, tak připojených zařízení.

Ve srovnání s přepětími vyvolanými přímým zásahem blesku do vedení jsou napětí indukovaná bleskovým výbojem daleko častější.

6.3. Vlnové pochody na vedeních

6.3.1 Jednofázové bezztrátové vedení

Pro objasnění způsobu šíření přepětových vln po vedeních je použito jednofázové vedení jehož průřez, vzájemná vzdálenost vodičů ani okolní prostředí se nemění, tedy vedení homogenní, které navíc pro zjednodušení budeme uvažovat jako bezztrátové [2]. Na Obr. 6.5 je náhradní schéma úseku o délce Δx takového vedení. Podélná indukčnost tohoto elementu vedení je $\Delta x L_0$ [H] a příčná kapacita $\Delta x C_0$ [F], jestliže indukčnost podél vedení je L_0 [H/m] a vzájemná kapacita obou vodičů C_0 [F/m]. Vzdálenost x se mění v kladném směru od začátku vedení ($x = 0$) ke konci vedení ($x = l$).



Obr. 6.5: Náhradní schéma elementu délky jednofázového bezztrátového vedení

Pro uvedený náhradní obvod (Obr. 6.5) lze psát rovnice pro proud a napětí na základě Kirchhoffových zákonů

$$u(x + \Delta x, t) - u(x, t) = -L_0 \Delta x \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (6.10)$$

$$i(x + \Delta x, t) - i(x, t) = -C_0 \Delta x \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}. \quad (6.11)$$

Vydělením obou rovnic délkou elementu Δx a zavedením limitní hodnoty $\Delta x \rightarrow 0$ do výrazů na jejich levé straně:

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial i(x, t)}{\partial t}, \quad (6.12)$$

$$\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}. \quad (6.13)$$

Pro eliminaci neznámých, kterými jsou proud i a napětí u , v obou rovnicích použijeme následující úpravy:

Rovnici (6.12) dále derivujeme podle x

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = -L_0 \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x \partial t} . \quad (6.14)$$

Rovnici (6.10) derivujeme podle t

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x \partial t} = -C_0 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} . \quad (6.15)$$

Dosazením do pravé strany rovnice (6.14) z rovnice (6.15) dostáváme jednu rovnici pro napětí:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = L_0 C_0 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} . \quad (6.16)$$

Stejným postupem tj. derivací rovnice (6.13) podle x , rovnice (6.12) podle t a substitucí dostáváme rovnici pro proud

$$\frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial x^2} = C_0 L_0 \frac{\partial^2 i(x,t)}{\partial t^2} . \quad (6.17)$$

Tyto rovnice se nazývají vlnové rovnice vedení a jsou to parciální diferenciální rovnice druhého řádu. Jejich analytické řešení je známo jako **d'Alembertovo řešení** vlnových rovnic [3], podle něhož můžeme hodnoty napětí a proudu zapsat pomocí funkcí F a G argumentu $(x \pm vt)$, kde $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ je rychlost šíření.

D'Alembertovým řešením vlnové rovnice proudu (6.17) získáme vztah

$$i(x,t) = F(x - vt) + G(x + vt) , \quad (6.18)$$

jeho dosazením do rovnice (6.12) dostaneme

$$\frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = -L_0 \frac{\partial}{\partial t} [F(x - vt) + G(x + vt)] , \quad (6.19)$$

a následnou integrací obdržíme rovnici pro napětí

$$u(x,t) = L_0 v [F(x - vt) - G(x + vt)] . \quad (6.20)$$

Jestliže dosadíme za $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$, bude rovnice pro vlnu napětí

$$u(x, t) = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} [F(x - vt) - G(x + vt)] . \quad (6.21)$$

Konstantou úměrnosti mezi proudem a napětím je charakteristická nebo-li vlnová impedance

$$Z_v = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} . \quad (6.22)$$

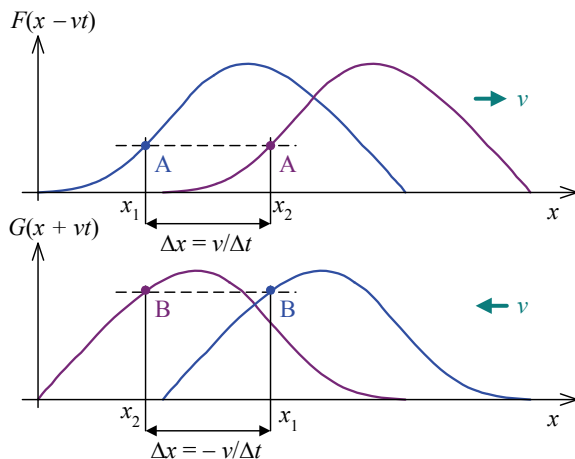
Hodnoty funkcí F a G musí být stanoveny z počátečních nebo okrajových podmínek a jejich fyzikální význam lze demonstrovat následujícím způsobem:

- Zvolíme si konkrétní bod funkce F . Např. pro vlnu proudu, která se šíří ve směru x to bude bod A v čase t_1 a místě x_1 (Obr. 6.6) a budeme se pohybovat stejnou rychlostí jako tato vlna. Znamená to, že hodnota $x - vt = \text{konst}$, my se posuneme za čas Δt o vzdálenost na ose x : $\Delta x = v \Delta t$ a bod A se posune o tuto vzdálenost stejně jako všechny ostatní body funkce $F(x - vt)$. Protože se tato vlna pohybuje v kladném směru osy x označuje se jako vlna postupná.
- Stejným způsobem sledujeme druhou funkci G . Tady pro pozorovatele pohybujícího se rychlostí bodu B této funkce musí platit: $x + vt = \text{konst}$ a tedy $\Delta x = -v \Delta t$, což znamená, že tento bod se pohybuje stejnou rychlostí jako bod A , ale v opačném směru. Tato funkce se nazývá zpětnou vlnou nebo také odraženou, protože její vznik je podmíněn odrazem postupné vlny v místě změny vlnové impedance, které se označuje jako vlnové rozhraní.

Pro analytické řešení vlnových rovnic lze použít také Laplaceovu transformaci [2], kdy rovnice (6.16) a (6.17) přejdou do tvaru

$$\frac{\partial^2 U(x, p)}{\partial x^2} - L_0 C_0 p^2 U(x, p) = 0, \quad (6.23)$$

$$\frac{\partial^2 I(x, p)}{\partial x^2} - L_0 C_0 p^2 I(x, p) = 0. \quad (6.24)$$



Obr. 6.6: Zpětná a postupná vlna v prostorových souřadnicích

Díky přechodu k proměnné p se parciální diferenciální rovnice změni na lineární homogenní diferenciální rovnice 2. řádu, jejichž řešením jsou rovnice

$$U(x, p) = U^+(p) e^{-px\sqrt{L_0 C_0}} + U^-(p) e^{+px\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (6.25)$$

$$U(x, p) = U^+(p) e^{-p\frac{x}{v}} + U^-(p) e^{+p\frac{x}{v}}, \quad (6.26)$$

$$I(x, p) = I^+(p) e^{-px\sqrt{L_0 C_0}} + I^-(p) e^{+px\sqrt{L_0 C_0}}, \quad (6.27)$$

$$I(x, p) = I^+(p) e^{-p\frac{x}{v}} + I^-(p) e^{+p\frac{x}{v}}. \quad (6.28)$$

Hodnoty $U^+(p)$, $U^-(p)$, $I^+(p)$, $I^-(p)$, které jsou obecně funkcí p , ale jsou nezávislé na vzdálenosti x se určí z okrajových podmínek na začátku a na konci vedení.

Hodnota $v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$ je rychlost šíření a originálem k obrazu funkce $F(p) e^{\pm p\frac{x}{v}}$ je

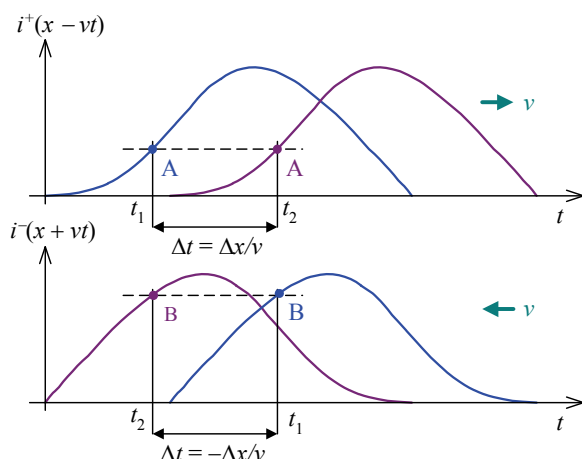
posun v čase $f(t \pm \frac{x}{v})$. Zpětnou Laplaceovou transformací v rovnicích (6.25)

a (6.26) tedy obdržíme obecný tvar proudových a napěťových vln (6.29) a (6.30).

$$u(x, t) = u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) + u^- \left(t + \frac{x}{v} \right), \quad (6.29)$$

$$i(x, t) = i^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) + i^- \left(t + \frac{x}{v} \right). \quad (6.30)$$

Hodnoty $i^+ \left(t - \frac{x}{v} \right)$, $u^+ \left(t - \frac{x}{v} \right)$ a $i^- \left(t + \frac{x}{v} \right)$, $u^- \left(t + \frac{x}{v} \right)$ v nich mají stejný fyzikální význam, který byl popsán u funkcí F a G . Jsou to postupné a zpětné vlny proudu a napětí a jejich pohyb je tady vztažen k času – Obr. 6.7.



Obr. 6.7: Zpětná a postupná vlna v čase

Platí i stejný vztah mezi oběma hodnotami $u(x, t)$ a $i(x, t)$ daný vlnovou impedancí vedení Z_v . Což lze jednoduše dokázat dosazením funkce (6.30) do rovnice (6.13)

$$\frac{\partial \left(i^+ \left(t - \frac{x}{v} \right) + i^- \left(t + \frac{x}{v} \right) \right)}{\partial x} = -C_0 \frac{\partial u(x, t)}{\partial t}, \quad (6.31)$$

$$-\frac{1}{v} \left(i^+ (-vt + x) - i^- (vt + x) \right) = -C_0 u(x, t), \quad (6.32)$$

$$u(x,t) = \frac{1}{C_0 v} \left(i^+(x-vt) - i^-(x+vt) \right), \quad (6.33)$$

$$u(x,t) = \sqrt{\frac{L_0 C_0}{C_0^2}} \left(i^+(x-vt) - i^-(x+vt) \right).$$

Rovnice (6.29) a (6.30) je pak možno zapsat ve tvaru

$$u(x,t) = Z_v \left[i^+(x-vt) - i^-(x+vt) \right] = u_p + u_r, \quad (6.34)$$

$$i(x,t) = i^+(x-vt) + i^-(x+vt) = i_p + i_r. \quad (6.35)$$

V bezztrátovém vedení se šíří obě vlny, postupná i zpětná, beze změny tvaru. To znamená, že součet jejich okamžitých hodnot - $u_p + u_r$ resp. $i_p + i_r$ je okamžitou hodnotou proudu $i(x,t) = i$ a napětí $u(x,t) = u$ v kterémkoli místě

$$u = u_p + u_r, \quad (6.36)$$

$$i = i_p + i_r. \quad (6.37)$$

Konstantou úměrnosti mezi okamžitými hodnotami postupných a odražených vln proudu a napětí je opět vlnová impedance Z_v

$$i = \frac{u_p}{Z_v} - \frac{u_r}{Z_v} = i_p + i_r, \quad (6.38)$$

$$i_p = \frac{u_p}{Z_v}, \quad (6.39)$$

$$i_r = -\frac{u_r}{Z_v}. \quad (6.40)$$

6.4. Vlnové šíření výkonu a energie

Šíření vln napětí a proudu je důsledkem šíření postupné vlny výkonu s okamžitou hodnotou p_p , který do vedení dodává zdroj připojený na počátek vedení. V případě bezztrátového vedení je celý tento výkon přenášen elektromagnetickým polem prostřednictvím kapacity $C = C_0 / l$ a indukčnosti $L = L_0 / l$ vedením délky l [4]

$$w_p = w_m + w_e = \frac{1}{2} L i_p^2 + \frac{1}{2} C u_p^2. \quad (6.41)$$

Dosazením za u_p případně za i_p z rovnice (6.39) dostáváme

$$w_p = C u_p^2 = L i_p^2, \quad (6.42)$$

a potom lze vyjádřit výkon postupné vlny p_p , např. jako

$$p_p = u_p i_p = \frac{u_p^2}{Z_v} = \frac{C u_p^2}{\sqrt{LC}} = w_p v. \quad (6.43)$$

Stejný výraz lze odvodit i pro výkon p_r a energii w_r zpětné vlny

$$p_r = u_r (-i_r) = \frac{u_r^2}{Z_v} = \frac{C u_r^2}{\sqrt{LC}} = w_r v. \quad (6.44)$$

Okamžitá hodnota celkové energie w elektromagnetické vlny šířící se podél vedení je dána součtem uvedených energií

$$w = w_p + w_r = \frac{1}{v} (p_p + p_r) = \frac{p}{v} \quad (6.45)$$

6.5. Vliv impedančního rozhraní na proudové a napěťové vlny

V reálné síti se vlna postupující po vedení dostává k místu, kde jsou k vedení připojeny zdroje, zátěže nebo jiná vedení s rozdílnou velikostí vlnové impedance. Navíc mohou být výkonové prvky se soustředěnými parametry vkládány mezi úseky vedení a nebo vlna přichází k uzlu, kde je připojeno několik různých vedení. Tato místa označujeme jako impedanční rozhraní a jak už bylo zmíněno, hraniční nebo okrajové podmínky jsou výchozím bodem pro řešení vlnových rovnic. Na každém rozhraní musí být zachován poměr vlny proudu a napětí daný charakteristickou impedancí vedení (jinými slovy musí platit Ohmův zákon) a lze tedy očekávat, že vlny napětí a proudu procházející rozhraním změní svoji

amplitudu. V důsledku toho bude energie prošlá rozhraním menší než energie na rozhraní dopadající. Rozdíl mezi těmito energiemi vyvolá vznik odražené vlny napětí a proudu, která se šíří od rozhraní v opačném směru než vlny dopadající (tzn., že vlny na rozhraních respektují Kirchhoffovy zákony). Vztahy mezi vlnami na rozhraní impedancí Z_{v1} a Z_{v2} budou tedy analogicky s (6.36) až (6.40) vyjádřeny následovně:

- vlna proudu dopadající na rozhraní

$$i_p = \frac{u_p}{Z_{v1}}, \quad (6.46)$$

- vlna proudu odražená od rozhraní

$$i_r = -\frac{u_r}{Z_{v1}}, \quad (6.47)$$

- vlna proudu procházející rozhraním

$$i_t = \frac{u_t}{Z_{v2}}. \quad (6.48)$$

Podle Kirchhoffových zákonů pro vlnové rozhraní dále platí

$$u_p + u_r = u_t, \quad (6.49)$$

$$i_p + i_r = i_t, \quad (6.50)$$

$$\frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_r}{Z_{v1}} = \frac{u_t}{Z_{v2}}.$$

Poměrem okamžitých hodnot vln proudu a napětí můžeme charakterizovat rozhraní mezi dvěma rozdílnými prostředími z hlediska jejich odrazu a prostupu. Na základě rovnic (6.50) můžeme psát

$$\frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_r}{Z_{v1}} = \frac{u_p + u_r}{Z_{v2}} \Rightarrow \frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_r}{Z_{v2}} = \frac{u_r}{Z_{v1}} + \frac{u_r}{Z_{v2}} \Rightarrow u_r = \frac{Z_{v1} - Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} u_p,$$

$$\frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_t - u_p}{Z_{v1}} = \frac{u_t}{Z_{v2}} \Rightarrow \frac{u_p}{Z_{v1}} + \frac{u_p}{Z_{v2}} = \frac{u_t}{Z_{v1}} + \frac{u_t}{Z_{v2}} \Rightarrow u_t = \frac{2 Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} u_p.$$

Poměr napětí vlny odražené a napětí vlny dopadající na rozhraní se nazývá **činitel odrazu napětí** ρ_U (6.52).

$$\rho_U = \frac{u_r}{u_p} = \frac{Z_{v2} - Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}}. \quad (6.51)$$

Poměr napětí vlny prošlé rozhraním a napětí vlny dopadající na rozhraní se nazývá **činitel prostupu napětí** σ_U

$$\sigma_U = \frac{u_t}{u_p} = \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}}. \quad (6.52)$$

Obdobně jsou definovány vztahy pro **činitel odrazu proudu** ρ_I

$$\rho_I = \frac{i_r}{i_p} = \frac{Z_{v1} - Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}}, \quad (6.53)$$

a pro činitel prostupu proudu σ_I

$$\sigma_I = \frac{i_t}{i_p} = \frac{2Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}}. \quad (6.54)$$

Pomocí uvedených vztahů dále ukážeme chování napěťových a proudových vln na různých typech rozhraní, která představují některá běžně používaná spojení v elektrických sítích. Pro jednoduchost budeme uvažovat šíření proudových a napěťových vln, které mají obdélníkový tvar - jejich okamžitá hodnota je v čase konstantní.

6.5.1 Vedení konečné délky zatížené vlnovou impedancí $Z_{v2} = Z_{v1}$

V případě spojení dvou stejných vlnových impedancí se v podstatě o vlnové rozhraní nejedná. Jak ukazují hodnoty činitelů odrazu a prostupu určených podle rovnic (6.51) až (6.54), tímto vlnovým rozhraním prochází celá postupná vlna beze změny

$$\rho_U = \frac{Z_{v1} - Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v1}} = 0, \quad \sigma_U = \frac{2Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v1}} = 1,$$

$$\rho_I = \frac{Z_{v1} - Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v1}} = 0, \quad \sigma_I = \frac{2Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v1}} = 1.$$

Poměry na takovém vlnovém rozhraní můžeme jednoduše vyjádřit i graficky (Obr. 6.8).

6.5.2 Rozhraní venkovní vedení – kabel

Impedanční rozhraní mezi venkovním vedením a kabelem je přechodem z prostředí s větší vlnovou impedancí do prostředí s menší vlnovou impedancí

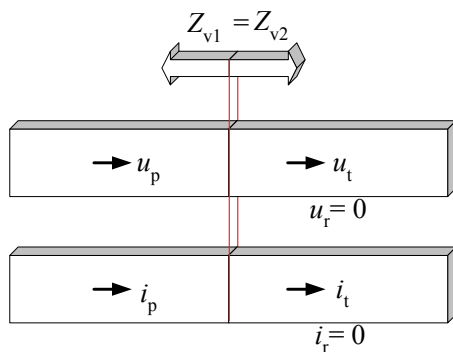
$Z_{v1} > Z_{v2}$, přičemž poměr mezi oběma impedancemi je přibližně 9 : 1, tzn. $Z_{v1} = 9 Z_{v2}$. Hodnoty činitele odrazu a prostupu napětí

$$\rho_U = \frac{u_r}{u_p} = \frac{Z_{v2} - 9Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = -\frac{4}{5}, \quad \sigma_U = \frac{u_t}{u_p} = \frac{2Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{1}{5},$$

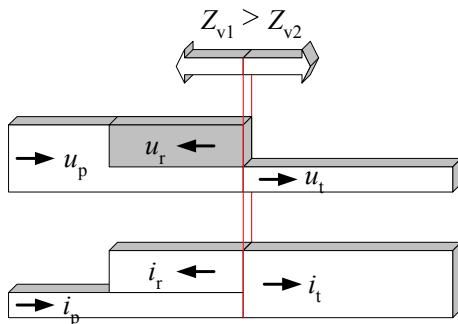
ukazují, že čtyři pětiny napěťové vlny se na rozhraní odrazí s opačnou polaritou a jen jedna pětina prochází do kabelu. Superpozice odražené vlny na vlnu postupnou způsobí snížení hodnoty napětí $u = u_p + u_r = 1 - 4/5 = 1/5$. Z hodnot činitelů odrazu a prostupu proudu

$$\rho_I = \frac{i_r}{i_p} = \frac{9Z_{v2} - Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{4}{5}, \quad \sigma_I = \frac{i_t}{i_p} = \frac{18Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{9}{5},$$

je patrné, že čtyři pětiny proudové vlny se na rozhraní odrazí se stejnou polaritou a téměř dvojnásobek – devět pětín prochází do kabelu. Superpozice odražené vlny na vlnu postupnou způsobí zvýšení hodnoty proudu $i = i_p + i_r = 1 + 4/5 = 9/5$, která odpovídá proudové vlně procházející do kabelu i_t . Celá situace je přehledně znázorněna v Obr. 6.9.



Obr. 6.8: Poměry na rozhraní se stejnými vlnovými impedancemi



Obr. 6.9: Poměry na rozhraní venkovní vedení – kabel

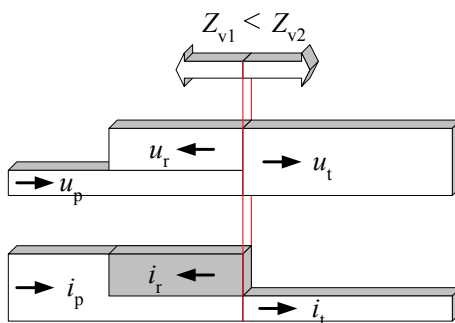
6.5.3 Rozhraní kabel – venkovní vedení

Opačnou situací je vlnové rozhraní přechodu z prostředí s menší vlnovou impedancí do prostředí s velkou vlnovou impedancí $Z_{v1} < Z_{v2}$. Poměr obou impedancí je $Z_{v2} = 9 Z_{v1}$ a činitele odrazu a prostupu:

$$\text{napětí } \rho_U = \frac{9Z_{v1} - Z_{v1}}{Z_{v1} + 9Z_{v1}} = \frac{4}{5}, \quad \sigma_U = \frac{u_t}{u_p} = \frac{18Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{9}{5},$$

$$\text{a proudu } \rho_I = \frac{Z_{v1} - 9Z_{v1}}{Z_{v1} + 9Z_{v1}} = -\frac{4}{5}, \quad \sigma_I = \frac{i_t}{i_p} = \frac{2Z_{v2}}{9Z_{v2} + Z_{v2}} = \frac{1}{5}.$$

Napěťová i proudová vlna, které přecházejí do druhého prostředí, mají stejné znaménko jako vlna přichází. Napěťová vlna prostupující do kabelu je téměř dvojnásobkem vlny dopadající na rozhraní. Z grafického znázornění poměrů na tomto rozhraní (Obr. 6.10) je jasné patrné, jak je namáháno přepětím.



Obr. 6.10: Poměry na rozhraní kabel - venkovní vedení

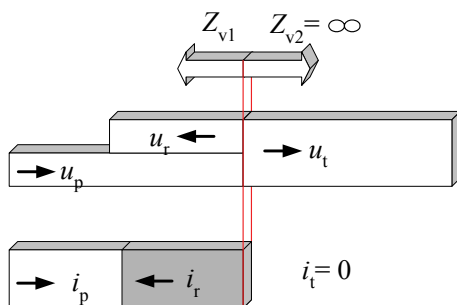
6.5.4 Vedení konečné délky naprázdno

Vedení naprázdno je reprezentováno rozhraním mezi vlnovou impedancí vedení Z_{v1} a nekonečně velkou impedancí rozpojeného konce vedení $Z_{v2} = \infty$. Činitele odrazu a prostupu popisující toto rozhraní mají hodnoty

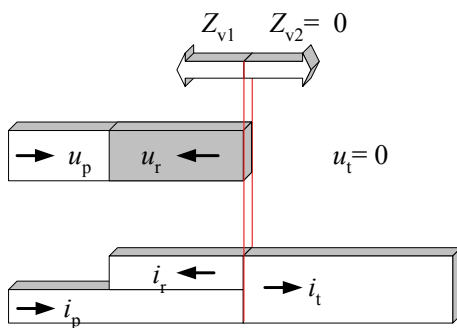
$$\text{pro napětí } \rho_U = \lim_{Z_{v2} \rightarrow \infty} \frac{Z_{v2} - Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}} = 1, \quad \sigma_U = \lim_{Z_{v2} \rightarrow \infty} \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} = 2,$$

$$\text{a pro proud } \rho_I = \lim_{Z_{v2} \rightarrow \infty} \frac{Z_{v1} - Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} = -1, \quad \sigma_I = \lim_{Z_{v2} \rightarrow \infty} \frac{2Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}} = 0.$$

To znamená, že vlna napětí prostupující do druhého prostředí má dvojnásobnou amplitudu. Stejně poměry budou i na rozhraní vedení - ideální zdroj napětí ($Z_i = \infty$). Díky tomu bude v místě připojení vedení k ideálnímu zdroji dvojnásobné napětí (Obr. 6.11).



Obr. 6.11: Poměry na konci vedení naprázdno



Obr. 6.12: Poměry na konci vedení nakrátko

6.5.5 Vedení konečné délky nakrátko

Vedení nakrátko je tvořeno rozhraním mezi vlnovou impedancí vedení Z_{v1} a nulovou impedancí zkratovaného konce vedení $Z_{v2} = 0$. Hodnoty činitelů odrazu a prostupu jsou určeny jako limitní hodnoty

$$\rho_U = \lim_{Z_{v2} \rightarrow 0} \frac{Z_{v2} - Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}} = \lim_{Z_{v2} \rightarrow 0} \frac{Z_{v2} - Z_{v1}}{Z_{v1} \left(1 + \frac{Z_{v2}}{Z_{v1}} \right)} = -1,$$

$$\sigma_U = \lim_{Z_{v2} \rightarrow 0} \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} = \lim_{Z_{v2} \rightarrow 0} \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} \left(1 + \frac{Z_{v2}}{Z_{v1}} \right)} = 0,$$

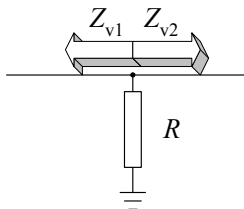
$$\rho_I = \lim_{Z_{v2} \rightarrow 0} \frac{Z_{v1} - Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} = \lim_{Z_{v2} \rightarrow 0} \frac{Z_{v1} - Z_{v2}}{Z_{v1} \left(1 + \frac{Z_{v2}}{Z_{v1}} \right)} = 1,$$

$$\sigma_1 = \lim_{Z_{v2} \rightarrow 0} \frac{2Z_{v1}}{Z_{v1} + Z_{v2}} = \lim_{Z_{v2} \rightarrow 0} \frac{2Z_{v1}}{Z_{v1} \left(1 + \frac{Z_{v2}}{Z_{v1}} \right)} = 2.$$

Poměry na konci vedení nakrátko jsou graficky znázorněny na Obr. 6.12.

6.5.6 Odpor napříč

Pokud je k vlnovému rozhraní impedancí Z_{v1} a Z_{v2} připojen odpor napříč podle Obr. 6.13, budou poměry na takovém rozhraní reprezentovat princip činnosti bezjiskříšového svodiče přepětí.



Obr. 6.13: Vlnové rozhraní s odporem napříč

Dosazením do (6.50) získáme základní rovnici popisující napěťové poměry na tomto rozhraní (6.55) a její úpravou (6.56) dostaneme vztahy pro činitele odrazu (6.57) a prostupu napětí (6.58).

$$i_p + i_r = i_t + i_R \quad \rightarrow \quad \frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_r}{Z_{v1}} = \frac{u_t}{Z_{v2}} + \frac{u_t}{R}, \quad (6.55)$$

$$\frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_t - u_p}{Z_{v1}} = \frac{u_t}{Z_{v2}} + \frac{u_t}{R}, \quad (6.56)$$

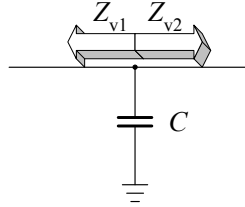
$$\rho_U = \frac{u_r}{u_p} = \frac{\frac{1}{Z_{v1}} - \frac{1}{Z_{v2}} - \frac{1}{R}}{\frac{1}{Z_{v1}} + \frac{1}{Z_{v2}} + \frac{1}{R}}, \quad (6.57)$$

$$\sigma_U = \frac{u_t}{u_p} = \frac{\frac{2}{Z_{v1}}}{\frac{1}{Z_{v1}} + \frac{1}{Z_{v2}} + \frac{1}{R}}. \quad (6.58)$$

Z hodnot ρ_U a σ_U je patrné, že vlnu napětí u_t postupující do druhého prostředí lze snížit zmenšováním odporu R připojeného mezi rozhraní a zem.

6.5.7 Kapacita napříč

V případě, že ke stejnému rozhraní připojíme kapacitu napříč (viz Obr. 6.14), bude takové uspořádání představovat například přechod vedení – kondenzátorová průchodka – transformátor.



Obr. 6.14: Vlnové rozhraní s kapacitou napříč

Při řešení poměrů na rozhraní opět vycházíme z (6.50)

$$i_p + i_r = i_t + i_C \quad \rightarrow \quad \frac{u_p}{Z_{v1}} - \frac{u_r}{Z_{v1}} = \frac{u_t}{Z_{v2}} + C \frac{du_t}{dt}. \quad (6.59)$$

Předpokládá se, že příchozí vlna má strmé čelo: $u_p = U = \text{konst.}$ Rovnici řešíme pomocí Laplaceovy transformace:

$$\frac{U}{Z_{v1}} - \frac{U_t(p) - U}{Z_{v1}} = \frac{U_t(p)}{Z_{v2}} + pCU_t(p), \quad (6.60)$$

$$U_t = \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2} + Z_{v1}Z_{v2}pC} U,$$

$$U_t = \frac{2}{Z_{v1}C \left(\frac{Z_{v1} + Z_{v2}}{Z_{v1}Z_{v2}C} + p \right)} U = \frac{2}{Z_{v1}C T_C + p} U, \quad (6.61)$$

kde $T_C = \frac{Z_{v1} + Z_{v2}}{Z_{v1}Z_{v2}C}$ je časová konstanta obvodu s kondenzátorem kapacity C .

Zpětnou transformací rovnice (6.61) do časové oblasti obdržíme řešení

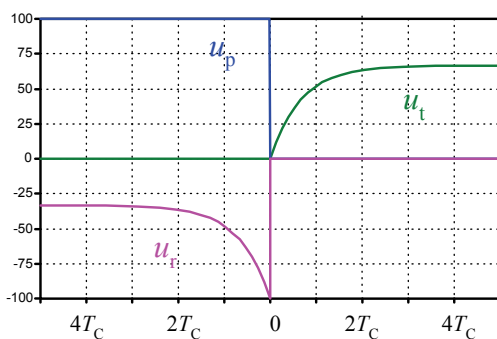
$$u_t = \frac{2}{Z_{v1}C T_C} U \left(1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) = \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} U \left(1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right). \quad (6.62)$$

Do druhého prostředí postupuje exponenciálně rostoucí vlna. Rozhraní se v čase $t = 0$ chová jako nakrátko, v čase $t \rightarrow \infty$ ($t > 3T_C$) jako by na rozhraní kondenzátor nebyl. Odražená napěťová vlna na rozhraní

$$u_r = u_t - u_p = \frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_C}} \right) U - U, \quad (6.63)$$

$$u_r = -\frac{2Z_{v2}}{Z_{v1} + Z_{v2}} U e^{-\frac{t}{T_C}}.$$

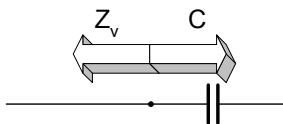
Průběh postupné, odražené i prostupující vlny na rozhraní s příčnou kapacitou je na Obr. 6.15.



Obr. 6.15: Napěťové poměry na vlnovém rozhraní s kapacitou napříč

6.5.8 Kapacita podélně

Vedení ukončené kapacitou je vlnovým rozhraním na Obr. 6.16. Toto uspořádání představuje například vložený sériový kondenzátor pro zvýšení stability přenosu a pro kompenzaci úbytků napětí.



Obr. 6.16: Vlnové rozhraní vedení – kondenzátor

Při řešení poměrů na rozhraní opět vycházíme z (6.50)

$$i_p + i_r = i_C \quad \rightarrow \quad \frac{u_p + u_r}{Z_v} = C \frac{du_t}{dt} \quad (6.64)$$

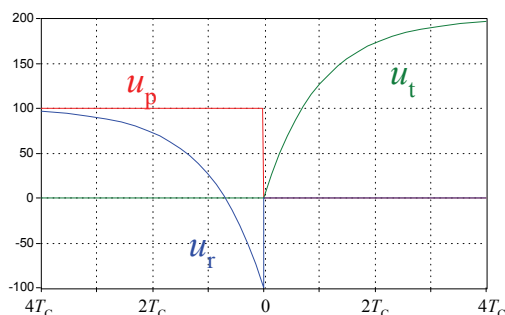
a opět se předpokládá, že příchozí vlna má strmé čelo: $u_p = U = \text{konst.}$ Po Laplaceově transformaci obou rovnic a úpravách obdržíme řešení průběhu postupující vlny

$$u_t = 2 U \left(1 - e^{-\frac{t}{T_c}} \right), \quad (6.65)$$

kde $T_c = \frac{1}{C Z_v}$ je časová konstanta. Odražená vlna na rozhraní bude mít průběh

$$u_r = u_t - u_p = 2 U \left(1 - e^{-\frac{t}{T_c}} \right) - U = U \left(1 - 2e^{-\frac{t}{T_c}} \right). \quad (6.66)$$

Do druhého prostředí v čase $t=0$ napěťová vlna neproniká, jako by na rozhraní kondenzátor nebyl - vedení se chová jako vedení nakrátko. S rostoucím časem průchozí vlna roste a v čase $t = \infty$ ($t > 3 T_c$) je dvojnásobkem vlny příchozí - rozhraní odpovídá chodu naprázdno (viz Obr. 6.17).



Obr. 6.17: Napěťové poměry na vlnovém rozhraní vedení – kondenzátor

6.6. Bergeronova metoda pro řešení vlnových pochodů na vedení

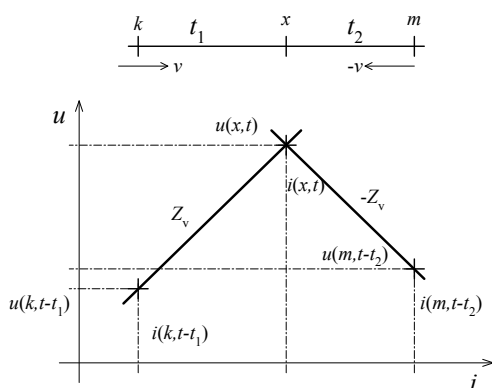
V roce 1937 vyvinul Francouz Bergeron jednoduchou grafickou metodu pro řešení vlnových pochodů na vedení. Aplikoval postup původně používaný v hydraulice k vyšetření průběhů napětí a proudů na vlnových rozhraních (odtud název jeho stěžejního díla v anglickém překladu: Water Hammer in Hydraulics and Wave Surge in Electricity). Analýza vlnových pochodů pomocí této grafické metody je velmi přehledná a umožňuje řešit přepěťové jevy i ve složitějších obvodech (řadu příkladů uvádí [3],[5]). Vychází z řešení vlnových rovnic dlouhého vedení (6.18) a (6.20), ze kterých se vyjádří postupná a zpětná vlna pomocí okamžitých hodnot napětí a proudu v daném místě a čase (6.67) a (6.68).

$$u(x,t) + Z_v i(x,t) = F(x - vt), \quad (6.67)$$

$$u(x,t) - Z_v i(x,t) = G(x + vt). \quad (6.68)$$

Levá strana obou rovnic zůstává konstantní, pokud je konstantní i argument funkce na pravé straně. To bude platit, podobně jako v 6.1, pro pozorovatele, který se pohybuje rychlostí vlny postupující v kladném smyslu od začátku vedení k ke konci vedení m (Obr. 6.18) a udržuje tak konstantní vzdálenost $x - vt$ a tedy i hodnota $u + Z_v i$ zůstává stále stejná. Za stejného předpokladu je hodnota $u - Z_v i$ konstantní pro pozorovatele postupujícího opačným směrem, od konce vedení m k jeho začátku k .

V napěťově proudovém diagramu (Obr. 6.18) lze určit stav v bodě x v čase t a jeho souřadnice $u(x,t)$ a $i(x,t)$, pokud jsou známy stavy v bodech k a m na vedení o vlnové impedanci $Z_v = \frac{u}{i}$ v časech $t - t_1$ a $t - t_2$, kde t_1 je doba potřebná k postupu vln z bodu k do bodu x a t_2 je doba, za kterou se vlny proudu a napětí dostanou do téhož bodu z místa m na vedení. Jedná se o průsečík přímk daných jejich směrnici Z_v a $-Z_v$ a souřadnicemi bodů $[k, t - t_1]$ a $[m, t - t_2]$ a pro určení napětí a proudů v tomto bodě je nutno dbát především toho, aby pozorovatelé (vlny postupující v obou směrech) dorazili do sledovaného bodu vždy v jeden okamžik.

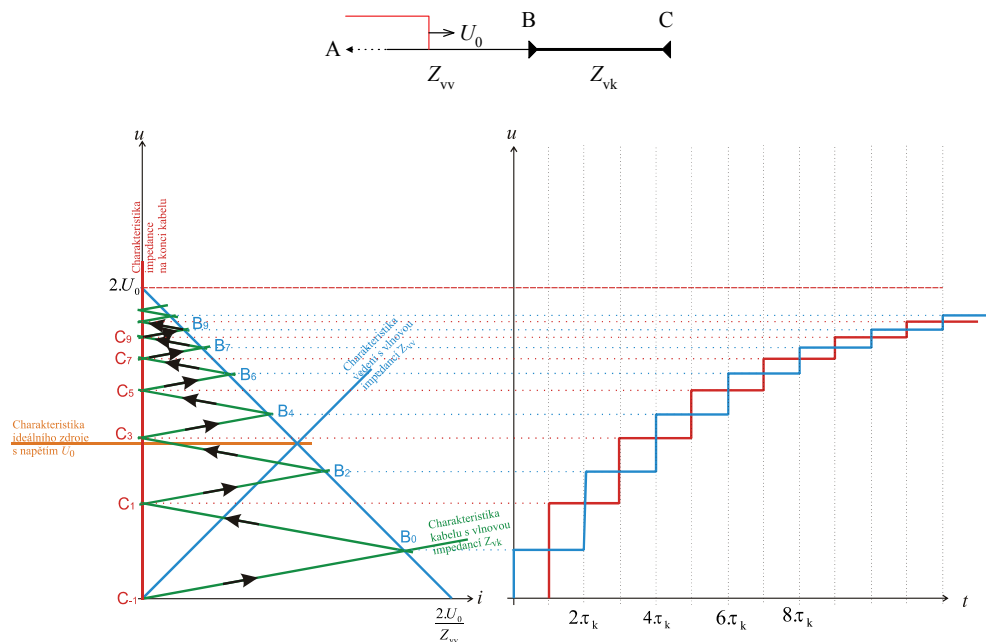


Obr. 6.18: Princip Bergeronovy grafické metody

6.6.1 Příklad použití Bergeronovy grafické metody

Aplikaci uvedené metody lze demonstrovat na jednoduchém příkladu řešení poměrů na začátku a na konci kabelu s vlnovou impedancí Z_{vk} připojeného

přes dlouhé vedení s vlnovou impedancí Z_{vv} ke zdroji s konstantním napětím U_0 (Obr. 6.19). Kabel má délku l_k a je na konci otevřený ($Z_{v2} = \infty$). Předpokládá se, že napětí na kabelu na počátku vlnového pochodu bylo nulové.



Obr. 6.19: Příklad použití Bergeronovy metody

V Obr. 6.19 je Bergeronův diagram pro řešení uvedeného příkladu. Dané hodnoty impedancí Z_{vv} a Z_{vk} se v rovině $u-i$ zobrazí jako přímky s odpovídajícím sklonem, které procházejí body počátečních stavů proudů a napětí v jednotlivých místech vedení a kabelu. Vlna postupující v kladném směru přichází ze vzdáleného bodu A na začátku vedení s vlnovou impedancí Z_{vv} , kde je na počátku nulový proud a napětí $2U_0$ a vlna postupující v opačném směru přichází z bodu C_{-1} na konci kabelu, aby v čase $t=0$ dorazila do bodu B_0 . Průsečík přímek $2U_0(-Z_{vv})$ a $C_{-1}(Z_{vk})$ udává stav bodu B_0 v tomto čase. Z tohoto bodu vychází pozorovatel ke konci kabelu po přímce $-Z_{vk}$ a stav v bodě C_1 leží na průsečíku osy napětí a této přímky vedené z B_0 (stav je dán podmínkou nulového proudu na konci otevřeného kabelu). Z bodu B_0 lze vyslat pozorovatele i do bodu A, pokud bychom chtěli zjistit tak jeho stav. Předpokládáme-li ale, že tento bod je v nekonečně velké vzdálenosti od rozhraní kabel – vedení (od bodu B) a tudíž nemůže dojít k jakémukoli ovlivnění vlnových poměrů bodu B odrazem z bodu A, pak není potřeba znát vlnové poměry na tomto rozhraní.

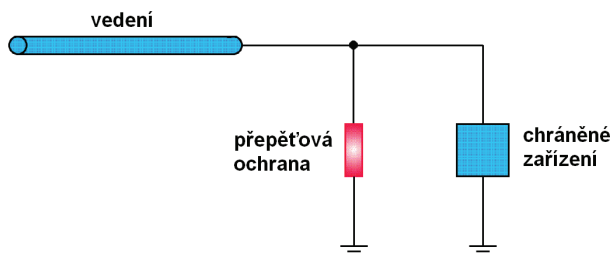
Z uvedeného postupu je patrné, že v Bergeronově metodě se čas objevuje pouze jako parametr a časový průběh napětí a proudu v daném bodě lze tudíž získat vynášením souřadnic průsečíků Bergeronových přímek v po sobě následujících časových intervalech. V obecném případě řešení vlnového procesu v obvodu s několika vedeními je nutno vyslat tolik pozorovatelů, kolik je úseků

vedení a s maximálním časovým intervalem odpovídajícím dvojnásobku postupu vlny nejkratším úsekem. Pro přesnější určení průběhů napětí nebo proudů v daném místě, lze volit hustší síť přímk, tzn. menší časový interval. To je nutné zvláště v případě proměnného průběhu napětí zdroje, nebo pokud je vlnové rozhraní tvořeno prvem s nelineární voltampérovou charakteristikou.

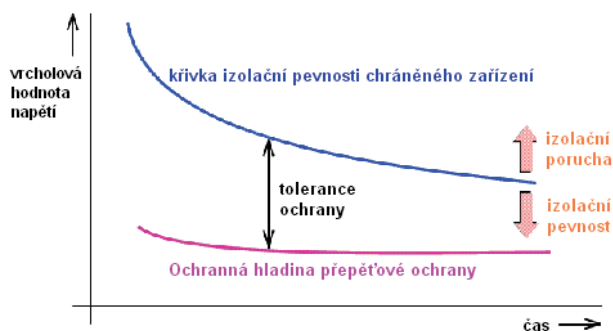
Z Bergeronovy metody je odvozeno numerické řešení vlnových pochodů na dlouhých vedeních, které se později stalo základem pro model vedení s rozprostřenými parametry v simulačních programech pro řešení elektromagnetických přechodných dějů. Tento numerický model vedení se pak označuje jako Bergeronův.

6.7. Ochrany před přepětím

Přepět'ové ochrany jsou zařízení pro ochranu před účinky přepětí a mají zajistit, aby na chráněném zařízení nevzniklo napětí vyšší než dovolené. Všechny pro tento účel shodně používají změnu impedance v závislosti na napětí, ale vzhledem k různým konstrukcím se jejich vlastnosti mohou velmi významně měnit a používají se vždy zapojované paralelně k chráněnému zařízení, jak je schematicky naznačeno v Obr. 6.20.



Obr. 6.20: Připojení přepět'ové ochrany



Obr. 6.21: Koordinace ochranné hladiny svodiče a izolační pevnosti chráněného zařízení

Aby byla přepětová ochrana spolehlivá a funkční, musí být zvolena tak, aby její ochranná hladina byla v určitém odstupu pod úroveň elektrické pevnosti chráněného zařízení. Na Obr. 6.21 je uveden způsob koordinace ochrany a chráněného zařízení pomocí křivek udávajících průraznou hladinu ochrany i chráněného zařízení v závislosti na maximální hodnotě přepětové vlny a době jejího trvání.

Každá přepětová ochrana by měla splňovat následující kritéria:

- její impedance musí být za normálních provozních podmínek tak velká, aby místem jejího připojení neprocházel buď žádný, nebo jen minimální proud (řádově mA),
- při zvýšení napětí nad ochrannou hladinu musí snížit svou impedanci a umožnit průchod výbojového proudu do země,
- pojmout energii výboje aniž by se poškodila,
- obnovit svou impedanci po odeznění výboje a vrátit tak chráněnou část systému do normálních provozních podmínek.

6.7.1 Druhy přepětových ochran

6.7.1.1 Ochranná jiskřiště

Jsou konstrukčně nejjednoduššími přepětovými ochranami. Změna impedance nastává zapálením elektrického výboje mezi elektrodami jiskřiště. Nevýhodou jiskřiště je setrvávající malá impedance i po odeznění přepětí, neboť oblouk mezi elektrodami je po zapálení udržován jmenovitým napětím soustavy. Říkáme, že jiskřištěm prochází následný proud ze soustavy, který představuje pro soustavu zkrat nebo zemní spojení. K uhašení oblouku mezi elektrodami je nutno postiženou část sítě vypnout.

6.7.1.2 Vyfukovací bleskojistky

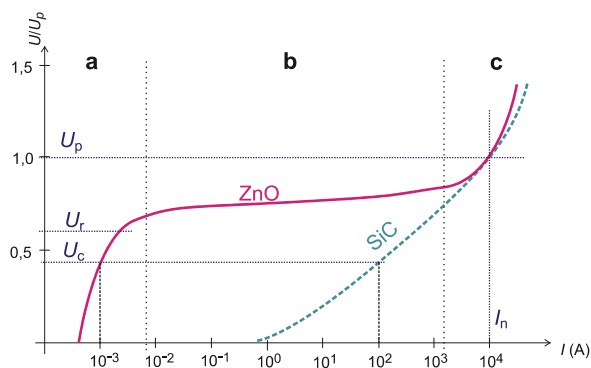
Torokova trubice (jinak také vyfukovací bleskojistka) nevýhodu ochranných jiskřišť částečně odstraňuje tím, že přeruší oblouk expanzí plynů vyvolanou hořením oblouku na jiskřišti, které je umístěno v trubici a zapojeno v sérii se zapalovacím jiskřištěm. Uvedený mechanismus zhášení oblouku způsobuje značnou závislost mezi velikostí proudu procházejícího bleskojistkou a strmostí zotaveného napětí a také krátkou životnost bleskojistky související s degradací plynotvorné látky. V současné době se již tato zařízení na ochranu před přepětím nepoužívají.

6.7.1.3 Svodiče přepětí s nelineárními odpory

Nelineární odpory mohou měnit rezistanci v širokém rozsahu přiloženého napětí a zajistit tak spolehlivě funkci přepětové ochrany s odpovídajícími požadavky uvedenými v úvodu kapitoly. Voltampérovou charakteristiku svodiče s nelineárním odporem lze obecně popsat vztahem (6.69).

$$I = kU^\alpha, \quad (6.69)$$

kde mocnitel α bude záviset na materiálu a na velikosti přiloženého napětí. V Obr. 6.22 jsou uvedeny voltampérové charakteristiky nelineárních odporů vyrobených z oxidu zinku (ZnO) a karbidu křemíku (SiC). Z V-A charakteristiky svodiče ze ZnO je patrné, že hodnota mocnitele nabývá různých hodnot podle přiloženého napětí – v oblasti **a** a **c** je to v rozmezí hodnot $0 < \alpha \leq 5$, v oblasti **b** je $\alpha \approx 50$. Pro nelineární odpor z SiC je možno do rovnice dosadit za hodnoty α v rozmezí 5 až 7.



Obr. 6.22: V-A charakteristiky napětově závislých odporů

Ventilové bleskojistiky

Ventilová bleskojistka je starším typem svodiče přepětí, který používá pro ochranu před přepětím napětově závislého odporu z karbidu křemíku. V Obr. 6.22 je vidět, že díky V-A charakteristice odporu SiC, jím v oblasti provozního napětí (U_c) protéká proud srovnatelný s jmenovitým proudem chráněného zařízení (řádově stovky ampér). Proto je třeba tomuto napětově závislému odporu předřadit jiskřiště, které při normálních napětí odděluje tento odpor od sítě a zajišťuje tak velkou impedanci svodiče. Díky tomuto konstrukčnímu opatření mají tyto svodiče poněkud vyšší zapalovací napětí a potřebují pomocný obvod pro přerušení oblouku mezi kontakty jiskřiště.

Základními charakteristikami bleskojistik jsou podle [10]:

- **Jmenovité napětí** - maximální přípustná efektivní hodnota střídavého napětí průmyslového kmitočtu mezi svorkami bleskojistiky, pro které je navržena tak, aby správně působila.
- **Zapalovací napětí** při normalizovaném atmosférickém impulzu je nejnižší vrcholová hodnota impulzu napětí $1,2/50$, který vždy vyvolá zapůsobení bleskojistiky.

- *Zbytkové napětí* při jmenovitém výbojovém proudu – úbytek napětí na bleskojistce vyvolaný průchodem výbojového proudu, které určují ochrannou hladinu bleskojistky.
- *Jmenovitý výbojový proud* – vrcholová hodnota výbojového proudu 8 / 20, který je schopna bleskojistka svést bez poškození.
- *Ochranná hladina bleskojistky* je určena zbytkovým napětím při jmenovitém výbojovém proudu.

Zapalovací napětí vyjadřuje dynamické vlastnosti bleskojistky a je odvozené z rázové charakteristiky svodiče, zatímco zbytkové napětí souvisí s voltampérovou charakteristikou svodiče a vyjadřuje tak jeho statické vlastnosti.

Svodiče přepětí se ZnO (MOV – Metal Oxid Valve)

Svodiče přepětí se ZnO lze v současnosti považovat za nejspolehlivější a nejrozšířenější svodiče přepětí v distribučních sítích vn a počínaje rokem 1975, kdy byly uvedeny na trh, téměř zcela nahradily ventilové bleskojistky. Napěťově závislé odpory ZnO lze použít jako svodiče přímo bez zařazení zapalovacích jiskřišť díky jejich ploché charakteristice. V Obr. 6.22 lze snadno porovnat velikost zbytkového proudu procházejícího odporem ZnO při jmenovitém napětí U_c s hodnotou zbytkového proudu odporu SiC. Statické V-A charakteristiky omezovačů se měří v jejich jednotlivých částech různým způsobem - při hodnotách napětí v blízkých hodnotám nominálních se měří při základní frekvenci a v oblasti působení ochrany (U_p) se testují proudovými impulsy.

Základními charakteristikami omezovačů přepětí jsou podle [10]:

- *Trvalé provozní napětí* (U_c) – nejvyšší přípustná hodnota sinusového napětí průmyslového kmitočtu, které může být trvale připojeno na svorky omezovače přepětí:

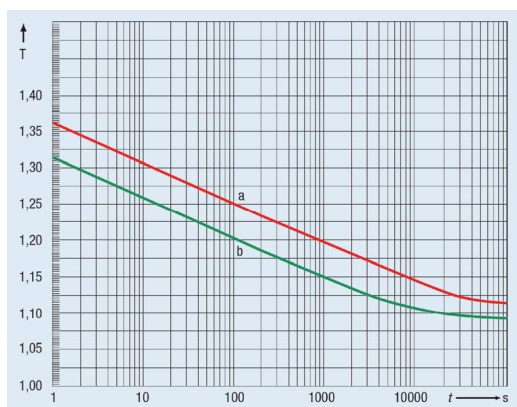
- u sítí s automatickým vypínáním zemní poruchy $U_c \geq \frac{U_m}{\sqrt{3}}$,
- v izolovaných nebo kompenzovaných sítích $U_c \geq U_m$.

Trvalé provozní napětí musí být voleno s ohledem na předpokládaná

dočasná přepětí U_{TOV} a dobu, po kterou tato přepětí působí $U_c \geq \frac{U_{TOV}}{T(t)}$.

- *Jmenovité napětí* (U_n) – nejvyšší střídavé napětí průmyslového kmitočtu, které se používá při zkoušce provozní funkce po dobu 10 s. Tato hodnota napětí přiložená mezi svorky svodiče po dobu 10s nesmí ovlivnit jeho funkci.
- *Zbytkové napětí při jmenovitém výbojovém proudu* (U_{res}) – úbytek napětí na bleskojistce vyvolaný průchodem výbojového proudu, které určují ochranou hladinu bleskojistky.

- *Jmenovitý výbojový proud (I_n)* je vrcholová hodnota atmosférického proudového impulsu, která se používá pro klasifikaci omezovače přepětí. Jeho hodnota může být 5, 10 nebo 20 kA.
- *Ochranná hladina (U_p)* je určena ze zbytkových napětí při atmosférickém a spínacím impulsu.
- *Třída vybití vedení* charakterizuje schopnost omezovače absorbovat energii výbojového proudu odpovídajícího tvaru a amplitudy. Podle velikosti této energie jsou svodiče klasifikovány třídou vybití. Omezovačům s nominálním výbojovým proudem 10 kA se přiřazují třídy vybití 1, 2, 3 a třídu vybití 4 nebo 5 mají svodiče s nominálním výbojovým proudem 20 kA. Svodiče s nižšími hodnotami výbojových proudů (5 kA, 2,5 kA) klasifikaci třídou vybití nemají.



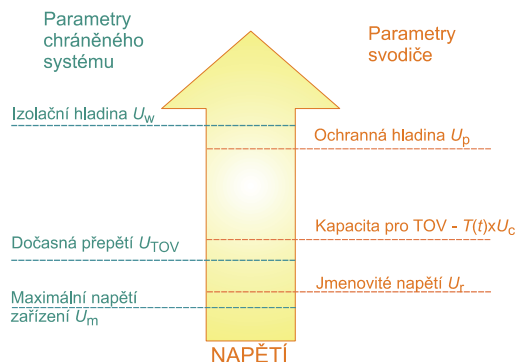
Obr. 6.23: Příklad koordinace U_c a dočasného přepětí U_{TOV} [14]: a – pro svodič bez předchozího zatížení, b – pro svodič s předchozím zatížením definovaným hodnotou EIU_c

Příklad volby U_c : Omezovač přepětí s $U_c = 24$ kV by mohl být provozován při U_c po libovolně dlouhou dobu. Pokud se v síti bude vyskytovat dočasné přepětí $U_{TOV} = 28$ kV, tzn. $T = U_{TOV}/U_c = 1,17$, pak nesmí být delší než 3000s v případě, že neuvažujeme předchozí zatížení svodiče (viz charakteristika **a** v Obr. 6.23). V případě, že budeme předpokládat zatížení svodiče bezprostředně před vznikem dočasného přepětí, zkrátí se dovolená doba působení U_{TOV} na 400 s (viz charakteristika **b** v Obr. 6.23). Jestliže je předpoklad, že dočasné přepětí bude trvat delší dobu, musí by svodič dimenzován na větší hodnotu U_c .

Návrh svodiče přepětí spočívá především ve stanovení jeho jmenovitého napětí, nominálního výbojového proudu a třídy vybití. Volbu jmenovitého napětí lze provést na základě diagramu na Obr. 6.24.

Volba třídy vybití omezovačů závisí na napětí sítě, ve které je použit. Omezovače v sítích s vyšším napětím musí mít větší energetickou kapacitu, než omezovače v sítích nižších napětí. V sítích vn se nečastěji používají omezovače

bez klasifikace ($I_n = 5$ kA) nebo omezovače třídy vybití 1 a 2 ($I_n = 10$ kA). V sítích 110 kV se instalují omezovače třídy vybití 2 a 3 ($I_n = 10$ kA). Pro síť 220 kV a 400 kV jsou určeny omezovače třídy vybití 2, 3 ($I_n = 10$ kA) a 4, 5 ($I_n = 20$ kA).



Obr. 6.24: Relace mezi charakteristickými parametry omezovače přepětí a chráněného systému

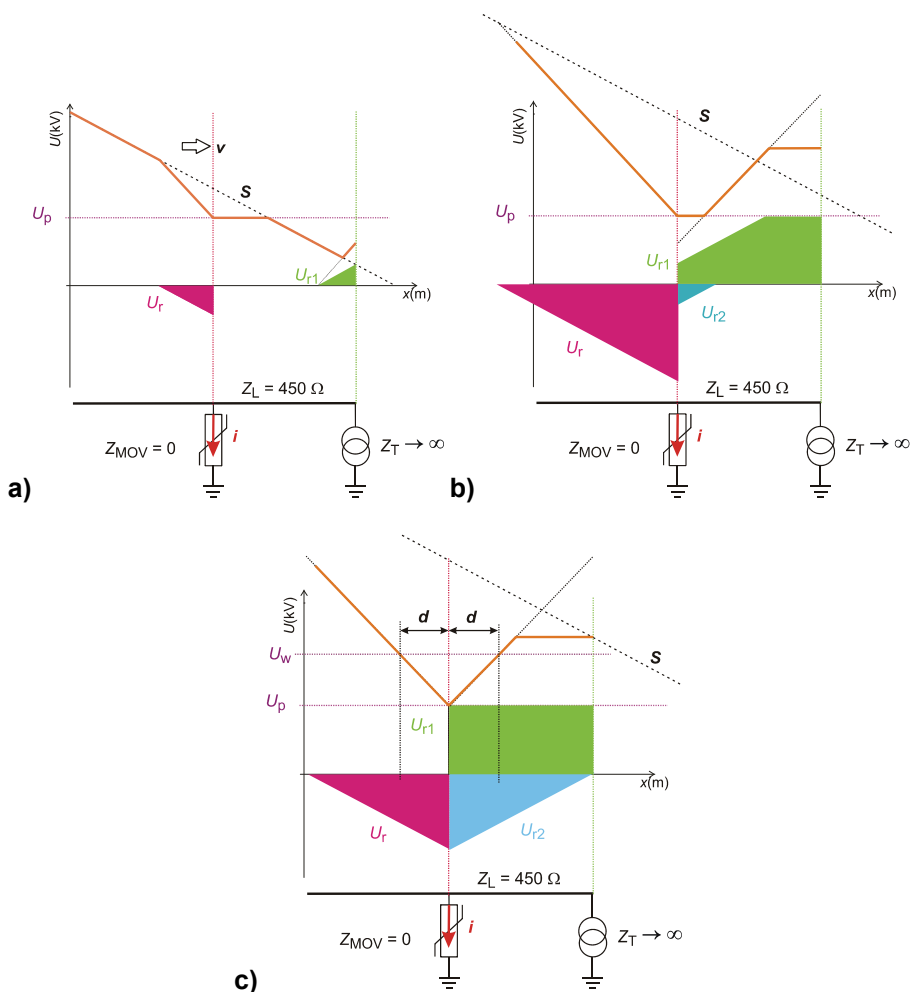
6.7.1.4 Umístění svodičů přepětí

Svodič představuje pro přepětovou vlnu rozhraní, na které se vlna z části odrazí a zčásti jím projde. Chrání-li svodič např. transformátor, jehož impedance je velká, dojde po příchodu již omezené vlny na transformátor k jejímu odrazu a tím ke vzniku napětí odpovídajícímu dvojnásobku zapalovacího napětí svodiče.

Na Obr. 6.25 jsou napěťové poměry v místě připojení svodiče, jehož ochranná hladina U_p je v daném případě dána jeho zbytkovým napětím U_{res} při průchodu svodového proudu i . Po příchodu přepětové vlny, která se pohybuje rychlostí $v = 300$ m/ μ s a má strmost S [kV/s], do místa svodiče dochází k jejímu úplnému prostupu až do okamžiku, kdy napětí na svodiči vzroste, jeho impedance klesne a svodičem začne protékat svodový proud. Počínaje tímto napětím se místo připojení svodiče se začne chovat jako vlnové rozhraní, na kterém dochází k částečnému prostupu a částečnému odrazu. Vzhledem k velmi malé impedanci svodiče bychom mohli považovat napěťové poměry na tomto rozhraní za stejné jako na konci vedení nakrátko s tím, že vlna prostupující za svodič bude mít amplitudu odpovídající ochranné hladině svodiče U_p . Odražená vlna U_r má stejný tvar jako vlna příchozí, ale opačnou polaritu a díky její superpozici s vlnou příchozí dochází k poklesu napětí před svodičem (stejně jako v odstavci 6.5.5). V okamžiku, kdy průchozí vlna dosáhne místa, kde je připojeno chráněné zařízení (viz Obr. 6.25 a) - v našem případě transformátor - odrazí se v tomto místě s dvojnásobnou amplitudou $2xU_{r1}$, protože uvedené rozhraní lze díky velké impedanci transformátorové průchodky považovat za vedení naprázdno (viz odst. 6.5.4).

V okamžiku, kdy vlna odražená $2xU_{r1}$ přichází zpět k rozhraní se svodičem, odrazí se zpět se zápornou amplitudou U_{r2} . Díky tomu zůstává napětí na svodiči na hodnotě U_p (Obr. 6.25 b). Superpozicí vln U_{r1} a U_{r2} je dán průběh napětí za svodičem po uplynutí času, ve kterém přepětová vlna projde od svodiče

k transformátoru a zpět. Z Obr. 6.25 c) je patrné, že napětí v místě připojení svodiče zůstává konstantní (U_p) a v obou směrech od něj stoupá se strmostí $2 \times S$.

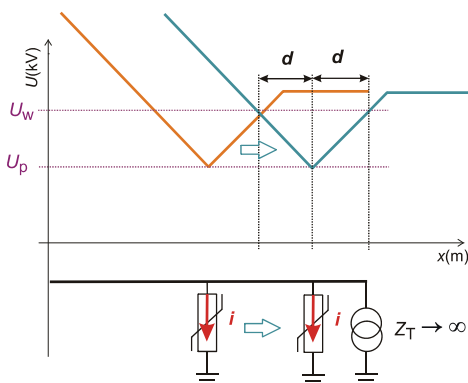


Obr. 6.25: Ochranná vzdálenost svodiče

Pokud v Obr. 6.25 c) vyznačíme hodnotu výdržného napětí transformátoru U_w , která reprezentuje jeho elektrickou pevnost, můžeme na ose vzdálenosti x vyznačit rozměr d okolí svodiče, ve kterém je napětí po celou dobu trvání přepětového jevu nižší než úroveň napětí U_w . Tento rozměr udává ochrannou vzdálenost svodiče a lze jej určit jako

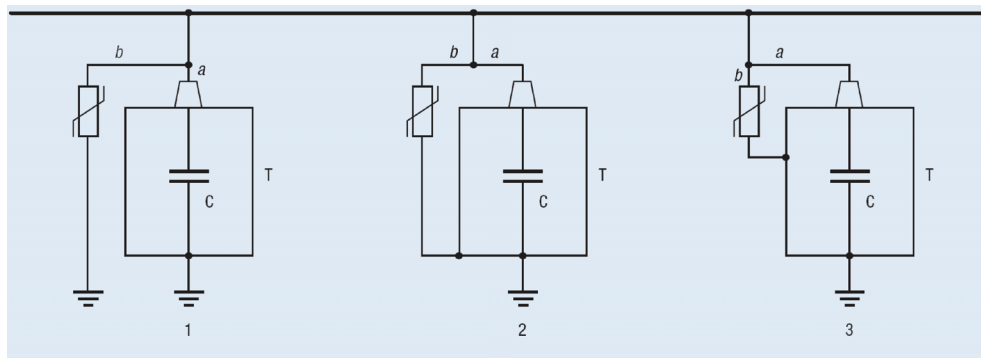
$$d = \frac{U_w - U_p}{2S} v. \quad (6.70)$$

Na základě průběhu napětí v Obr. 6.25 c), lze konstatovat, že umístění svodiče před chráněným transformátorem je nevhodné a pokud má svodič správně působit, je nutné ho připojit blíže k transformátoru – viz Obr. 6.26.



Obr. 6.26: Umístění svodiče přepětí

Na Obr. 6.27 jsou uvedeny příklady způsobu připojení svodiče k chráněnému transformátoru. V případě 1 je svodič z pohledu přichozí vlny přepětí připojen dále než průchodka transformátoru ($b > a$), navíc mají obě zařízení rozdílný uzemňovací bod. Jedná se o příklad nevyhovujícího umístění přepětěvé ochrany. Druhý způsob připojení lze považovat za vyhovující ($b = a$), pokud bude platit, že $b + a < d$. Nejlepším řešením je případ zapojení 3, kdy vzdálenost b ke svodiči je téměř nulová a přichozí přepětěvá vlna tak dosáhne nejprve svodiče a pokud je $a < d$, neobjeví se během přepětěvého jevu na transformátorové průchodce napětí vyšší, než je její elektrická pevnost.



**Obr. 6.27: Příklady umístění svodiče pro chránění transformátoru:
1- špatné umístění, 2- postačující, 3- správné [14]**

6.8. Literatura

- [1] ČSN EN 60071-1: 2010. Koordinace izolace. Část 1: Definice, principy a pravidla. Český normalizační institut
- [2] Glower, J. D., Sarma M. S. Power System Analysis and Design. Brooks/Cole, 2002, p. 656, ISBN 0-387-28797-3
- [3] Shenkman, A. L. Transient Analysis of Electric power Circuits Handbook. Springer, 2005, p. 569, ISBN 0-387-28797-3
- [4] Hasman, T. Přepětí v elektroenergetických soustavách. Praha: Skriptum ČVUT, 1997, s. 129, ISBN 80-01-02952-2
- [5] Jirků, J., Popolanský, F. Atmosférická přepětí v rozvodu elektrické energie. Praha: SNTL, 1966, s. 254
- [6] Veverka, A. Technika vysokých napětí. Praha: SNTL, 1982, s. 301
- [7] Hassman, T. Přepětí v elektroenergetických soustavách. Skriptum ČVUT, 1997
- [8] ČSN EN 60071-2: 2000. Koordinace izolace. Část 2: Pravidla pro použití. Český normalizační institut
- [9] ČSN IEC 60-1: 2011. Technika zkoušek vysokým napětím. Část 1: Obecné požadavky na zkoušek, Český normalizační institut
- [10] ČSN EN 60099-5: 1999. Svodiče přepětí. Část 5: Doporučení pro volbu a použití. Český normalizační institut
- [11] de Salles, C.; Martinez, M.L.B.; Model of Distribution Transformers Winding for Lightning. Power Tech, 2007 IEEE Lausanne. 1-5 July 2007. p. 2047 – 2052
- [12] Modeling Guidelines for Fast Front Transients. Report Prepared by the Fast Front Transients Task Force of the IEEE Modeling and analysis of System Transients Working Group. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.11, No. 1, January 1996. p. 493 - 506
- [13] Chowdhuri, P. Electromagnetic Transients in Power Systems. RSP – John Wiley, 1996
- [14] Application Guidelines Overvoltage Protection. Firemní materiály ABB. Dostupné na: http://www.hst.tudarmstadt.de/uploads/media/ABB_Applicationguide_PTHASA3021EN_01.05.09_.pdf

7. Řízení distribučních sítí

Provozovatel distribuční soustavy je povinen zřídit a provozovat technický dispečink v případě, že provozuje zařízení s napětím 110 kV [1].

Dispečink provozovatele distribuční soustavy odpovídá za dispečerské řízení výroby a distribuci elektřiny v distribuční soustavě.

Při dispečerském řízení předávaných výkonů v reálném čase je dispečink provozovatele přenosové soustavy nadřízen dispečinkům provozovatelů distribučních soustav.

7.1. Struktura, dispečerský řád

Dispečerské řízení distribuční soustavy je zakotveno v legislativě ve vyhlášce 79/2010 Sb. o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení [1], která mj. uvádí rozdělení činností dispečerského řízení na:

- přípravu provozu elektrizační soustavy,
- operativní řízení provozu elektrizační soustavy,
- hodnocení provozu elektrizační soustavy.

7.1.1 Příprava provozu distribuční soustavy

Příprava provozu distribuční soustavy obsahuje:

- a) plán provozu zařízení distribuční soustavy zpracováváný na základě plánu údržby a vypínání těchto zařízení, plánu provozu výroben elektřiny a přípravy provozu připojených distribučních soustav,
- b) předpokládaný průběh zatížení, bilanci toků energie a bilanci výkonů a využití služeb regulace napětí a jalové energie,
- c) kontrolu spolehlivosti provozu distribuční soustavy včetně případných omezení,
- d) plán vynuceného provozu výroben elektřiny a plán vynucených ostrovních provozů s dodávkou elektřiny ze zahraničí.

Přípravu provozu distribuční soustavy zpracovává provozovatel distribuční soustavy v členění:

- a) předpokládaný rozvoj s výhledem na 10 let,
- b) roční příprava,
- c) měsíční příprava,
- d) týdenní příprava,
- e) denní příprava.

Podrobnosti zpracování přípravy provozu distribuční soustavy včetně předávaných údajů a zpracování bilancí toků energie a bilancí výkonů jsou uvedeny v příloze č. 4 k vyhlášce [1]. Údaje nezbytné pro zpracování přípravy provozu distribuční soustavy předávají provozovateli distribuční soustavy:

- a) provozovatel přenosové soustavy,
- b) provozovatelé distribučních soustav,
- c) výrobci elektřiny, jejichž výrobní jsou připojeny k distribuční soustavě,
- d) zákazníci, jejichž odběrná elektrická zařízení o napětí vyšším než 1 kV jsou připojena k distribuční soustavě,
- e) poskytovatelé podpůrných služeb,
- f) držitelé licence na obchod s elektřinou.

7.1.2 Operativní řízení provozu distribuční soustavy

Operativní řízení provozu distribuční soustavy zahrnuje:

- a) řízení zapojení prvků distribuční soustavy pro zajištění distribuce elektřiny a řízení toků elektřiny v distribuční soustavě a v propojení s přenosovou soustavou a ostatními distribučními soustavami,
- b) regulaci napětí a toků jalových výkonů v zařízeních distribuční soustavy o napěťové úrovni 110 kV a nižší,
- c) řešení poruchových stavů v distribuční soustavě,
- d) přijímání opatření pro předcházení stavu nouze a pro řešení stavu nouze v distribuční soustavě,
- e) vydávání a evidenci povolení k zahájení pracovní činnosti na zařízení distribuční soustavy,
- f) řádné předávání dispečerské směnové služby pro zajištění kontinuity dispečerského řízení.

Operativní řízení provozu distribuční soustavy vyžadující součinnost s technickými dispečerky provozovatelů distribučních soustav, jejichž soustava je připojena k distribuční soustavě, zahrnuje:

- a) řízení toků elektřiny v řízené distribuční soustavě při respektování toků výkonů z přenosové soustavy a toků výkonů mezi připojenými distribučními soustavami,
- b) řešení mimořádných provozních stavů v elektrizační soustavě s cílem co nejrychlejšího obnovení stabilizovaného provozu elektrizační soustavy,
- c) vypínání a zapínání zařízení na hranicích mezi řízenými distribučními soustavami,
- d) regulaci napětí a toků jalových výkonů v zařízení připojených distribučních soustav,

- e) provoz částí elektrizační soustavy v ostrovním provozu,
- f) řízení změn zapojení v řízené distribuční soustavě, které mají vliv na provoz připojených distribučních soustav, a změn zapojení v připojené distribuční soustavě, které mají vliv na provoz řízené distribuční soustavy.

Technický dispečink provozovatele distribuční soustavy dává operativní pokyny:

- a) technickému dispečinku provozovatele přenosové soustavy při provádění prací a při řešení poruchových stavů v polích 110 kV a 10,5 kV transformátorů 400/110/10,5 kV a 220/110/10,5 kV, které vyžadují manipulaci se spínacími prvky 400 kV, 220 kV a 10,5 kV polí transformátorů 400/110/10,5 kV a 220/110/10,5 kV,
- b) technickému dispečinku provozovatele připojené regionální distribuční soustavy při
 - 1. provádění plánovaných prací a při řešení poruchových stavů v jím řízené distribuční soustavě, které vyžadují manipulaci se spínacími prvky nebo změnu toku výkonu na hranici soustav,
 - 2. přijímání opatření pro předcházení stavu nouze oznamovaném provozovatelem distribuční soustavy a pro řešení stavu nouze vyhlášeném provozovatelem distribuční soustavy, které vyžadují manipulaci se spínacími prvky nebo změnu toku výkonu na hranici soustav,
 - 3. opětovném připojení oblasti v ostrovním provozu k jím řízené distribuční soustavě,
- c) technickému dispečinku připojené lokální distribuční soustavy
 - 1. ke změně toků výkonu mezi jím řízenou distribuční soustavou a připojenou lokální distribuční soustavou,
 - 2. při provádění plánovaných prací a při řešení poruchových stavů v jím řízené distribuční soustavě, které vyžadují manipulaci se spínacími prvky nebo změnu toku výkonu na hranici soustav,
 - 3. při přijímání opatření pro předcházení stavu nouze oznamovaném provozovatelem distribuční soustavy a pro řešení stavu nouze vyhlášeném provozovatelem distribuční soustavy,
 - 4. při opětovném připojení oblasti v ostrovním provozu k jím řízené distribuční soustavě,
- d) výrobcům elektřiny, jejichž výroby jsou připojeny k distribuční soustavě,
 - 1. pro povolování připojování nebo odpojování výroben elektřiny do nebo z paralelního provozu, pokud není provozní instrukcí stanoveno jinak,

2. ke změně nebo přerušení dodávaného výkonu výroby elektřiny [§ 25 odst. 4 písm. d) energetického zákona],
- e) zákazníkům, jejichž odběrná elektrická zařízení jsou připojena k distribuční soustavě,
 1. k omezení nebo přerušení odběru elektřiny [§ 25 odst. 4 písm. c) energetického zákona],
 2. pro povolování opětovného připojení odběrného elektrického zařízení s napětím nad 1 kV k distribuční soustavě,
 3. při provádění plánovaných prací a při řešení poruchových stavů v jím řízené distribuční soustavě, které vyžadují manipulaci se spínacími prvky nebo změnu toku výkonu.

Postup pro uvolňování a uvádění do provozu zařízení distribuční soustavy, vyroben elektřiny s výkonem nad 100 kW připojených k distribuční soustavě a odběrných elektrických zařízení připojených k distribuční soustavě s napětím nad 1 kV a způsob vedení evidence povolení pro pracovní činnosti na zařízení distribuční soustavy jsou uvedeny v příloze č. 2 k [1]. Postup pro odstraňování poruchových stavů v provozu distribuční soustavy je uveden v příloze č. 3 k [1].

Pro provoz vydělených částí distribuční soustavy s napětím 110 kV, napájených dodávkami elektřiny ze zahraničí a dodávkami do zahraničí, vydává dispečink provozovatele distribuční soustavy s dispečinkem provozovatele přenosové soustavy společnou provozní instrukci.

Trvalé propojení distribučních soustav, při kterém by došlo k paralelnímu propojení přenosových soustav sousedních států na napěťové hladině 110 kV, se na základě platných mezinárodních dohod nepřipouští. Výjimkou je krátkodobé propojení pro vytvoření, změnu a zrušení provozu vydělené části distribuční soustavy. V tomto případě doba propojení, pokud to podmínky pro provedení manipulací umožní, nepřesáhne 3 minuty.

7.1.3 Hodnocení provozu distribuční soustavy

Technický dispečink provozovatele distribuční soustavy zpracovává denní, týdenní, měsíční a roční hodnocení provozu distribuční soustavy, které obsahuje:

- a) vyhodnocení skutečného průběhu zatížení,
- b) vyhodnocení bilancí toků energie a bilancí výkonů,
- c) přehled omezení spotřeby a výroby elektřiny,
- d) rozbor poruchových stavů v distribuční soustavě,
- e) rozbor poruchových stavů v přenosové soustavě a v připojených distribučních soustavách, které měly vliv na provoz jím řízené distribuční soustavy,
- f) vyhodnocení písemné stížnosti na vydaný dispečerský pokyn a
- g) vybrané provozně-technické statistické údaje distribuční soustavy.

Technický dispečink provozovatele distribuční soustavy provádí analýzy mimořádných provozních situací a situací vedoucích k předcházení stavu nouze nebo ke stavu nouze vyhlášeném provozovatelem distribuční soustavy v jím řízené distribuční soustavě a pro jejich zpracování si může vyžádat podklady od dotčených účastníků trhu s elektřinou, a to i nad rámec pravidelně předávaných údajů. Výsledky analýz předává na vyžádání Ministerstvu průmyslu a obchodu a Energetickému regulačnímu úřadu. Výsledky hodnocení provozu a analýz uchovává provozovatel distribuční soustavy nejméně po dobu 10 let.

Podrobnosti hodnocení provozu distribuční soustavy jsou uvedeny v provozních instrukcích technického dispečinku provozovatele distribuční soustavy.

7.2. Systémové a podpůrné služby DS

Problematika systémových a podpůrných služeb je podrobně popsána v [3] a v Příloze 7 PPDS

7.2.1 Systémové služby DS

Systémové služby DS jsou činnosti prováděné PDS v rozsahu jeho povinností a kompetencí pro zajištění spolehlivého provozu elektrizační soustavy ČR, pro zajištění služeb distribuce a takových parametrů DS, při nichž jsou dodrženy standardy kvality dodávek elektřiny a souvisejících služeb. K systémovým službám zajišťovaným PDS patří zejména:

Obnova provozu distribuční soustavy - Proces postupné obnovy napětí v jednotlivých částech DS po přerušení dodávky z celé PS nebo jednotlivých předávacích míst PS/DS do DS a ztrátě synchronizmu části nebo celé DS s PS na základě předem určených priorit odběratelů a při ostrovním provozu části DS s vhodnými zdroji.

Zajištění kvality napěťové a proudové sinusovky - Součástí této služby zajišťované PDS je monitorování kvality dodávané/odebírané elektřiny v DS, zjišťování zdrojů snižování kvality, návrhy, příp. i realizace opatření na úrovni DS a sledování efektivnosti jejich působení.

Regulace napětí a jalového výkonu v DS - Úlohou regulace napětí a jalového výkonu v DS je udržování zadaných hodnot napětí a toků jalového výkonu předepsaných PDS ve vybraných uzlech DS.

7.2.2 Podpůrné služby DS

U podpůrných služeb rozlišujeme zejména následující případy:

1) *Podpůrné služby nabízené PDS pro PPS*, kam patří:

- a) dispečerská záloha,
- b) operativní změny spotřeby,
- c) regulace rychlosti změny zatížení,

- d) regulace napětí a jalového výkonu.
- 2) *Podpůrné služby nabízené uživatelem DS provozovateli DS pro systémové služby zajišťované PDS.* Uživatel se stává poskytovatelem podpůrné služby a patří sem zejména:
- a) dispečerská záloha,
 - b) schopnost startu ze tmy,
 - c) schopnost ostrovního provozu,
 - d) operativní změna zatížení,
 - e) využití záložního výkonu v akumulaci tepla,
 - f) regulace napětí a jalového výkonu,
 - g) výpomoc ze sousední DS,
 - h) regulace rychlosti změny zatížení na předávacích místech,
 - i) vynucený provozní stav zdroje,
 - j) výpomoc ze sousední zahraniční distribuční soustavy.

Podrobnosti k jednotlivým druhům služeb poskytovaných PDS obsahuje Příloha 7 PPDS.

- 3) *Podpůrné služby nabízené uživatelem DS provozovateli PS prostřednictvím DS.* Tento druh podpůrné služby nabízí poskytovatel podpůrné služby provozovateli přenosové soustavy, předávacím místem nabízené podpůrné služby je však místo připojení k DS. Předpokladem je, že poskytovatel služby má uzavřenu smlouvu s PDS o potřebné rezervaci přenosové kapacity sítě a dále, že PDS je o poskytování služby, jejím rozsahu a technických parametrech podrobně informován v termínech přípravy provozu, nejpozději v denní přípravě provozu a souhlasil s ní. Jde o tyto služby:
- a) primární regulace činného výkonu,
 - b) sekundární regulace činného výkonu,
 - c) terciární regulace činného výkonu,
 - d) dispečerská záloha,
 - e) rychle startující záloha,
 - f) schopnost ostrovního provozu,
 - g) schopnost startu ze tmy,
 - h) využití záložního výkonu v akumulaci tepla.

7.2.3 Stanovení parametrů služby a její certifikace

U služeb poskytovaných PDS přímo PS platí obecně pravidla pro parametry a certifikaci uvedená v PPS.

Při doplňování služeb o nové druhy, které PPPS neobsahují, je nabízitel PDS po předchozím rámcovém souhlasu PPS s navrhovanou službou povinen (pokud se s PPS nedohodne jinak) vypracovat metodiku pro kvantifikaci a certifikaci a předložit je PPS k odsouhlasení a k zařazení mezi služby, které je možno nabízet a poskytovat.

U služeb, které poskytují uživatelé DS provozovateli DS k využití v rámci nabídky služeb PDS pro PPS, jsou potřebné podklady a pravidla v Příloze 7 PPDS.

7.2.4 Způsoby měření parametrů služby

U služeb, které definují PPPS, jsou způsoby autorizace pro provádění certifikačních měření podpůrných služeb popsány v PPPS. U nově navrhovaných služeb, které nabízí PDS pro PPS, je PDS po předchozím rámcovém souhlasu PPS s navrhovanou službou povinen (pokud se s PPS nedohodne jinak) vypracovat metodiku měření parametrů nabízené služby a předložit ji PPS k odsouhlasení.

7.3. Automatizovaný systém dispečerského řízení PDS

Podle [3] PDS získává automatizovaným systémem dispečerského řízení informace z DS a od uživatelů připojených k DS, kterými jsou zde:

- a) PS (z předávacích míst PS/DS),
- b) výrobní elektřiny připojené k DS na napěťové úrovni 110 kV a vn s výkonem nad 1 MW (u kterých nestačí měření pro zúčtování elektřiny – fakturační měření),
- c) odběratelé z napěťové úrovně 110 kV nebo vn s rezervovaným příkonem nad 400 kW (u kterých nestačí měření pro zúčtování elektřiny),
- d) sousední nebo lokální DS.

Kritériem pro určení těchto uživatelů a zařízení v jejich stanicích, od nichž se informace do dispečinku PDS mají přenášet, je charakter a stupeň ovlivnění provozu DS provozem zařízení uživatele. Tito uživatelé a příslušná zařízení jsou určeni při stanovení podmínek připojení k DS.

Soubory informací jsou definovány pro různé typy objektů DS a uživatelů v platném znění normy [4] a na základě této normy může PDS zpracovat své standardy informací jako podmnožinu souborů definovaných v [4]. Z nich pak určí PDS při stanovení podmínek připojení nezbytné informace pro ASDŘ PDS. Jde přitom o tyto druhy informací:

- a) signály o topologii určených vývodů uživatele, tzn. stavy vypínačů, odpínačů, odpojovačů, uzemňovačů, a to dvoubitovou signalizací,
- b) měření elektrických veličin – činného a jalového výkonu, napětí a proudu,

c) poruchová hlášení od ochran a automatik.

Odběratelé s vlastní výrobou elektřiny musí na požadavek PDS poskytovat i informace o velikosti této výroby. Výrobci elektřiny připojení k DS musí zajistit možnost synchronizovaného spínání ve svém objektu, ev. na své straně.

7.4. Hromadné dálkové ovládání

HDO využívá PDS k řízení určitých segmentů spotřeby, zejména akumulční a přímotopné, tak, aby zajistil optimální využití sítí a uspokojení co největšího počtu odběratelů za normálního provozu, realizoval potřebné omezení spotřeby při stavech nouze a při zásazích bránících jejich vzniku nebo odstraňování jejich následků a zajišťoval nezbytné systémové a podpůrné služby DS [3].

HDO může být užíváno i při stavech nouze a pro dispečerské řízení výroby OZE, tj. vyráběného činného a jalového výkonu.

Podmínkou připojení odběrných míst těchto zákazníků je instalace přijímače HDO podle požadavku PDS a souhlas zákazníka s řízením specifikovaných spotřebičů ze strany PDS, vyjádřený ve smlouvě o připojení k DS.

Technické požadavky na zařízení HDO obsahuje [5]. Přidělení povelů HDO jednotlivým odběrným místům je v kompetenci PDS a jednotliví zákazníci a jejich obchodníci jsou povinni je respektovat. Informace o režimu spínání HDO poskytuje PDS s minimálně týdenním předstihem dálkově (internet) nebo na vyžádání. Časy vysílání povelů HDO platí pro základní stav distribuční soustavy za normálních provozních podmínek. V případě nutnosti provedení provozních změn v distribuční soustavě, vyvolaných nepředvídanými okolnostmi, může dojít k lokálním a časově omezeným úpravám časů vysílání s dodržением pravidel pro vysílání a v souladu s cenovým rozhodnutím ERU.

7.4.1 Využití HDO ze strany PDS

PDS využívá HDO [3]:

- 1) při normálním provozu,
 - a) k rozložení říditelné spotřeby tak, aby zajistil uspokojení co největšího počtu zákazníků, optimální využití sítí a nízké ztráty v sítích,
 - b) k případnému spínání v sítích pro provozní účely,
 - c) k optimalizaci nákupu elektřiny pro krytí ztrát,
- 2) při stavech nouze a jiných mimořádných stavech,
 - a) pro předcházení těmto stavům,
 - b) pro jejich likvidaci,
 - c) pro odstraňování jejich následků,
- 3) při zajišťování systémových a podpůrných služeb v DS, potřebných pro řádný provoz DS a ES jako celku.

7.4.2 Přidělování povelů HDO

PDS přiděluje jednotlivým odběrným místům povely HDO tak, aby zajistil plošně i časově vhodné rozložení říditelné spotřeby v DS. V případě potřeby je PDS oprávněn přidělený povel HDO změnit. Zákazníci i jejich obchodníci s elektřinou jsou povinni přidělené povely a jejich režim provozu respektovat [3].

7.5. Omezování spotřeby v mimořádných situacích

Provozní předpisy pro DS se dle [3] také zabývají opatřeními pro řízení spotřeby při stavech nouze, při činnostech bezprostředně bránících jejich vzniku nebo při odstraňování jejich následků, která zajišťuje PDS nebo uživatel s vlastní soustavou připojenou k této DS podle platné legislativy (EZ, apod.). Nastane-li stav nouze na celém území ČR, vyhláší ho PPS, který též řídí jeho likvidaci. PDS přitom s PPS spolupracuje a řídí se jeho pokyny. Při vzniku stavu nouze na omezené části území státu ho vyhláší a řídí jeho likvidaci PDS prostřednictvím svého technického dispečinku.

Stav nouze na vymezeném území PDS mohou vyvolat:

- živelní události,
- opatření státních orgánů,
- havárie nebo kumulace poruch na zařízeních pro výrobu, přenos a distribuci elektřiny,
- smogové situace podle zvláštních předpisů,
- teroristické činy,
- nevyrovnanosti bilance ES nebo její části,
- přenos poruchy ze zahraniční elektrizační soustavy,
- ohrožení fyzické bezpečnosti nebo ochrana osob.

Stav nouze na svém vymezeném území vyhlásí PDS bez průtahů, jakmile si ověřil u PPS, že se nejedná o stav nouze postihující celé území státu. Vyhlášení regionálního nebo lokálního stavu nouze na svém vymezeném území oznamuje PDS v souladu s EZ:

- PPS,
- Ministerstvu průmyslu a obchodu,
- Energetickému regulačnímu úřadu,
- Ministerstvu vnitra,
- příslušnému Krajskému úřadu, případně Magistrátu hlavního města Prahy.

Při stavech nouze a při předcházení stavu nouze je PDS oprávněn využívat v nezbytném rozsahu výrobních a odběrných zařízení svých uživatelů. V těchto

situacích jsou všichni účastníci trhu s elektřinou povinni podřídit se omezení spotřeby nebo změně dodávky elektřiny. To platí pro:

- 1) snížení odběru
 - a) omezením regulovatelné spotřeby pomocí hromadného dálkového ovládání, realizovaným PDS,
 - b) snížením napětí, realizovaným PDS,
 - c) snížením výkonu odebíraného odběrateli v souladu s vyhlášenými stupni regulačního plánu,
- 2) přerušení dodávky elektřiny podle vypínacího plánu, nezávislé na frekvenci sítě, realizované PDS
- 3) automatické frekvenční vypínání podle frekvenčního plánu v závislosti na poklesu frekvence sítě
- 4) změnu dodávky elektřiny do DS.

Výraz "řízení spotřeby" zahrnuje všechny tyto metody sloužící k dosažení nové rovnováhy mezi výrobou a spotřebou. PDS má právo instalovat u uživatelů DS potřebné technické zařízení, sloužící k vypnutí, příp. omezení odběru při vyhlášení stavu nouze (např. přijímač HDO, frekvenční relé ap.). Instalace tohoto zařízení bude uvedena ve smlouvě o připojení uživatele k DS.

7.5.1 Snížení odběru a zajištění regulačního plánu v rámci DS

PDS zpracovává ve smyslu [6] a v součinnosti s PPS regulační plán, jehož jednotlivé stupně určují hodnoty a doby platnosti omezení odebíraného výkonu vybraných odběratelů, přičemž rozsahy výkonové náplně pro regulační stupně č. 1 až 7 jsou stanoveny v [6]. Stanovení příslušné náplně jednotlivých stupňů regulačního plánu je pro tyto odběratele pak součástí smlouvy o distribuci elektřiny nebo smlouvy o sdružených službách zákazníkům. Za výkon sjednaný ve smlouvě se považuje:

- a) sjednaná hodnota výkonu pro danou hodinu v případě, že zákazník má sjednaný týdenní odběrový diagram,
- b) sjednaná hodnota rezervované kapacity v daném měsíci (součet roční a měsíční rezervované kapacity) v případě, že zákazník nemá sjednaný týdenní odběrový diagram.

V případě zařazení zákazníka současně do více regulačních stupňů je celková hodnota snížení výkonu rozdělena rovnoměrně do jednotlivých regulačních stupňů platných pro dané OM zákazníka.

Využití příslušného stupně regulačního plánu vyhláší a odvolává pro celé území státu dispečink provozovatele PS. Týká-li se stav nouze určité části území státu, vyhláší a odvolávají je příslušné dispečinky provozovatelů DS.

7.5.2 Přerušení dodávky podle vypínacího plánu

PDS zpracovává ve smyslu [6] v součinnosti s PPS vypínací plán, tj. postup pro rychlé a krátkodobé přerušení dodávky elektřiny odběratelům, ke kterému se přistupuje výjimečně při likvidaci závažných systémových či lokálních poruch v ES. Přerušení dodávky se provádí vypnutím vybraných vývodů v zařízeních DS zpravidla na dobu trvání 2 hodin od vyhlášení, přičemž zařízení odběratelů podle vypínacího plánu a jeho opětné zapnutí řídí v celé ES provozovatel PS, na části území státu příslušní provozovatelé DS. Provádí ho dispečink provozovatele PS nebo dispečink provozovatele DS v souladu se zásadami dispečerského řízení. V jednotlivých vypínacích stupních je stanovena procentní velikost vypínaného výkonu vztahená k hodnotě ročního maxima zatížení distribuční soustavy za období posledních 12 měsíců.

Vypínací stupně 21 až 25

Stupeň 21 představuje 2,5 % ročního maxima zatížení PDS, každý další stupeň představuje hodnotu předchozího stupně zvýšenou o 2,5 % ročního maxima zatížení PDS.

Vypínací stupně 26 až 30

Stupeň 26 představuje 17,5 % ročního maxima zatížení PDS, každý další stupeň představuje hodnotu předchozího stupně zvýšenou o 5 % ročního zatížení PDS.

Vypínací stupně 21 až 25 a 26 až 30 nelze vyhlášovat současně.

7.5.3 Stanovení bezpečnostního minima

Ve smyslu vyhlášky [6] jsou všichni zákazníci povinni při vyhlášení regulačního stupně č. 7 snížit hodnotu odebíraného výkonu z elektrizační soustavy až na hodnotu bezpečnostního minima. U zákazníků odebírajících elektřinu ze zařízení distribučních soustav s napětím vyšším než 1 kV s hodnotou rezervovaného příkonu do 100 kW a zákazníků odebírajících elektřinu ze zařízení distribučních soustav s napětím do 1 kV s hodnotou jističe před elektroměrem nižší než 200 A (zařazení do regulačního stupně č. 2) je hodnota bezpečnostního minima stanovena takto:

- a) zákazníci odebírající elektřinu ze zařízení distribuční soustavy s napětím vyšším než 1 kV – 20% z hodnoty rezervované kapacity v příslušném kalendářním měsíci
- b) zákazníci odebírající elektřinu ze zařízení distribuční soustavy s napětím do 1 kV podle charakteru odběru:
 - domácnost typu „A“ a „B“ – hodnota odpovídající 20% hodnoty jističe před elektroměrem
 - domácnost typu „C“ - hodnota odpovídající 20% hodnoty jističe před elektroměrem zvýšená o hodnotu odpovídající 30% elektrického vytápění, maximálně však 40% hodnoty jističe před elektroměrem

- domácnost typu „D“ – jako domácnosti typu „A“, „B nebo „C“ se zákazem používání spotřebičů, které mohou ovlivnit chod sítě,
- MOP – hodnota odpovídající 20% hodnoty jističe před elektroměrem.

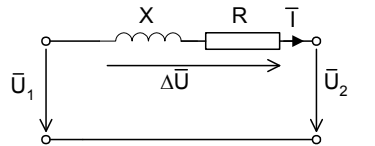
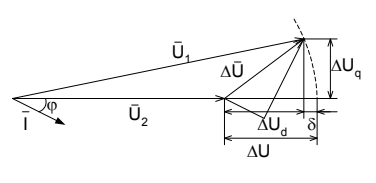
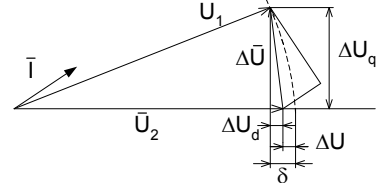
7.6. Regulace napětí

Pro stanovení skutečné odchylky napětí (tj. rozdílu mezi skutečným napětím v daném místě sítě a napětím jmenovitým) je třeba určit úbytek napětí - tj. rozdíl napětí mezi dvěma různými místy v síti – např. mezi začátkem a koncem vedení nebo mezi primární a sekundární stranou transformátoru (při napětích přepočtených na stejnou stranu).

Úbytek napětí ΔU se určí jako rozdíl velikostí napětí:

$$\Delta U = |\bar{U}_1| - |\bar{U}_2| \quad (7.1)$$

Při návrhu distribuční sítě je třeba stanovit úbytky napětí, které vzniknou na venkovních nebo kabelových vedeních a na transformátorech při předpokládaném výpočtovém zatížení. Při výpočtu úbytku napětí na vedeních vn a nn a na transformátorech lze zanedbat příčné admittance. Přehledně je postup výpočtu uveden v Tab. 7.1.

náhradní schéma		
fázorový diagram		
ΔU_d	$R.I.\cos\varphi + X.I.\sin\varphi$	$R.I.\cos\varphi - X.I.\sin\varphi$
ΔU_q	$X.I.\cos\varphi - R.I.\sin\varphi$	$X.I.\cos\varphi + R.I.\sin\varphi$
$\delta = \frac{1}{2}\Delta U_q^2$	$\frac{1}{2}(X.I.\cos\varphi - R.I.\sin\varphi)^2$	$\frac{1}{2}(X.I.\cos\varphi + R.I.\sin\varphi)^2$
ΔU	$\Delta U_d + \delta = \Delta U_d + \frac{1}{2}\Delta U_q^2$	

Tab. 7.1: Postup výpočtu úbytku napětí

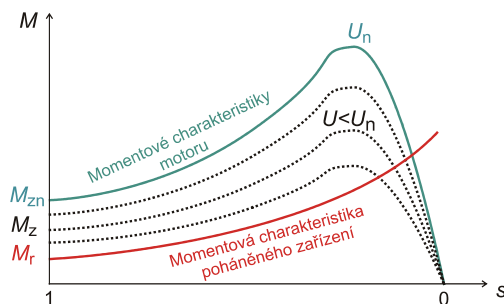
Pro podélné reaktance, kde je $X \cong R$, lze hodnotu δ zanedbat – platí pro vedení. Naopak pro transformátory, kde $X \gg R$ je potřeba tuto hodnotu ve výpočtu uvažovat jak uvádí kapitola 5 a kde je dále uvedeno také odvození výše uvedených vztahů pro výpočet ΔU .

7.6.1 Úbytek napětí v rozvodech k motorickým spotřebičům

Důležitá je otázka přípustného poklesu napětí na svorkách motoru. Při rozběhu motorů se zvýší proud a tím i úbytek napětí v přívodu k motoru. Sníží se napětí na svorkách motoru, případně i na přípojnících v rozvodně nebo na napájecím transformátoru. Napětí na svorkách motoru může při rozběhu poklesnout pod přípustnou mez. Prodlouží se tím doba rozběhu nebo se motor vůbec nerozběhne.

Podle [16] pokles napětí u motorických spotřebičů určených pro trvalý, přerušovaný nebo krátkodobý chod způsobený jejich jmenovitým proudem nemá způsobit menší svorkové napětí motoru než 95% jeho jmenovitého napětí. Pokud je úbytek napětí větší nesmí být na závalu bezpečného provozu zařízení.

U pohonů s těžkým rozběhem je nutno kontrolovat napětí na svorkách spouštěného motoru v okamžiku spouštění. Pro pokles napětí způsobený spouštěcím proudem neplatí hodnoty minimálního napětí a musí se vycházet pouze z bezpečného rozběhu zařízení. Aby došlo k rozběhu motoru, musí být záběrný moment motoru při poklesu napětí M_z větší než záběrný moment potřebný k rozběhu poháněného zařízení M_r (Obr. 7.1).



Obr. 7.1: Momentové charakteristiky

Musí tedy platit, že

$$\frac{M_{zn}}{M_n} \frac{U^2}{U_n^2} \geq \frac{M_r}{M_n}, \quad (7.2)$$

kde M_{zn} je záběrný moment motoru při jeho nominálním napětí U_n ,

M_z je záběrný moment motoru při napětí $U < U_n$,

M_r je záběrný moment potřebný pro rozběh poháněného zařízení.

Zapsáno v poměrných hodnotách

$$mu^2 \geq k, \quad (7.3)$$

z čehož lze pro hodnotu napětí na svorkách motoru odvodit podmínku

$$u \geq \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7.4)$$

a pro úbytek napětí musí platit

$$\Delta u = 1 - u \leq 1 - \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7.5)$$

Bude-li pokles napětí na začátku rozběhu způsobený rozběhovým proudem motoru I_z s účinníkem $\cos \varphi_z$ splňovat uvedenou podmínku, bude splněna výchozí podmínka $M_z \geq M_r$, motor se rozběhne.

7.6.2 Eliminace odchylek napětí

Průřez elektrického vedení i výkon napájecích transformátorů se volí tak, aby nedocházelo k nepřipustnému poklesu napětí a aby se omezilo kolísání napětí v síti. Pro zajištění požadované hodnoty napětí ve všech místech distribuční sítě lze dále využít:

- automatickou regulaci napětí u transformátorů vn/vn,
- přestavení odboček distribučních transformátorů vn/nn,
- kompenzace parametrů vedení,
- kompenzace jalového výkonu,
- zařazení dalšího regulačního transformátoru nebo autotransformátru,
- rekonstrukcí elektrického vedení,
- zvýšením počtu napájecích stanic.

7.6.2.1 Regulace transformátorů 110 kV/vn

Sítě 110 kV tvoří spojovací článek mezi přenosovou soustavou (PS) a mezi distribučními soustavami vysokého napětí. Tyto sítě v současné době nejsou provozovány paralelně s vedeními PS a tvoří uzlové oblasti (UO) 110 kV, které jsou zpravidla v kruzích, případně paprskovitě napojeny přes rozdělovací transformátory PS/110 kV na PS. V UO 110 se provádí autonomní regulace v jednotlivých pilotních uzlech 110 kV napojených na příslušnou transformovnu PS nebo elektrárnu. Aktuální identifikaci jednotlivých UO 110, koordinaci činností všech akčních členů v regulačních procesech zajišťuje nadřazená stanice automatické regulace napětí ARN, která je umístěna na dispečincích PDS.

Posledním článkem regulace napětí v distribuční síti je transformátor 110kV/vn, na kterém lze provádět změnu napětí pod zatížením. Většina těchto transformátorů je provedena s odbočkovým přepínačem na straně vyššího napětí v rozsahu $110\text{kV} \pm 8 \times 2\%/\text{vn}$. a automatickým regulátorem napětí, který reguluje napětí na sekundární straně podle charakteristiky

$$u_2 = u_z + \frac{I_2}{I_n} \cdot \Delta, \quad (7.6)$$

kde u_2 napětí na výstupu
 u_z nastavená hodnota napětí
 I_n jmenovité zatížení transformátoru
 I_2 skutečné zatížení transformátoru
 Δ proudová kompaundace

Proudová kompaundace umožňuje zvýšení napětí na výstupu transformátoru při vyšším zatížení a tím eliminaci úbytku napětí na samotném transformátoru i v síti vn a dosažení potřebného napětí i na koncích delších vedení.

7.6.2.2 Nastavení převodu distribučních transformátorů vn/nn

Distribuční transformátory jsou vybaveny odbočkami na primární straně, které lze přepínat ve stavu bez napětí:

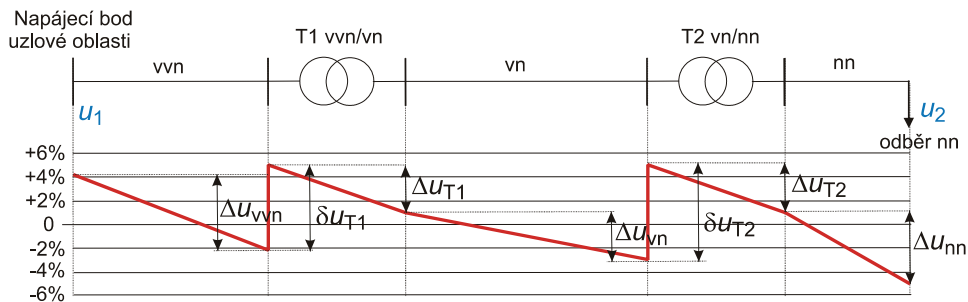
- 3 stupně - +5%, 0%, -5% (starší transformátory)
- 5 stupňů - +5%, +2,5%, 0%, -2,5%, -5%

Napětí na výstupu transformátoru je

$$u_2 = u_1 + \delta u_T - \Delta u_T, \quad (7.7)$$

kde u_2 napětí na sekundáru
 u_1 napětí na primáru
 δu_T odchylka nastavením odbočky
 Δu_T úbytek napětí na transformátoru

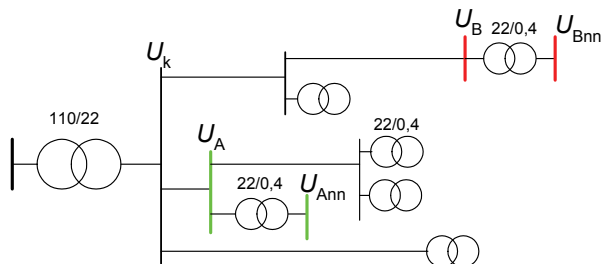
Na základě uvedených možností regulace napětí lze profil napětí v distribuční síti jednoduše popsat pomocí Obr. 7.2.



Obr. 7.2: Průběh odchylek a úbytků napětí v sítích 110 kV, vn a nn

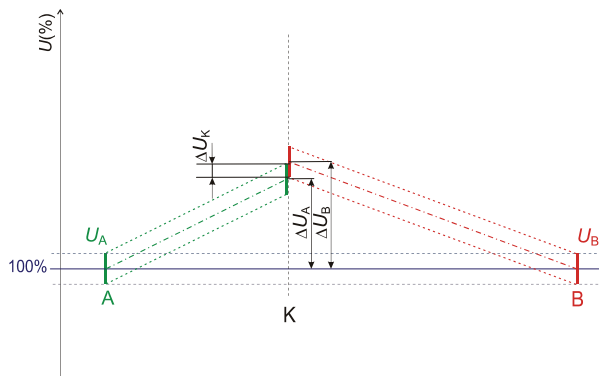
7.6.2.3 Charakteristický (kontrolní) bod

V distribuční soustavě vn zpravidla jeden transformátor 110 kV/vn napájí samostatně dílčí oblast. Pro účely regulace se tato oblast nahradí tzv. charakteristickým bodem, jehož napětí nejlépe reprezentuje napětí v oblasti [8]. V kontrolním bodě je nutno udržovat takové napětí, aby byly splněny požadavky všech spotřebitelů napájených od tohoto kontrolního bodu. Stanovení mezních napětí v kontrolních bodech je ukázáno na příkladu kontrolního bodu (napětí U_k) zásobujícího několik spotřebitelských napájecích bodů (Obr. 7.3).



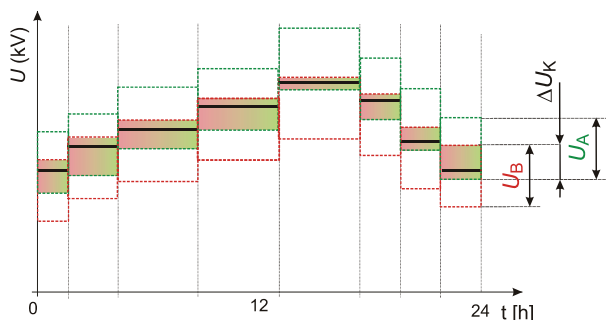
Obr. 7.3 Charakteristický bod distribuční sítě

Vybereme dva napájecí body spotřebitelů, jeden s největším úbytkem napětí od kontrolního bodu (elektricky nejvzdálenější napájecí bod B) a druhý s nejmenším úbytkem napětí od napájecího bodu (elektricky nejbližší napájecí bod A). Bude-li napětí kontrolního bodu splňovat požadavky obou těchto napájecích bodů, pak zřejmě vyhoví i požadavkům ostatních napájecích bodů. Požadavky dvou napájecích bodů A a B na velikost napětí kontrolního bodu jsou schematicky znázorněny na Obr. 7.4 – vodorovná osa vyznačuje úroveň jmenovitého napětí ve všech třech bodech a silně vyznačené svislé úsečky jsou U_A a U_B jsou dovolené odchylky napětí od jmenovité hodnoty v bodech A a B. Přičtením úbytků napětí ΔU_A a ΔU_B k odchylkám napětí dostáváme požadavky napájecích bodů A i B na napětí bodu K. Z Obr. 7.4 je zřejmé: aby napětí tohoto bodu vyhovělo požadavkům obou napájecích bodů s ohledem na [3], musí být v rozmezí napětí označeného jako ΔU_K .



Obr. 7.4: Požadavky na napětí charakteristického bodu

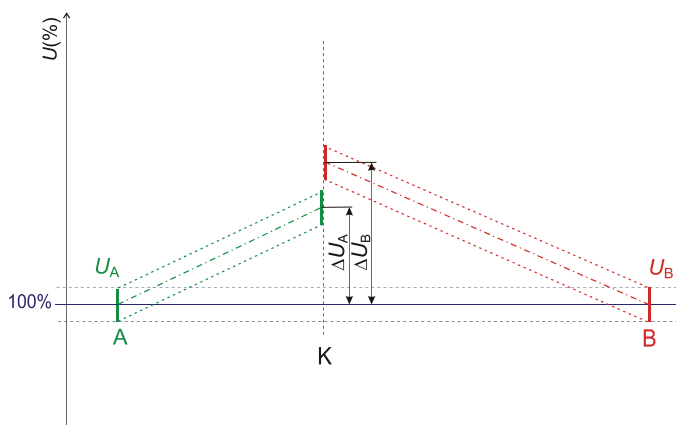
Obr. 7.4 znázorňuje napětové poměry pro jeden provozní stav (pro jedno zatížení napájecích bodů A a B). Se změnou přenášených výkonů se mění velikost úbytků napětí ΔU_A a ΔU_B . Vypočteme-li požadovaná napětí v kontrolním bodě při různých zatíženích a vyneseme je do časového diagramu odpovídajícího dennímu diagramu zatížení, dostáváme denní diagram mezních napětí kontrolního bodu (Obr. 7.5). Požadavky napájecích bodů A a B v mezích dovolených odchylek jsou v obrázku vyznačeny čárkovaně, požadavky bodu A zeleně, bodu B červeně. Vyhovující napětí bodu K (U_K) leží v probarvené oblasti.



Obr. 7.5: Průběh změny napětí v charakteristickém bodě

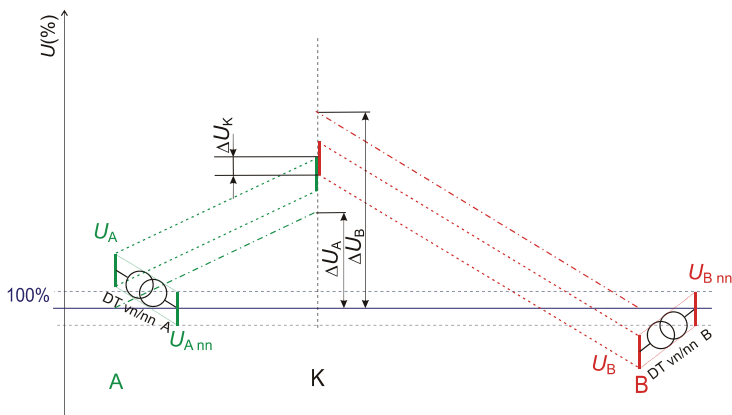
Někdy se může stát, že nelze vyhovět požadavkům všech napáječů (napájecích bodů) na velikost napětí kontrolního bodu tak, jak je ukázáno na Obr. 7.6. V podobných případech je nutno provést některá z těchto opatření:

- snížit úbytek napětí v napájecích vedeních elektricky nejvzdálenějších spotřebitelů – zesílením vedení, kompenzací jalových výkonů
- různě nastavit odbočky transformátorů v napájecích bodech
- použít regulační transformátory buď v elektricky nejvzdálenějších nebo nejbližších bodech



Obr. 7.6: Požadavky na napětí charakteristického bodu

Případ b) využití odboček transformátorů v napájecích bodech je znázorněn na Obr. 7.7 V tomto případě je požadavkům dovolených odchylek napětí vyhověno přepojením distribučního transformátoru v bodě A (DT vn/nn A) na odbočku +5% - tzn. že při jmenovitém napětí na sekundární straně, je napětí primární strany o 5% vyšší a v bodě B (DT vn/nn B) na odbočku -5% - tzn. že při jmenovitém napětí na sekundární straně, je napětí primární strany o 5% nižší.



Obr. 7.7: Využití odboček transformátorů vn/nn

7.6.2.4 Kompenzace parametrů vedení

Sériová kompenzace parametrů vedení pro snížení jeho podélné reaktance se v našich distribučních sítích příliš neuplatňuje. Je to dáno především poměrně vysokou hustotou zatížení našich distribučních sítí, ve kterých se nevyskytují dlouhé úseky vedení s velkým zatížením. Snížení parametrů vedení prostřednictvím sériové kompenzace lze ilustrovat na jednoduchém příkladu, ve kterém je třeba určit velikost sériového kondenzátoru na konci vedení se jmenovitým napětím 35 kV, jehož impedance je $Z_k = 0,319 + j0,36 \, \Omega/\text{km}$ a délka $l = 50 \, \text{km}$ tak, aby se při přenášeném výkonu $S = 10 \, \text{MVA}$ s účinnkem $\cos \varphi = 0,8$ zmenšil úbytek napětí na třetinu proti hodnotě bez kondenzátoru. Velikost napětí na začátku vedení je $U_1 = 1,05 U_n$.

$$\Delta u = \frac{1}{U_n} (R_k \cdot l \cdot I_{\xi} + X_k \cdot l \cdot I_j)$$

$$\Delta u = \frac{1}{U_n^2} (R_k \cdot l \cdot P + X_k \cdot l \cdot Q) = \frac{1}{35^2} (0,319 \cdot 50 \cdot 8 + 0,36 \cdot 50 \cdot 6) = 0,1923$$

Po instalaci sériového kondenzátoru musí úbytek napětí klesnout na třetinu:

$$\Delta u_k = \frac{\Delta u}{3} = \frac{1}{U_n^2} (R_k \cdot l \cdot P + (X_k - X_C) \cdot l \cdot Q)$$

$$X_C = \frac{3R_k \cdot l \cdot P - \Delta u \cdot U_n^2}{3 \cdot Q} - X_k \cdot l$$

$$X_C = \frac{3 \cdot 0,319 \cdot 50 \cdot 8 - 0,1923 \cdot 35^2}{3,6} + 0,36 \cdot 50 = 26,18 \, \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = 121,59 \, \mu\text{F}$$

a) poměry na vedení před instalací sériového kondenzátoru:

- napětí na konci

$$U_2 = U_1 - \Delta u \cdot U_n = 1,05 \cdot 35 - 0,1923 \cdot 35 = 30,02 \, \text{kV}$$

- proud vedením

$$I_2 = I_1 = \frac{S}{\sqrt{3}U_2} = \frac{\sqrt{8^2 + 6^2}}{\sqrt{3} \cdot 30,02} = 0,1923 \, \text{kA}$$

- ztráty ve vedení

$$\Delta S_z = 3(R_k \cdot l - jX_k \cdot l)I_2^2$$

$$\Delta S_z = 3(0,319 \cdot 50 - j0,36 \cdot 50)0,1923^2 = 1,77 - j1,997 \, \text{MVA}$$

- výkon na začátku

$$\bar{S}_1 = \bar{S} + \Delta \bar{S}_z = 8 - j6 + 1,77 - j1,997 = 9,77 - j7,997 \, \text{MVA}$$

b) poměry na vedení po instalaci sériového kondenzátoru:

- napětí na konci

$$U_{2k} = U_1 - \Delta u_k \cdot U_n = 1,05 \cdot 35 - \frac{0,1923}{3} \cdot 35 = 34,51 \, \text{kV}$$

- proud vedením

$$I_{2k} = I_{1k} = \frac{S}{\sqrt{3}U_{2k}} = \frac{\sqrt{8^2 + 6^2}}{\sqrt{3} \cdot 34,51} = 0,1673 \, \text{kA}$$

- ztráty ve vedení

$$\Delta \bar{S}_{zk} = 3(R_k \cdot I - j(X_k \cdot I - X_c))I_{2k}^2$$

$$\Delta \bar{S}_{zk} = 3(0,319 \cdot 50 - j(0,36 \cdot 50 - 26,18))0,1673^2$$

$$\Delta \bar{S}_{zk} = 1,34 + j0,687 \text{ MVA}$$

- výkon na začátku

$$\bar{S}_{lk} = \bar{S} + \Delta \bar{S}_{zk} = 8 - j6 + 1,34 + j0,687 = 9,34 - j5,313 \text{ MVA}$$

- napětí na kondenzátoru

$$U_c = X_c \cdot I_{2k} = 26,18 \cdot 0,1673 = 4,38 \text{ kV}$$

- trojfázový výkon kondenzátoru

$$Q_c = 3X_c I_{2k}^2 = \frac{3U_c^2}{X_c} = 3 \cdot 26,18 \cdot 0,1673^2 = 2,198 \text{ MVar}$$

Instalací sériového kondenzátoru zvýšilo napětí na konci vedení o 4,51 kV a současně poklesly ztráty ve vedení. Velikost napětí na kondenzátoru je při zatížení vedení přenášeným výkonem $U_c = 4,38 \text{ kV}$. Jaké napětí se ale objeví na svorkách kondenzátoru v případě třífázového zkratu na konci vedení? Budeme uvažovat, že hodnota rázového zkratového proudu je $I_k'' = 5,6 \text{ kA}$.

$$U_{ck} = X_c \cdot I_k'' = 26,18 \cdot 5600 = 84 \text{ kV}$$

Při zkratu vznikne na kondenzátoru přepětí, proti jeho účinkům musí být kondenzátor chráněn rychle působící přepětovou ochranou.

7.6.2.5 Kompenzace jalového výkonu

Kompenzace jalového výkonu je běžnou součástí většiny průmyslových odběrů a díky ní je možno eliminovat část velikosti zatížení a tím i úbytku napětí ve vedení. Pozitivní vliv paralelní kompenzace budeme opět demonstrovat na jednoduchém příkladu, ve kterém půjde o průmyslový závod napájený transformátorem o výkonu $S_n = 1000 \text{ kVA}$. Tento objekt odebírá zdánlivý výkon $S_1 = 600 \text{ kVA}$ při $\cos \varphi_1 = 0,8$ ind. a odběratel požaduje připojit ještě další odběr s činným výkonem $P_2 = 400 \text{ kW}$ při $\cos \varphi_2 = 0,85$ ind. Jaký výkon potřebuje zařadit do kompenzačních kondenzátorů, jestliže po zařazení nové zátěže musí mít transformátor 10% rezervu?

Velikost požadovaného zdánlivého výkonu:

$$S = (1 - 0,1)S_1 = 0,9 \cdot 1000 = 900 \text{ kVA}$$

Úloha má řešení pouze v případě že $P_2 + P_1 \leq 900 \text{ kW}$

Požadovaný činný výkon

$$P = S_1 \cdot \cos \varphi_1 + P_2 = 600 \cdot 0,8 + 400 = 880 \text{ kW} \leq 900 \text{ kW}$$

Odpovídající jalový výkon

$$Q = S_1 \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1} + P_2 \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}}{\cos \varphi_2}$$

$$Q = 600 \cdot \sqrt{1 - 0,8^2} + 400 \frac{\sqrt{1 - 0,85^2}}{0,85} = 360 + 247,9 = 607,9 \text{ kVAr}$$

Požadovaný jalový výkon je ale menší:

$$Q_k = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{900^2 + 880^2} = 188,7 \text{ kVAr}$$

Rozdíl jalových výkonů odpovídá výkonu kompenzačních kondenzátorů:

$$Q_C = Q - Q_k = 607,9 - 188,7 = 419,2 \text{ kVAr}$$

Účinník po kompenzaci:

$$\cos \varphi_k = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_k^2}} = \frac{P}{S} = \frac{880}{900} = 0,977$$

Dále můžeme s pomocí kapitoly 5.2.2 určit, jaké bude napětí na sekundární straně transformátoru, který má tyto parametry $S_n = 1000 \text{ kVA}$, $p = 22/0,4/0,231 \text{ kW}$, $u_k = 6\%$, $\Delta P_k = 13 \text{ kW}$ a to při původním zatížení a při požadovaném navýšení zatížení a kompenzaci.

7.7. Bezpečnost zařízení DS

V [3] jsou specifikovány požadavky na zajištění bezpečnosti zařízení DS, které bude PDS aplikovat takovým způsobem, aby byly splněny požadavky EZ a dalších zákonných předpisů vč. podmínek licence na distribuci elektřiny.

Od uživatelů DS se vyžaduje, aby v místě připojení dodržovali obdobná pravidla a normy pro zajištění bezpečnosti zařízení DS, přičemž pro zajištění bezpečnosti zařízení DS je PDS a uživatel DS v místě připojení povinen zejména:

- **uvádět** do provozu jen taková zařízení DS, která odpovídají příslušným platným normám a předpisům, a jen po provedení předepsaných kontrol, zkoušek a revizí v souladu se zásadami navrhování v DS,
- **vést** technickou dokumentaci pro výrobu, přepravu, montáž, provoz, údržbu a opravy zařízení DS, jakož i technickou dokumentaci technologií, která musí mj. obsahovat i požadavky na zajištění bezpečnosti práce. Neoddělitelnou součástí technické dokumentace musí být zásady pro vykonávání kontrol, zkoušek a revizí,

- **podrobovat** zařízení DS po dobu jejich provozu pravidelným předepsaným kontrolám, zkouškám, popř. revizím, údržbě a opravám v souladu s vlastním **Rádem preventivní údržby nebo předpisy výrobce zařízení**,
- **zaznamenávat** provedené změny na zařízeních DS a v technologiích do jejich technické dokumentace,
- **organizovat** práci, stanovit a provádět pracovní postupy související s výstavbou, řízením, provozem a údržbou zařízení DS tak, aby byly dodržovány i předpisy k zajištění bezpečnosti a ochrany zdraví při práci, předpisy požární ochrany a ochrany životního prostředí.

7.8. Bezpečnost elektrických zařízení a činností na elektrických zařízeních

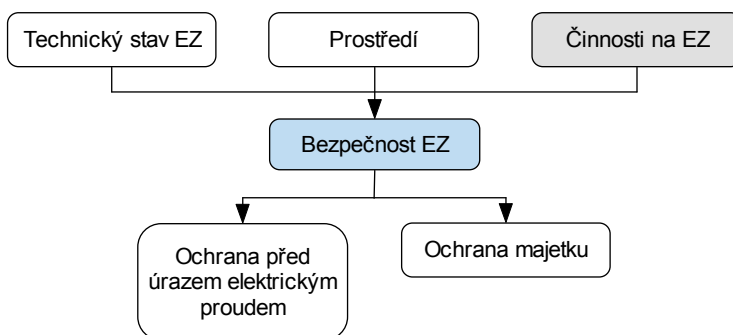
Bezpečnost elektrického zařízení je schopnost elektrického zařízení nezpůsobit úraz nebo škodu, přesněji, neohrožovat za stanovených podmínek provozu lidské zdraví, užitková zvířata nebo majetek a okolní prostředí elektrickým proudem nebo napětím nebo jevy vyvolanými účinky elektřiny a chránit před nebezpečími neelektrického charakteru, která mohou elektrická zařízení způsobovat [10]. **Elektrická zařízení (EZ)** jsou všechna zařízení určená k výrobě, přenosu, distribuci, akumulaci, přeměně a užití elektrické energie. Některá z těchto zařízení jsou stále a pevně instalovaná, například rozvodná zařízení přenosových, distribučních, průmyslových sítí, stejně jako prvky instalací a pevně instalované spotřebiče, některá jsou dočasná například na staveništích, jiná jsou mobilní, nejčastěji elektrické spotřebiče. V souvislosti s provozem distribučních sítí jsou elektrickými zařízeními rozvodná zařízení.

Ohrožení bezpečnosti elektrických zařízení v souvislosti s jejich používáním může vést k úrazu elektrickým proudem; nežádoucím tepelným účinkům proudu, elektromechanickému namáhání či působení elektrického či elektromagnetického pole. Bezpečnost EZ potom zahrnuje:

- ochranu před úrazem elektrickým proudem (při normálním provozu od živých částí, při poruše od neživých částí EZ) či účinky pole;
- a ochranu majetku před tepelnými a mechanickými účinky proudu (při nadproudech zkratech, výbojích, el. obloucích apod.).

Bezpečnost EZ je ovlivněna třemi základními faktory, kterými jsou:

- technický stav představující i technické řešení/uspořádání EZ,
- prostředí, ve kterém se EZ nachází a je v provozu,
- a v neposlední řadě je bezpečnost EZ ovlivněna činnostmi, které jsou na tomto zařízení prováděny.



Obr. 7.8: Bezpečnost elektrických zařízení

K zajištění bezpečnosti obecně slouží soubor opatření, který je možné rozčlenit na opatření technická a personální. Technická opatření na zajištění bezpečnosti jsou obvykle součástí technických požadavků na výrobky či zařízení. Bezpečnost však musí být zajištěna i v souvislosti s užíváním EZ resp. s činnostmi, které jsou na EZ prováděny. Je proto zřejmé, že musí být stanovena a dodržována pravidla respektující typ činnosti a potřebnou kvalifikaci osob. Jednodušší pravidla jsou pro veřejnost (laiky) provádějící základní a jednoduché činnosti a složitější jsou pro složité činnosti prováděné osobami kvalifikovanými v elektrotechnice. Na bezpečnosti zařízení se podílí i vnější vlivy.

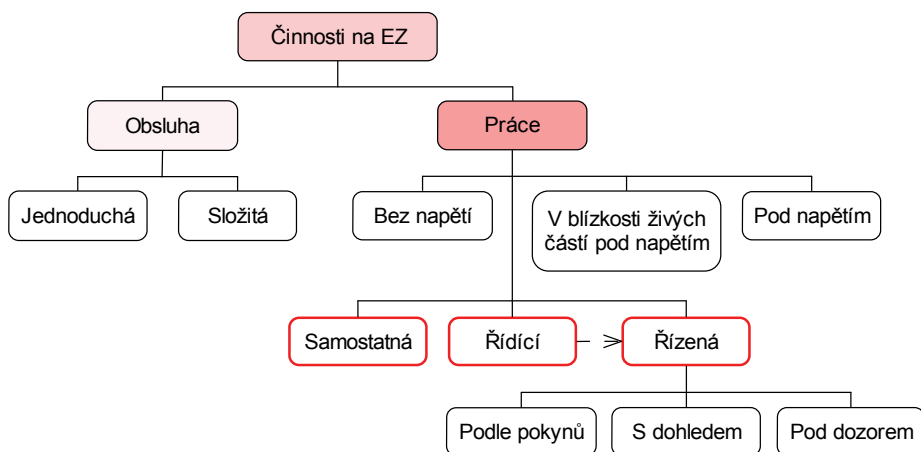
V souhrnu lze konstatovat, že bezpečnost EZ spočívá ve funkčnosti technického provedení a technickém stavu EZ a v činnosti člověka podle pravidel bezpečné obsluhy a práce. Sebelepší pravidla a postupy však nemají význam, pokud s nimi nejsou všechny osoby pracující na/s elektrickým zařízením seznámeny a pracují podle nich.

Základní bezpečnostní předpisy pro obsluhu EZ a práci na a v blízkosti EZ všech napěťových hladin definuje standard ČSN EN 50110-1 [11]. Všechny konkrétní příkazy a nařízení musí být v souladu s touto normou. Komentář k této normě je obsahem TNI 34 3100 [13]. Kromě toho, pro činnost a/nebo pobyt laiků v blízkosti EZ platí norma ČSN 33 1310 [14].

7.8.1 Rozdělení činností na elektrických zařízeních a základní pojmy

Činnost na EZ představuje, či lépe zahrnuje, obsluhu EZ a práci na EZ. Tzn. pracovní úkony nutné k uvedení EZ do provozu a udržení EZ v provozu. Přehled činností na EZ je uveden na Obr. 7.9 [10].

Obsluha a práce zahrnuje všechny pracovní činnosti nutné k uvedení zařízení do chodu. Zahrnuje takové úkony, jako je spínání, ovládání, monitorování, údržba a také práce na či v blízkosti elektrických zařízení a neelektrické práce. Obsluha a práce na elektrických zařízeních jsou rozlišeny zvlášť do 1000 V AC či 1500 V DC a zvlášť nad 1000 V AC a 1500 V DC.



Obr. 7.9: Rozdělení činností na EZ

Obsluha elektrického zařízení je činnost spojená s provozem elektrického zařízení. Jedná se zejména o tyto činnosti: spínání, regulace, prohlídka zařízení (vizuální, sluchová), měření na pevně instalovaných/zabudovaných měřicích přístrojích, a běžná údržba zařízení jako čištění, výměna pojistek, výměna žárovek, atd. Při obsluze se osoby zásadně dotýkají a manipulují jen s těmi částmi, které jsou k tomuto účelu určeny. Za jednoduchou obsluhu se považuje obsluha, kdy při selhání obsluhující osoby nemůže dojít k ohrožení osob, zvířat nebo majetku. Složitá obsluha naopak znamená, že při selhání obsluhujícího k takovému ohrožení dojít může.

Práce na elektrickém zařízení je práce na EZ nebo v jeho blízkosti. Jedná se o činnost spojenou s údržbou a opravou elektrického zařízení, či ověřováním jejich stavu. Do této skupiny činností patří: montážní a demontážní práce, výstavba, rekonstrukce, revize, údržba, výměna součástí či částí EZ, seřizování, měření přenosnými přístroji, ale také úkony spojené se zajišťováním pracoviště apod.

Neelektrická práce je druh práce v blízkosti EZ, například stavební činnost, čištění apod.

Práce mohou být prováděny:

- na zařízení bez napětí. **Práce na zařízení bez napětí** je pracovní činnost na elektrických zařízeních, která nejsou pod napětím ani s nábojem, vykonávaná po provedení všech měření a opatření zabraňujících elektrickému nebezpečí;
- v blízkosti živých částí pod napětím. **Práce v blízkosti živých částí** jsou veškeré pracovní činnosti, při níž osoba zasahuje částí svého těla, náradím, nebo jinými předměty do zóny přiblížení, aniž by zasahovala do ochranného prostoru;
- na zařízení pod napětím. **Práce pod napětím** jsou veškeré práce, při kterých se osoba vědomě dostává do styku s živými částmi nebo

zasahuje do ochranného prostoru buď částmi svého těla, náradím, vybavením nebo předměty, se kterými pracuje.

Způsoby práce prováděné na EZ:

- **Práce podle pokynů.** Práce, pro kterou jsou jen nejnutnější pokyny. Odpovědnost za dodržování bezpečnosti práce (BP) mají osoby samy.
- **Práce s dohledem.** Práce, které se provádí podle podrobnějších pokynů. Osoba provádějící dohled se před zahájením práce přesvědčí o provedených bezpečnostních opatřeních a v průběhu práce kontroluje dodržování bezpečnostních předpisů. Odpovědnost za dodržování BP mají pracující osoby samy.
- **Práce pod dozorem.** Práce, která se provádí za trvalé přítomnosti osoby, která je pověřena dozorem a která je odpovědná za dodržování příslušných BP.

Vedoucí práce je pověřená osoba s konečnou odpovědností za pracovní činnosti. Pokud je to vyžadováno, mohou být některé odpovědnosti přeneseny na jiné osoby.

Osoba odpovědná za elektrické zařízení je osoba pověřená s konečnou odpovědností za stav a provoz elektrického zařízení. Pokud je to vyžadováno mohou být některé odpovědnosti přeneseny na jiné osoby.

S činnostmi na elektrických zařízeních je spojeno i riziko úrazu elektrickým proudem a/nebo škody na elektrických zařízeních samotných i škody na souvisejících předmětech či stavbách.

Elektrické riziko je zdroj možného zranění nebo poškození zdraví působením elektrické energie z EZ. Při činnostech na EZ je osoba vystavena riziku, které je vyvoláno: nesprávnou manipulací, zkratem, indukci, zůstatkovým nábojem, atd.

Elektrické nebezpečí je riziko zranění od EZ.

Zranění způsobená elektřinou jsou smrt nebo zranění osoby způsobené elektrickým proudem, popálením elektrickým obloukem, ohněm nebo výbuchem způsobeným elektrickou energií při obsluze nebo práci na EZ.

Ochranné pomůcky jsou předměty chránící pracující osobu před nebezpečnými účinky elektřiny, před škodlivostí pracovního prostředí nebo jiným ohrožením (jedná se o ochranné izolační rukavice a koberce, ochranné brýle, přilby, ochranné pásy, zkratovací zařízení, apod.).

Pracovní pomůcky jsou předměty potřebné k práci (zkoušečky napětí, měřicí přístroje, izolované nářadí, apod.).

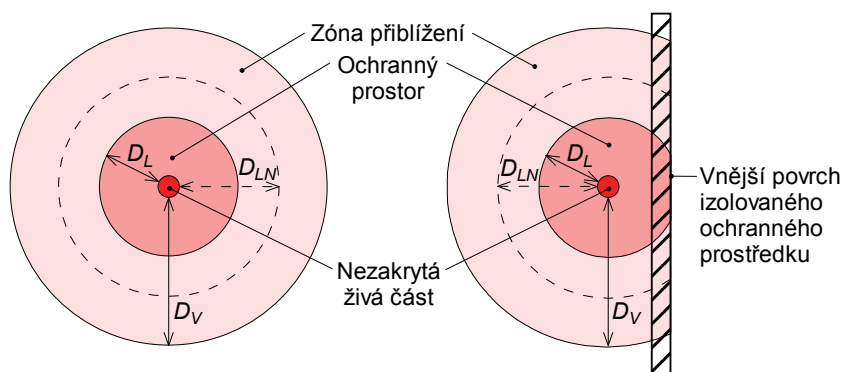
Pracoviště je prostor vymezený pro práci.

Ochranný prostor (Obr. 7.10 [11]) je prostor okolo živých částí, ve kterém není při zasahování nebo vstupování do něho bez ochranných opatření zajištěna izolační hladina s odvrácením elektrického nebezpečí. Práce uvnitř tohoto prostoru jsou práce pod napětím. Vnější hranice ochranného prostoru je měřena od živé části. Vzdálenost D_L se týká vnější hranice ochranného prostoru. Tato hranice

může být dle národních zvyklostí zvýšena na doporučenou vzdálenost D_{LN} . Prostor pro práci pod napětím je ve vzdálenosti nižší než D_L nebo doporučené D_{LN} . Hodnoty vzdáleností jsou uvedeny v Tab. 7.2 [13].

Zóna přiblížení (Obr. 7.10) je vymezený prostor vně ochranného prostoru. Vnější hranice tohoto prostoru je měřena od nejbližší živé části. Vzdálenost D_V je vnější hranice zóny. Práce v blízkosti živých částí je veškerá práce kdy je osoba buď uvnitř v zóně přiblížení, nebo do této zóny zasahuje částí těla, oděvem, nebo náradím, zařízením či předměty, se kterými pracuje, ale nezasahuje do ochranného prostoru. Hodnoty vzdáleností jsou uvedeny v Tab. 7.2.

Bezpečná vzdušná vzdálenost je vzdálenost větší než D_V . Pro neelektrické práce musí být nejkratší vzdušná vzdálenost od živých udržována ve vzdálenosti větší než D_V . Vzdálenosti doporučené po tyto případy (D_{V+}) jsou uvedeny v Tab. 7.3 [13].



Obr. 7.10: Vzdušné vzdálenosti a zóny pro pracovní postupy bez a s ohraničením ochranného prostoru použitím ochranného izolovaného prostředku

Napětí (kV)		Vnější hranice ochranného prostoru podle D_L (cm)	Doporučená vnější hranice ochranného prostoru D_{LN} (cm)		Vnější hranice zóny přiblížení D_V (cm)
Jmenovité	Nejvyšší		Vnitřní	Vnější	
10	12	12	45	50	115
22	25	26	75	80	126
35	38,5	37	85	90	137
110	123	100	140	150	200
220	245	160	230	250	300
400	420	260	350	360	400

Tab. 7.2: Doporučené vzdálenosti D_L , D_{LN} a D_V v závislosti na napětí EZ

7.8.2 Oprávnění osob (pracovníků) pro činnosti na EZ a elektrotechnická kvalifikace

Činnosti na elektrických zařízeních mohou provádět pouze osoby oprávněné s příslušným stupněm (elektrotechnické) kvalifikace. Odbornou způsobilost v elektrotechnice řeší Vyhláška č. 50/1978 Sb. [15]. Českého úřadu bezpečnosti práce a Českého báňského úřadu (se změnami a doplňky dle vyhlášky č. 98/1982 Sb.). Jedná se o prováděcí vyhlášku, která stanoví potřebnou kvalifikaci pracovníků pro obsluhu elektrických zařízení nebo práci na nich, k projektování elektrických zařízení a k řízení činností ve výrobě, montáži a údržbě elektrických zařízení. Rozsah činností jednotlivých osob potom s ohledem na rizika stanovuje osoba odpovědná za elektrické zařízení. Podle stupně kvalifikace může pracovník na elektrickém zařízení vykonávat odpovídající činnost. Kvalifikace osob je kromě vyhlášky 50/1978 Sb. popsána v ČSN EN 50110-1 [11] a ČSN 33 1310 [14].

Kritérii pro vyhodnocení kvalifikace osob jsou:

- elektrotechnické vzdělání,
- zkušenosti s pracemi na EZ, k nabytí kvalifikace je podle jejího stupně potřebná praxe, která závisí na odborném vzdělání v oboru elektrotechniky,
- znalost zařízení a praktické zkušenosti, z pohledu standardních i nestandardních provozních stavů, ale i stavů poruchových,
- a schopnost posouzení situace z hlediska bezpečnosti.

Vyhláška č. 50/1978 Sb. rozlišuje devět kvalifikačních stupňů uvedených pod §3 až §11. První dva kvalifikační stupně, rozlišující osoby seznámené a poučené, jsou vyhrazeny osobám bez elektrotechnického odborného vzdělání. Zbývající stupně potom zahrnují osoby s elektrotechnickým odborným vzděláním rozčleněné na osoby znalé, projektanty a s kvalifikací ve zvláštních případech. Standard ČSN EN 50110 definuje **osobu znalou** jako osobu s odpovídajícím odborným vzděláním, znalostmi a zkušenostmi, umožňující ji vyvarovat se nebezpečí a vyhodnotit rizika, která elektřina může vytvořit, **osobu poučenou** jako osobu prokazatelně poučenou osobami znalými, umožňující ji vyvarovat se nebezpečí, která elektřina může vytvořit, a **osobu seznámenou** jako osobu, která není znalá ani poučená. Přičemž prokazatelně znamená, že organizace provádějící činnost (seznámení, poučení, zaškolení, apod.) musí prokázat záznamem podepsaným oběma stranami (např. školitelem a školeným), že uvedená činnost byla provedena. Součástí záznamu musí být i obsah (náplň) činnosti.

Oprávnění osob pro činnosti na elektrických zařízeních je tedy dáno stupněm jejich kvalifikace. Osoby provádějící činnost na elektrických zařízeních mohou být osoby s elektrotechnickou kvalifikací a osoby bez elektrotechnické kvalifikace.

Osoby bez elektrotechnické kvalifikace (laici, občané) smí samostatně obsluhovat EZ s napětím do 1000 V, která jsou provedena tak, aby při jejich obsluze nemohli přijít do styku s živými částmi pod napětím, pokud nejsou provozovány s bezpečným napětím. Při práci nebo při pobytu/pohybu v blízkosti

EZ, se nesmí laici žádnou částí těla, oděvu, či předmětu užívaného při práci, přiblížit k nekrytým živým částem pod napětím blíže než na vzdálenost uvedenou v Tab. 7.3 [13]. Při opatření živých částí elektrického zařízení kryty, které chrání před úmyslným dotykem, se mohou osoby seznámené s obsluhou a prací přiblížit k tomuto krytu až na dotyk. Seznámení se provádí formou textové informace přikládané k EZ a uvádějící pokyny pro bezpečnou obsluhu a jiné vymezené činnosti na EZ. Jelikož je ale seznámení u laiků (běžných občanů) nekontrolovatelné/neprokazatelné, předpokládá se pouze zodpovědný přístup těchto osob k bezpečnosti vymezených činností na EZ. Tyto osoby smí ovládat jednoduchá elektrická zařízení, provádět běžnou údržbu bez rozebírání pomocí nástrojů a smí vyměňovat části elektrických zařízení, které jsou k tomu přizpůsobeny (pojistky, světelné zdroje, atd.), a to vždy ve vypnutém, případně odpojeném, stavu. Požadavky na EZ určená pro obsluhu laiky jsou specifikovány v normě ČSN 33 1310 [14]. Pokud laik při obsluze zjistí závadu EZ, musí zařízení ihned vypnout a před dalším užíváním přivolat osobu s odpovídající kvalifikací. Při práci v blízkosti EZ s nekrytými živými částmi pod napětím musí laik dbát na bezpečnost, a to obzvláště při práci. Není-li možné pracoviště zabezpečit tak, aby bylo bezpečné, musí se nekryté živé části vypnout a zajistit, i když jsou dodrženy minimální vzdálenosti dané v Tab. 7.3.

Do jmenovitého napětí - včetně (kV)	Bezpečná vzdálenost D_{V+} (cm)
1	100
35	200
110	300
220	400
400	500

Tab. 7.3: Minimální vzdušné vzdálenosti hranice ochranného prostoru od živých částí pod napětím pro osoby bez elektrotechnické kvalifikace

Osoby seznámené (pracovníci seznámení - §3 Vyhl. 50/1978 Sb.) smí provádět stejné činnosti jako osoby bez elektrotechnické kvalifikace (laici). Zásadní rozdíl je, že kvalifikace těchto osob je uvažována ve vztahu k zaměstnání a jejich seznámení musí být provedeno prokazatelně. Rozsah seznámení je určen předpisy o zacházení s elektrickým zařízením, včetně upozornění na možné ohrožení těmito zařízeními, v rozsahu prováděných činností. Seznámení provádí pověřený pracovník organizace s potřebnou kvalifikací a o seznámení se provede zápis podepsaný pověřeným pracovníkem a pracovníky/osobami seznámenými. Osoby seznámené smí samostatně obsluhovat EZ s napětím do 1000 V, která jsou provedena tak, aby při jejich obsluze nemohli přijít do styku s živými částmi pod napětím, pokud nejsou provozovány s bezpečným napětím. Pracovat smí na částech zařízení do 1000V bez napětí podle pokynů. Při práci nebo při pobytu/pohybu v blízkosti EZ, se nesmí osoby seznámené žádnou částí těla, oděvu, či předmětu užívaného při práci, přiblížit k nekrytým živým částem pod napětím blíže než na vzdálenost uvedenou v Tab. 7.3. Na částech zařízení nad 1000 V bez napětí smí pracovat s dohledem. Na živých částech pod napětím pracovat nesmí.

Osoby poučené (pracovníci poučení - §4 Vyhl. 50/1978 Sb.) jsou osoby prokazatelně seznámené osobami znalými umožňující jim vyvarovat se nebezpečí, která elektřina může vytvořit. Organizace prostřednictvím pověřeného pracovníka provádí v rozsahu svých činností seznámení s předpisy pro činnost na EZ, školení v této činnosti, včetně upozornění na možné nebezpečí a seznámení s poskytováním první pomoci při úrazu elektrickým proudem. Organizace stanovuje obsah seznámení, dobu školení s ohledem na charakter a rozsah činností a ověřování znalostí pracovníků ve lhůtách, které si určí. Seznámení, školení a ověření provádí pověřený pracovník/osoba s odpovídající kvalifikací (dle §5-9) se zápisem podepsaným pověřeným pracovníkem a poučeným pracovníkem/osobou. Osoby poučené mohou samostatně obsluhovat EZ všech napětí. Na EZ do 1000 V bez napětí smí pracovat podle pokynů. V blízkosti nekrytých živých částí pod napětím do 1000 V smí potom pracovat podle pracovních postupů a to pouze ve vzdálenosti větší než 20 cm. Na částech pod napětím pracovat nesmějí. Na základě pracovních postupů mohou provádět měření přenosnými měřicími přístroji na živých částech či provádět samostatně jednoduché práce údržby (opravy) na odpojených elektrických strojích/přístrojích. Mohou pracovat s dohledem na zařízeních nad 1000 V bez napětí a v blízkosti EZ nad 1000 V pod napětím pod dozorem a pouze ve vzdálenosti větší než je uvedeno v Tab. 7.4.

Jmenovité střídavé napětí (kV)	Vzdálenost od EZ D_{LN} (cm) v prostředí	
	vnitřní	venkovní
do 10	45	50
22	75	80
35	85	90
110	140	150
220	230	250
400	350	360

Tab. 7.4: Minimální vzdálenosti od živých částí nad 1000 V pro osoby poučené pod dozorem

Osoby znalé (pracovníci znalí - §5 Vyhl. 50/1978 Sb.) jsou osoby s odpovídajícím odborným vzděláním, znalostmi a zkušenostmi, umožňujícími jim vyvarovat se nebezpečí a vyhodnotit rizika, která elektřina může vytvořit. Mají tedy ukončené odborné vzdělání dle přílohy vyhlášky a po zaškolení složili zkoušku předepsaného rozsahu. Zaškolení, obsah a délku školení, určuje a zajišťuje organizace, stejně tak jako zajišťuje zkoušku a přezkoušení alespoň 1x za 3 roky. Zaškolení a přezkoušení provádí organizací pověřený pracovník s kvalifikací dle §6-9. Součástí přezkoušení je i zápis podepsaný pověřeným pracovníkem i pracovníkem (osobou) znalým. Osoby znalé smí samostatně obsluhovat všechna elektrická zařízení bez rozdílu napětí. Na EZ do 1000 V bez napětí mohou pracovat samy, v blízkosti živých částí a na částech pod napětím smějí pracovat podle pracovních postupů, ve venkovních prostorách pak pouze pod dozorem. Na EZ nad 1000 V bez napětí mohou pracovat samy, v blízkosti živých částí smí pracovat podle pracovních postupů s dohledem a na částech pod napětím podle pracovních postupů pod dozorem.

Osoby pro samostatnou činnost (pracovníci pro samostatnou činnost - §6 Vyhl. 50/1978 Sb.) jsou osoby, které mají potřebné znalosti a zkušenosti se zařízením, na kterém má být prováděna požadovaná činnost. Jedná se o osoby s vyšší kvalifikací, splňující požadavky na pracovníky dle §5 s minimální definovanou praxí na EZ, kteří zkouškou prokáží znalosti potřebné pro samostatnou činnost. Zkoušku je povinna zajistit organizace, přezkoušení pak nejméně jednou za tři roky. Zkoušení provádí organizaci pověřená tříčlenná zkušební komise, přičemž jeden člen musí mít kvalifikaci dle §7-9. Ze zkoušky je pořízen zápis podepsaný členy komise. Rozsah oprávnění pro činnosti na EZ je u těchto osob oproti osobám znalým rozšířen. Tedy mohou samostatně obsluhovat všechna elektrická zařízení bez rozdílu napětí. Na EZ do 1000 V bez napětí mohou pracovat samy, v blízkosti živých částí a na částech pod napětím smějí pracovat podle pracovních postupů. Na EZ nad 1000 V bez napětí mohou pracovat samy, v blízkosti živých částí pracovat podle pracovních postupů a na částech pod napětím smějí pracovat pod dozorem.

Osoby pro řízení činností (pracovníci pro řízení činnosti - §7 Vyhl. 50/1978 Sb.) jsou osoby znalé s vyšší kvalifikací, které splňují požadavky dle §6 nebo §5, a které mají alespoň nejkratší požadovanou praxi a složením zkoušky prokáží znalosti potřebné pro řízení činnosti. Zkoušku je povinna zajistit organizace, přezkoušení pak nejméně jednou za tři roky, přičemž o termínu a místě zkoušky organizace prokazatelně uvědomí příslušný orgán dozoru. Příslušným orgánem dozoru se rozumějí orgány dozoru uvedené v § 1 a § 3 odst. 2 zákona č. 174/1968 Sb., o státním odborném dozoru nad bezpečností práce v aktuálním znění. Zkoušení provádí organizaci pověřená tříčlenná zkušební komise, jeden člen musí mít kvalifikaci dle §8 nebo 9. Ze zkoušky je pořízen zápis podepsaný členy komise. Rozsah oprávnění pro činnosti na EZ je u těchto osob shodný s pracovníky pro samostatnou činnost. Navíc mohou provádět řízení (dohled, dozor) osob s nižší kvalifikací při práci na EZ.

Osoby (pracovníci) pro řízení činnosti prováděné dodavatelským způsobem a pracovníci pro řízení provozu (§8 Vyhl. 50/1978 Sb.) jsou osoby znalé s vyšší kvalifikací, které splňují požadavky dle §7 nebo §6, a které mají alespoň nejkratší požadovanou praxi a složením zkoušky prokáží znalosti potřebné pro řízení činností prováděné dodavatelským způsobem resp. pro řízení provozu. Zkoušku je povinna zajistit organizace, přezkoušení je pak nejméně jednou za tři roky, přičemž o termínu a místě zkoušky organizace prokazatelně uvědomí příslušný orgán dozoru alespoň čtyři týdny před konáním zkoušky. V téže lhůtě uvědomí i příslušnou organizační složku (závod) organizace pro distribuci elektrické energie, půjde-li o pracovníky pro řízení činnosti prováděné dodavatelským způsobem nebo o pracovníky pro řízení provozu elektrických odběrných zařízení připojených přímo na zařízení veřejné distribuční soustavy. Zkoušení provádí organizaci pověřená alespoň tříčlenná zkušební komise, jejíž nejméně dva členové mají kvalifikaci dle §8 pro řízení činnosti prováděné dodavatelským způsobem nebo §9. Ze zkoušky je pořízen zápis podepsaný členy komise. Rozsah oprávnění pro činnosti na EZ je u těchto osob shodný s pracovníky pro samostatnou činnost. Navíc může provádět řízení (dohled, dozor) osob s nižší kvalifikací při práci na EZ dodavatelským způsobem.

Osoby pro provádění revizí (pracovníci pro provádění revizí - §9 Vyhl. 50/1978 Sb.) jsou osoby znalé s vyšší kvalifikací, kteří mají ukončené odborné vzdělání dle přílohy vyhlášky, mají minimální požadovanou praxi a na žádost složili zkoušku před příslušným orgánem dozoru. Pro provádění zkoušek a přezkoušení revizních techniků platí zvláštní předpisy vydané příslušnými orgány dozoru. Jde o zvláštní kvalifikační stupeň zařazený do skupiny pracovníků znalých s vyšší kvalifikací. Zkouška těchto pracovníků se uskutečňuje na podkladě žádosti organizace u příslušného orgánu dozoru. Příslušným orgánem dozoru je třeba rozumět ten orgán dozoru, pod jehož dozorcí pravomoc organizace spadá. Ověřování odborné způsobilosti pracovníků organizací provádí orgány dozoru jen v případech, kdy je pracovník v pracovním poměru s organizací a je nebo bude touto funkcí pověřen. Pravidla, která platí pro ověřování odborné způsobilosti pracovníků, je potřebné si vždy ověřit u příslušného orgánu dozoru. Příslušným orgánem dozoru je v současné době Technická inspekce České republiky. Kvalifikace podle §9 v sobě neobsahuje kvalifikace dosud uvedené. Pouze se předpokládá, že osobou pro provádění revizí je osoba znalá s vyšší kvalifikací, tedy alespoň dle §6. Oprávněnost osoby pro provádění revizí se pak vztahuje na ty činnosti na EZ, které jsou součástí samotné revize (měření, zkoušení). Oprávněnost této osoby pro práce na EZ jsou pak dány její kvalifikací z rozsahu předchozích.

Osoby (pracovníci) pro samostatné projektování a řízení projektování (§10 Vyhl. 50/1978 Sb.) jsou ti, kteří mají odborné vzdělání a praxi určenou zvláštními předpisy a složili zkoušku ze znalostí předpisů k zajištění bezpečnosti práce a technických zařízení a z předpisů souvisejících s projektováním. Zkoušku je povinná zajistit organizace, která projektuje. Dále je povinná zajistit nejméně jednou za tři roky přezkoušení pracovníků pro samostatné projektování a pracovníků pro řízení projektování. Zkoušení nebo přezkoušení provádí organizací pověřená tříčlenná zkušební komise, jejíž nejméně jeden člen musí mít kvalifikaci uvedenou v §8 nebo 9. O termínu a místě konání zkoušek nebo přezkoušení organizace prokazatelně uvědomí příslušný orgán dozoru alespoň čtyři týdny před jejich konáním. V téže lhůtě uvědomí i příslušnou organizační složku (závod) organizace pro distribuci elektrické energie, půjde-li o pracovníky pro řízení činnosti prováděné dodavatelským způsobem nebo o pracovníky pro řízení provozu elektrických odběrných zařízení připojených přímo na zařízení veřejné distribuční soustavy. Obsah zkoušky je pak uzpůsoben danému kvalifikačnímu stupni, musí být v souladu s konkrétní náplní pracovníka a zahrnuje především elektrotechnické předpisy související s projektováním EZ. Na rozdíl od předchozích kvalifikací se zde neurčuje délka potřebné praxe v závislosti na výši vzdělání. To se ponechává na organizaci a zvláštních předpisech. Obdobně jako v předchozím, kvalifikace podle §10 sama o sobě neopravňuje k provádění ostatních činností na EZ. Ve smyslu ČSN EN 50110 není projektování činností na EZ.

Kvalifikace ve zvláštních případech (§11 Vyhl. 50/1978 Sb.) se týká kvalifikace pracovníků výukových laboratoří, vědeckých a vývojových laboratoří. Absolventi vysoké školy elektrotechnické a absolventi přírodovědecké fakulty oboru fyziky, kteří pracují jako asistenti v laboratořích škol všech stupňů, se považují na svých pracovištích za pracovníky pro řízení činnosti (§7), pokud složili zkoušku

v rozsahu stanoveném vyhláškou. Jejich znalosti musí být ověřovány nejméně jednou za tři roky. Pracovníci vědeckých, výzkumných a vývojových ústavů, kteří mají vysokoškolské vzdělání, v rámci výuky složili zkoušky z elektrotechniky, elektroniky nebo fyziky, nebo složili závěrečnou zkoušku z elektrotechniky nebo jaderné fyziky na střední odborné škole a kteří vykonávají experimentální práci na vymezených vědeckých, výzkumných nebo vývojových pracovištích, se považují za pracovníky pro samostatnou činnost (§6), pokud složili po zaškolení zkoušku v rozsahu stanoveném vyhláškou. Jejich znalosti musí být ověřovány nejméně jednou za tři roky. Učitelé, kteří používají při výuce na školách elektrická zařízení pod napětím, se považují pro tuto činnost za pracovníky pro samostatnou činnost (§6). Musí však být v používání zařízení prokazatelně zaškoleni a jejich znalosti bezpečnostních předpisů souvisejících s jejich činností musí být ověřovány přezkoušením nejméně jednou za tři roky. Zkoušení nebo přezkoušení pracovníků uvedených ve všech případech provádí tříčlenná zkušební komise, jejíž nejméně jeden člen musí mít některou z kvalifikací daných § 7 až 9. Komise o tom pořídí zápis podepsaný jejími členy. Komisi ustavuje vedoucí organizace. Specifikace kompetencí uvedených pracovníků a oprávněnosti jejich činností na EZ je upravena Ministerstvem školství pro interní potřebu pracovníků.

Přehled kvalifikace pracovníků a podmínky pro její získání podle Vyhl. 50/1978 Sb. v návaznosti na činnosti na EZ je v Tab. 7.7 [10].

Je tedy zřejmé, že jakékoliv práce na EZ jsou osobám bez elektrotechnické kvalifikace podle vyhl. 50/1978 Sb. zakázány. Nicméně ani osoby znalé (pracovníci znalí a znalí s vyšší kvalifikací) nesmí vykonávat práce zakázané. Tj. práce, při kterých nemohou být dodrženy podmínky bezpečnosti práce, jako jsou například práce při nevyhovujících atmosférických podmínkách, ve stísněných podmínkách, v prostorách s nevyhovujícím prostředím, atd.

Rozsah a způsob provádění činností na EZ a v blízkosti živých částí pro jednotlivé stupně odborné způsobilosti osob (kvalifikace podle Vyhl. 50/1978Sb.) je v souhrnu uveden v Tab. 7.5 [13]. Naopak minimální odborná způsobilost osob pro provádění činností na EZ a v blízkosti živých částí daná jejich oprávněním je podle způsobu provádění práce uvedena v souhrnu v Tab. 7.6. K oběma tabulkám jsou vázány doplňující podmínky respektující kompetence jednotlivých osob, dané jejich kvalifikací, a postupy pro provádění jednotlivých činností pokud existují. Přitom o tom, jaké činnosti může osoba znalá vykonávat, rozhoduje osoba odpovědná za elektrické zařízení na základě kvalifikace této osoby.

Kvalifikace pracovníků (podle vyhl. 50/1978 Sb.)	Obsluha zařízení		Práce na zařízení					
			bez napětí		v blízkosti živých částí		pod napětím	
	do 1000V	nad 1000V	do 1000V	nad 1000V	do 1000V	nad 1000V	do 1000V	nad 1000V
Osoba seznámená (§3)	smí	nesmí	smí podle pokynů	smí s dohledem	smí ve vzdálenosti větší než D_{V+}		nesmí	
Osoba poučená (§4)	smí samostatně				smí podle pracovních postupů	smí ve vzdálenosti větší než D_{LN}	smí podle pracovních postupů	nesmí
Osoba znalá (§5)								
Osoba znalá s vyšší kvalifikací (§6)								

Tab. 7.5: Rozsah a způsob provádění činností na EZ a v blízkosti živých částí pro jednotlivé stupně odborné způsobilosti

				způsob provádění práce				
				řízená			samostatná	řídící
				pod dozorem	s dohledem	podle pokynů		
činnost	obsluha	do 1000V					§3	
		nad 1000V					§4	
	práce	na EZ bez napětí	do 1000V			§3	§5	§7
			nad 1000V		§3		§5	§7
		v blízkosti živých částí	do 1000V		§4		§5	§7
			nad 1000V	§4	§5			§7
		na EZ pod napětím	do 1000V	§5			§5	§7
			nad 1000V	§5				§7
	revize						§9	
	projektování						§10	§10

Tab. 7.6: Minimální odborná způsobilost pro provádění činností na EZ a v blízkosti živých částí podle způsobu provádění práce

Kvalifikace pracovníků			Výchozí požadavky		Provéření způsobilosti			
§	Popis	Pro činnost na EZ	Odborné vzdělání	Odborná praxe	Provéření	Zkušební komise	Oznámení zkoušky	Platnost
3	Pracovníci seznámení	do 1000V	žádné	žádná	NE	NE	NE	podle Zák. práce
4	Pracovníci poučení	bez omezení napětí	zaškolení	žádná	ANO	NE	NE	určí zaměstnavatel
5	Pracovníci znalí	bez omezení napětí	V,SO,ÚSO, VŠ	žádná	ANO	NE	NE	3 roky
6	Pracovníci pro samostatnou činnost	do 1000V	V,SO,ÚSO, VŠ	1 rok	ANO	ANO	NE	3 roky
		nad 1000V	V,SO,ÚSO, VŠ	2 roky				
		hromosvody	zaškolení	6 měsíců				
			V,SO,ÚSO, VŠ	3 měsíce				
7	Pracovníci pro řízení činnosti	do 1000V	V	2 roky	ANO	ANO	orgán dozoru	3 roky
			SO,ÚSO, VŠ	1 rok				
		nad 1000V	V	3 roky				
			SO,ÚSO, VŠ	2 roky				
		hromosvody	zaškolení	1 rok				
			V,SO,ÚSO	6 měsíců				
8	Pracovníci pro řízení činnosti prováděné dodavatelským způsobem a pro řízení provozu	do 1000V	V, SO	6 roků	ANO	ANO	orgán dozoru a provozovatel distr. soustavy (PDS)	3 roky
			ÚSO	4 roky				
			VŠ	2 roky				
		nad 1000V	V, SO	7 roků				
			ÚSO	5 roků				
			VŠ	3 roky				
		hromosvody	V	2 roky				
			SO,ÚSO, VŠ	6 měsíců				
9	Pracovníci pro provádění revizí	bez omezení	V,SO,ÚSO, VŠ	podle objektů	ANO	Zkouší příslušný orgán dozoru podle zvláštních předpisů		
10	Pracovníci pro samostatné projektování a pro jeho řízení	do 1000V	SO,ÚSO, VŠ	zvláštní předpis	ANO	ANO	orgán dozoru a PDS	3 roky
		nad 1000V	SO,ÚSO, VŠ					
11	Kvalifikace ve zvláštních případech	podle prac. zařazení	SO,ÚSO, VŠ		ANO	ANO	NE	3 roky

Tab. 7.7: Přehled kvalifikace osob a podmínky pro její získání podle [15]

7.8.3 Základní principy provádění činností na elektrických zařízeních

Základem bezpečné obsluhy a práce je hodnocení elektrických rizik před zahájením jakékoliv práce na elektrickém zařízení nebo jeho obsluhy. Podle hodnocení musí být stanoveno, jakým způsobem musí být činnosti vykonávány a jaká opatření musejí být provedena, ve smyslu zajištění bezpečnosti.

Pro každé elektrické zařízení musí být stanovena osoba odpovědná za dané EZ. Stejně tak musí být pro každou práci na EZ určen vedoucí práce zodpovědný za prováděnou činnost. V rámci přípravy práce na zařízení se musí obě osoby dohodnout jak na uspořádání EZ (nezbytná je dostupnost existence a dokumentace skutečného provedení EZ včetně záznamů), tak na popisu pracovní činnosti na EZ. Příprava na provedení složité pracovní činnosti musí být provedena písemně.

Provádět činnost na elektrickém zařízení smí jen ty osoby, které mají na danou činnost požadovanou kvalifikaci, praktické zkušenosti a dovednosti, znalosti o tomto zařízení a splňují další požadavky pro práci na EZ, a jsou s danou prací na EZ seznámeni. Veškeré osoby vykonávající práci na elektrickém zařízení, s ním nebo v jeho blízkosti, musejí být školeni z bezpečnostních předpisů a místních pracovních předpisů týkajících se jejich práce včetně poskytování první pomoci především při zranění způsobeném elektrickým proudem a/nebo popálením. Pokud je práce dlouhodobá nebo složitá, musejí být školení opakována. Musí být vyžadováno dodržování těchto předpisů a pokynů. Na dodržování všech bezpečnostních pokynů a opatření před započetím a v průběhu pracovní činnosti dbá vedoucí práce.

Před zahájením každé pracovní činnosti musí být o plánované práci informována osoba zodpovědná za EZ. Při předání musí být sděleny veškeré potřebné informace o stavu EZ (jako je uspořádání sítě, stavy spínacích přístrojů, apod.) a uspořádání ochranných prostředků pro zajištění bezpečné práce a obsluhy.

Vlastní pracoviště musí být jednoznačně určeno a označeno. Musí být přijata vhodná opatření k zabránění zranění osob i v důsledku jiných než elektrických rizik. Bezpečnost práce na pracovišti musí být zajištěna všemi dostupnými prostředky.

Činnosti vykonávající osoby musí být vybaveny odpovídajícím způsobem vyhovujícím oděvem včetně osobních ochranných prostředků (OOP) a pracovními pomůckami. OOP a pracovní pomůcky musí být používány v souladu s instrukcemi jejich výrobce a musí být pro dané použití vhodné.

7.8.4 Běžné provozní postupy

Všeobecné zásady jsou součástí normy ČSN EN 50110-1 [11]. V případě následujících činností, na které jsou vázány běžné pracovní postupy, musí být používáno přiměřené a vhodné vybavení a výstroj, zabraňující ohrožení osob elektrickým nebezpečím. Tyto činnosti musí být schválené osobou odpovědnou za EZ, které musí být seznámena i s ukončením činností na EZ. Pracovní postupy pro vybraná EZ a činnosti na nich prováděné řeší i jiné předpisy než [11].

7.8.4.1 Provozní činnosti

Provozní činnosti jsou určeny ke změně provozního stavu EZ a mohou být vykonávány místně nebo dálkově. Existují dva druhy provozních činností:

- manipulace, určené ke změně elektrického stavu EZ s použitím zařízení určených k práci na něm, a to bez rizik,
- odpojení nebo připojení elektrického zařízení pro práce na něm.

Odpojení pro práci bez napětí nebo opětovné připojení musí být vykonáno osobami znalými nebo poučenými. Odpojení dodávky elektřiny v případě stavu nouze musí být provedeno v souladu se zákonem č. 458/2000 Sb. v platném znění. Nouzový provoz elektrických distribučních soustav musí být řízen osobami znalými nebo poučenými. Jestliže vzniklé zemní spojení u elektrické sítě se jmenovitým napětím nad 1 kV není odpojeno, musí být provedeno opatření k jeho lokalizaci a přijata odpovídající bezpečnostní opatření k ochraně a bezpečnosti osob.

7.8.4.2 Kontroly funkčního stavu

Kontroly funkčního stavu jsou pro účely normy ČSN EN 50110-1 rozděleny na měření, zkoušení a revize.

Měření je definováno jako všechny činnosti, při kterých jsou měřeny fyzikální veličiny v elektrickém zařízení. Měření mohou provádět osoby znalé nebo osoby poučené, osoby seznámené mohou provádět měření pouze pod dozorem osoby znalé.

Hrozí-li nebezpečí dotyku s živými částmi, musí mít osoba vykonávající měření OOP a pomůcky a dodržovat opatření na ochranu před úrazem elektrickým proudem, atd. Podle potřeby musí být použity postupy pro práci bez napětí, práci pod napětím nebo práci v blízkosti zařízení pod napětím.

Zkoušení zahrnuje všechny činnosti určené k ověření elektrického, mechanického, či tepelného stavu EZ. Zkoušení může zahrnovat měření. Zkoušení musí být vykonáváno osobami znalými nebo poučenými pod dozorem osoby znalé.

Zkoušení odpojeného zařízení musí být prováděno v souladu s postupy pro práci bez napětí. Při zkoušení zařízení při normálním napájení musí být dodrženy postupy pro práce pod napětím nebo v blízkosti živých částí.

Některé speciální zkoušky, např. ve zkušebnách vysokého napětí, musejí být prováděny osobami znalými s vhodným speciálním výcvikem a v případě nutnosti za opatření podle EN 50191 a podle postupů pro práce na EZ.

Revize je činnost, jejímž účelem je ověřit, zda EZ je v souladu s bezpečnostními předpisy a stanovenými technickými požadavky příslušných norem a může zahrnovat i ověření provozního stavu zařízení. Nová elektrická zařízení, stejně jako úpravy a rozšíření stávajících zařízení, musí být před jejich uvedením do provozu, ale také ve stanovených časových intervalech, revidována. Výchozí a periodické revize musí být v souladu s ČSN 33 1500 a ČSN 33 2000-6-

61 ed.2. Revize zahrnuje vizuální prohlídku a měření a/nebo zkoušení v souladu s postupy pro měření a zkoušení.

Revize musí být prováděny s odvoláním na příslušnou dokumentaci a členění zařízení. Jestliže zjištěné závady představují bezprostřední nebezpečí, musejí být neprodleně odstraněny nebo vadné části musejí být neprodleně odpojeny a zajištěny proti opětovnému zapojení. Revize musí být prováděny osobami pro provádění revizí a musí být konány takovými prostředky a způsoby, aby se zabránilo elektrickému nebezpečí od živých částí EZ. Výsledek revize musí být zaznamenán.

7.8.5 Pracovní postupy

Pracovní postup musí být sestaven před zahájením pracovní činnosti. Osoby provádějící pracovní činnost musí být s tímto postupem seznámeny před jejím zahájením, a to osobou odpovědnou za EZ nebo vedoucím práce. Před zahájením práce musí vedoucí práce informovat osobu odpovědnou za EZ. Povolení k provádění pracovní činnosti může dát pouze osoba odpovědná za EZ. Osoba zodpovědná za EZ, stejně jako osoby provádějící pracovní činnost, musí být informována o ukončení prací. V dalším jsou rozlišeny tři základní pracovní postupy:

- práce bez napětí,
- práce v blízkosti živých částí,
- a práce pod napětím.

Izolační hladina musí být při práci zajištěna např. vložením pevného izolačního materiálu nebo pomocí vzdušné vzdálenosti, které jsou uvedeny v IEC 61472.

Všechny tyto postupy jsou založeny na používání ochranných opatření proti úrazu elektrickým proudem a/nebo účinkům zkratu a elektrického oblouku. Jestliže požadavky postupu pro práce bez napětí nebo práce v blízkosti živých částí nemohou být splněny, potom musí být dodrženy požadavky postupu pro práce pod napětím.

Vodiče nebo vodivé části v blízkosti vodičů pod napětím mohou být ovlivňovány indukcí. Při práci na takto ovlivňovaných EZ musí být kromě požadavků na práci na EZ přijata následující opatření:

- uzemnění v takových vzdálenostech, aby byl potenciál mezi vodiči a zemí omezen na bezpečnou hodnotu,
- ekvipotenciální spojení na pracovišti, aby bylo zabráněno možnosti zranění osob indukcí.

V případě nepříznivých atmosférických podmínek například bouři, silném dešti, mlze, větru atd. musejí být přijata příslušná omezení u zahajovaných a/nebo prováděných prací. Blíží-li se bouře, musí být práce na neizolovaných vodičích elektrické sítě vystavených nebezpečí anebo na zařízení spojených s ohroženými vodiči ihned zastavena a musí být o nastalé situaci informována osoba

zodpovědná za EZ. Pokud je na pracovišti špatná viditelnost, nesmí být zahájena žádná pracovní činnost a veškeré probíhající práce musí být přerušeny.

7.8.5.1 Práce bez napětí

Zajištění pracoviště

Elektrické zařízení, na kterém se má pracovat, musí být po celou dobu práce bez napětí a bezpečné. To vyžaduje zajištění pracoviště postupným splněním 5 základních požadavků („pět bezpečnostních pravidel“), pokud není zvláštní důvod konat jinak:

- **úplné odpojení** části zařízení, na které se pracuje, od všech zdrojů možného napájení. Odpojení musí být provedeno vzdušnou vzdáleností nebo izolací, která zajistí elektrické oddělení v místě odpojení;
- **zabezpečení proti opětovnému zapnutí** nepovolanou osobou; Vypnutý stav musí být řádně zajištěn proti opětovnému zapnutí uzamčením spínacích přístrojů ve vypnutém stavu apod., popřípadě musí být provedena odpovídající opatření pro zabránění opětovného zapnutí. Veškerá signalizace a uzamykatelné systémy použité pro tento účel musí být spolehlivé;
- **ověření beznapětového stavu**; spolehlivým a bezpečným způsobem musí být ověřeno, že část zařízení, na němž se má pracovat, je na všech pólech, fázích a přívodech bez napětí. Trvale zabudované systémy signalizující stav zařízení, jsou jen pomocnými prostředky a nemohou být pro tento účel použity;
- **uzemnění a zkratování** se musí provést u všech částí EZ nad 1000 V a u některých EZ do 1000 V, na kterých bude prováděna práce. Uzemňovací a zkratovací zařízení musejí být nejprve spojena s uzemňovací soustavou a pak se všemi vodiči vypnutého zařízení a to ze všech stran napájení. Zkratování a uzemnění musí být provedeno i přímo na pracovišti, nebo alespoň na dohled z pracoviště. Ze zařízení do 1000 V se tímto způsobem zajišťuje pouze venkovní vedení. Ve všech případech musí být zajištěno, aby uzemňovací a zkratovací zařízení (včetně všech dalších součástí systému) byly dimenzovány tak, aby odolaly zkratovému proudu v místě instalace;
- **provedení ochranných opatření proti živým částem, které se nacházejí v blízkosti**, se musí realizovat před zahájením práce, tak aby pracující osoby nemohly omylem vstoupit do prostoru s živými částmi, nebo se k těmto částem přiblížit. K těmto opatřením patří např. ohrazení vymezení pracoviště a únikové cesty, označení bezpečnostními tabulkami, páskami, apod.

Je zakázáno přibližovat se k živým částem a na menší než bezpečnou vzdálenost a dotýkat se odpojených živých částí dokud není provedeno jejich úplné zajištění.

Souhlas k zahájení těchto prací musí dát osoba odpovědná za EZ vedoucímu nebo vedoucím práce. Osoba provádějící tyto činnosti musí být osoba znalá, nebo poučená pod dozorem osoby znalé. Po zajištění pracoviště zkontroluje osoba určená k zajištění pracoviště spolu s vedoucím práce úplnost provedení bezpečnostních opatření na pracovišti.

Povolení k zahájení práce

Povolení k zahájení práce musí dát na základě pověření osobou odpovědnou za EZ vedoucí práce a to všem osobám zúčastněným na práci.

Po zajištění pracoviště zkontroluje osoba určená k zajištění pracoviště spolu s vedoucím práce úplnost provedení bezpečnostních opatření na pracovišti a teprve potom povolí pracovní skupině vstup na pracoviště.

Po provedení této kontroly přesvědčí osoba zajišťující, nebo kontrolující zajištění, pracoviště pracovní skupinu o beznapěťovém stavu přímým dotykem na neizolovanou zajištěnou část EZ (nejlépe holou rukou).

Opětovné uvedení zařízení do provozu

Potřebné zkoušky zařízení, na němž se pracovalo, se musí provést na ještě zajištěném zařízení. Po ukončení práce a zkoušek musí pracovní skupina uvést EZ do provozuschopného stavu. Následně musí být všechny zúčastněné osoby vedoucím práce odvolány a musí jim být oznámeno, že práce jsou ukončeny. Po kontrole pracoviště vedoucím práce a odchodu všech členů pracovní skupiny je možné odstranit zajištění pracoviště, a to v opačném pořadí než při zajišťování pracoviště. Po odstranění zkratovacího zařízení se EZ nebo jeho vypnutá část považuje již za zařízení pod napětím.

Příkaz k zapnutí (uvedení zařízení pod napětí) smí dát odpovědná osoba za EZ nebo jí pověřená osoba teprve v okamžiku, kdy obdrží od osoby, která provedla odjištění pracoviště zprávu, že byla provedena veškerá opatření nutná k uvedení zařízení pod napětí, takže nehrozí žádné nebezpečí osobám nebo věcem a že je zajištěna bezpečnost chodu EZ.

7.8.5.2 Práce v blízkosti živých částí

Práce na EZ v blízkosti živých částí pod napětím je práce, při níž zařízení není odpojeno od napětí, avšak při které se pracující osoba ani předměty nedotýká živých částí pod napětím, ale může se tělem, oděvem či vodivými předměty přiblížit k nekrytým živým částem pod napětím až na vzdálenost určenou vnější hranicí ochranného prostoru, která je závislá na velikosti jmenovitého napětí EZ.

Pracovní činnosti v blízkosti živých částí se jmenovitým napětím nad 50 V AC nebo 120 V DC mohou být vykonávány pouze tehdy, jsou-li zajištěna taková opatření, že nemůže dojít k dotyku živých částí nebo nemůže být zasaženo do ochranného prostoru. Při pracích na zařízeních v blízkosti živých částí je nutno dodržet minimální vzdušné vzdálenosti D_L od kterékoliv části těla, nebo s ním spojeného vodivého předmětu. Doporučuje se dodržovat vzdušné vzdálenosti D_{LN} . Pro odstranění možnosti vzniku nebezpečí v blízkosti živých částí, musí být ochrana zajištěna buď kryty, přepážkami, zábranami nebo izolačním zakrytím.

Před zahájením práce musí vedoucí práce poučit osoby ve smyslu dodržování bez. vzdáleností, bezpečnostních opatření a potřeby nepřetržitého vědomí bezpečnosti. Hranice pracoviště musí být jasně definována. Pracoviště má být opatřeno vhodnými zábranami, značením a signalizací. Sousední nezakryté části zařízení musí být označeny dalšími zřetelnými prostředky. Při montáži ochranných prostředků uvnitř ochranného prostoru musí být EZ vypnuto nebo musí být přijaty postupy pro práci na EZ pod napětím.

Při provádění neelektrických prací v blízkosti EZ musí být vždy dodržována stanovená vzdálenost, která musí být měřena od nejbližších vodičů nebo nezakrytých živých částí. Stanovená vzdálenost musí být odvozena od D_V a dostatečně zvětšena s ohledem na napěťovou hladinu, druh práce, použité zařízení, osoby bez potřebné kvalifikace. Při stanovení vzdálenosti je možné vycházet ze vzdáleností D_{V+} v Tab. 7.3.

7.8.5.3 Práce pod napětím

Práce pod napětím (PPN) jsou členěny na běžné PPN a vybrané PPN. Vybrané práce pod napětím jsou práce prováděné stanovenými pracovními postupy a metodami a mohou být vykonávány jen osobami k těmto pracím vyškolenými.

Za běžné PPN se považují: měření přenosnými přístroji, zkoušení včetně ověření napěťového stavu, zajištění a odjištění pracoviště, výměna výkonových pojistek nad 1000 V, práce na nekrytých živých částech zařízení do 1000 V apod. Vybrané práce pod napětím jsou:

- **práce na vzdálenost** – práce na EZ, při níž je osoba mimo ochranný prostor a do tohoto prostoru vniká a živých částí se dotýká pouze pracovními pomůckami a s použitím ochranných prostředků,
- **práce v dotyku** – práce na EZ, při níž pracující osoba vniká do ochranného prostoru a dotýká se živých částí příslušnými pracovními pomůckami za současného použití ochranných prostředků,
- **práce na potenciálu** – práce na EZ, při níž je osoba vodivě spojena s živými částmi jedné fáze (pólu), na kterém pracuje, a za jejíž součást je považována,
- kombinace výše uvedených metod.

Za práce pod napětím se však považují i práce v takové blízkosti od živých částí pod napětím, že při nich nejsou dodrženy minimální předepsané bezpečné vzdálenosti, nebo když práce probíhá na živých částech sice vypnutých, ale nezajištěných proti uvedení pod napětí.

Práce na EZ pod napětím se dovoluje jen tehdy, jsou-li zařízení přehledná a části, na nichž se má pracovat, jsou přístupné. Při práci musí být dodržena všechna bezpečnostní opatření, použity předepsané ochranné a pracovní pomůcky a práce musí být prováděna pouze podle schváleného pracovního postupu. Pracovní metody pro práce pod napětím mohou být prováděny jen

na základě předem stanovených pracovních postupů odsouhlasených osobou odpovědnou za EZ.

Vybrané PPN se mohou provádět za následujících podmínek:

- na vybrané PPN se vydává písemný příkaz „B-PPN“,
- při PPN musí být zajištěno stabilní postavení, které pracující osobě umožňuje mít obě ruce volné,
- PPN se smí provádět buď příslušnými ochrannými prostředky a pracovními pomůckami izolovanými pro napětí, na němž se pracuje, nebo ze stanoviště izolovaného proti zemi pro dané napětí,
- při PPN musí osoby dodržovat minimální vzdálenost kterékoliv části těla nebo s tělem spojených vodivých předmětů od uzemněných částí na vzdušnou vzdálenost D_L Tab. 7.2,
- při PPN na potenciálu dbá osoba o trvalé spojení se živou částí, pracovat smí jen na jedné fázi (pólu) EZ a nesmí se přiblížit k částem s jiným potenciálem kteroukoliv částí těla, nebo vodivými předměty se kterými pracuje na vzdálenost menší než D_L .

Práce pod napětím jsou zakázány v nevyhovujících prostorách, při nevhodných atmosférických podmínkách a dále všude tam, kde nelze dodržet ustanovení příslušných bezpečnostních předpisů.

Vedoucí práce musí informovat osobou zodpovědnou za EZ o rozsahu prací. Osoby pracující pod napětím musí být na tuto práci školeny a jejich způsobilost musí být udržována. Před zahájením práce musí vedoucí práce seznámit osoby pracující, z čeho se práce sestává, jaká jsou bezpečnostní hlediska jaká je úloha každého z nich a jaké nářadí a výstroj budou použity. Povolení k zahájení práce smí dát pouze vedoucí práce. Úroveň dozoru musí odpovídat druhu a složitosti pracovní činnosti a/nebo napěťové hladině. Před ukončením práce musí vedoucí práce informovat osobu zodpovědnou za EZ požadovaným způsobem.

7.8.6 Příkaz „B“, „B-PPN“

V ČSN EN 50110-1 [11] je stanoven požadavek, že pro složité pracovní činnosti musí být provedena písemná příprava. Rozsah a vyhotovení písemné informace na provedení složité pracovní činnosti nebo zajištění pracoviště stanovuje osoba odpovědná za elektrické zařízení nebo jí pověřená osoba. Za písemnou přípravu při složité pracovní činnosti pro práce na EZ bez napětí, v blízkosti živých částí nebo pod napětím lze považovat příkaz „B“ resp. „B-PPN“, který byl používán pro tyto práce podle ČSN 343100, jejíž platnost skončila 31. 12. 2005. Příkaz „B“ nenahrazuje pracovní postup, který má být stanoven osobou odpovědnou za EZ nebo vedoucím práce. Příkaz „B“ je písemný doklad o nařízených technických a organizačních opatřeních sloužící k zajištění bezpečnosti osob při práci na elektrickém zařízení nebo v jeho blízkosti. Příkaz „B-PPN“ je písemný doklad o nařízených technických a organizačních opatřeních k zajištění bezpečnosti osob při pracích prováděných metodou prací pod napětím.

7.8.6.1 Podmínky a požadavky pro příkaz „B“

Příkaz „B“ se vydává v těchto případech:

- a) na zajištění a odjištění pracoviště pro práce bez napětí na zařízeních nad 1000 V AC a 1500 V DC;
- b) pro práce na zařízeních nad 1000 V AC a 1500 V DC na částech pod napětím nebo v blízkosti živých částí pod napětím tj. v zóně přiblížení;
- c) pro práce na zařízeních do 1000 V AC a 1500 V DC v případě, že je nebezpečí indukce od zařízení nad 1000 V AC (křížovanky vedení, souběhy atp.)
- d) pro práce na elektrických zařízeních do 1000 V AC a 1500 V DC, jsou-li ve společných prostorách se zařízením nad 1000 V AC a 1500 V DC a hrozí nebezpečí od těchto zařízení;
- e) pro práce na vypnutých a jinak nezajištěných zařízeních.

Od vydání příkazu „B“ je možno upustit v těchto případech:

- a) je-li nebezpečí z prodlení při poruchách v mimořádném provozním stavu, v případě ohrožení lidského života nebo nebezpečí vzniku velkých hospodářských škod;
- b) pro práce na elektrických zařízeních ve výstavbě, která ještě nebyla připojena na napětí a nenalézají se v blízkosti zařízení pod napětím;
- c) pro práce na elektrických zařízeních, mimo venkovních vedení, která jsou spolehlivě odpojena (například demontáží části zařízení) od všech možných zdrojů napájení. Takto odpojená zařízení musí svým zajištěním splňovat všechny podmínky bezpečné práce,
- d) pro práce na elektrických zařízeních, které se často opakují. Pro tyto práce musí být vydány přesné místní pracovní a bezpečnostní předpisy, z kterých musí být zřejmé, že nahrazují „Příkaz B“. Znalost těchto předpisů se kontroluje opakovanými zkouškami alespoň 1x za 3 roky.

Pověření k vydání příkazu „B“

Příkaz „B“ vydává a podepisuje osoba pověřená osobou odpovědnou za elektrické zařízení.

Osoby, na které může být příkaz „B“ vystaven:

- a) vedoucího práce nebo osobu provádějící zajištění nebo odjištění pracoviště,
- b) vedoucího práce pro činnost na zajištěném pracovišti,
- c) osobu provádějící dozor při pracích na EZ nebo v blízkosti živých částí pod napětím.

Jestliže by osoba, která je oprávněná vydávat příkaz „B“ musela pracovat na EZ sama, je povinna si příkaz „B“ vypsát sama na sebe před zahájením práce. Příkaz „B“ se vydává jen na jedno pracoviště a jednu pracovní skupinu.

Příkaz „B“ má obsahovat následující údaje:

- a) číslo příkazu;
- b) jméno a podpis osoby, které je určen;
- c) místo a druh a dobu práce a počet členů pracovní skupiny;
- d) jméno a podpis osoby příkaz vydávající;
- e) jména a podpisy osob, které provedou zajištění pracoviště;
- f) způsob zajištění pracoviště;
- g) označení nejbližšího místa, kde se nachází živé části;
- h) potvrzení všech členů pracovní skupiny vlastnoručními podpisy o provedeném poučení;
- i) údaje o případném přerušení a znovuzahájení práce a údaje o ukončení prací;
- j) další potřebné údaje pro zajištění bezpečné práce na elektrickém zařízení;

Příkaz „B“ se vydává ve dvou vyhotoveních (originál a kopie) souhlasného číslování. V příkazu „B“ je zakázáno jakékoliv vymazávání, opravování, přepisování, a škrtnání (s výjimkou volby z několika možností v předtištěném textu).

Doba platnosti příkazu „B“

Platnost příkazu „B“ začíná podpisem vedoucího zajišťování, když si ho přebírá před započítáním zajišťování pracoviště a končí jeho písemným uzavřením. Doba platnosti příkazu „B“ je stanovena na 24 hodin. Prodloužit jeho platnost na 14 po sobě jdoucích kalendářních dní lze, pokud jsou splněny tři podmínky:

- a) jedná se o práce dlouhodobého charakteru,
- b) zařízení je trvale vypnuto/odpojeno a zajištěno,
- c) vedoucí práce a způsob zajištění se po celou dobu trvání prací nemění (to znamená, že pokračování práce po přerušení řídí vedoucí práce, který ji přerušoval).

Příkaz „B“ pro práce na zajištěném pracovišti převezme vedoucí práce, který do něj potvrdí denní zahájení a ukončení prací. Pokud je práce dlouhotrvající, musí se vedoucí práce každý den před zahájením práce přesvědčit, zda nedošlo ke změně v zajištění a vymezení pracoviště a provede o tom záznam do příkazu „B“.

Předání příkazu „B“

Příkaz „B“ může být předán osobně, poslem, sdělen telefonicky nebo radiofonicky. Posel musí být osoba spolehlivá.

Uzavření příkazu „B“

Uzavření příkazu „B“ provede vedoucí práce po ukončení práce a kontrole pracoviště. Zařízení v provozuschopném stavu předá osobě, která zajišťovala pracoviště nebo je pověřena odjištěním pracoviště, a která zajistí uvedení EZ pod napětí.

7.8.6.2 Podmínky a požadavky pro příkaz „B-PPN“

Příkaz „B-PPN“ se vydává v těchto případech:

pro vybrané práce PPN na zařízeních nad 1000 V AC a 1500 V DC; pro tyto práce musí být stanoven zvláštní režim provozu (ZRP) v rozsahu podle potřeby a na dobu nezbytně nutnou. ZRP zajišťuje osoba odpovědná za EZ nebo jí pověřená osoba, která zároveň může ZRP zrušit a to na základě hlášení o ukončení práce vedoucím práce. ZRP zahrnuje nezbytná přechodná technická i personální opatření a zajištění spojení mezi pracovištěm PPN a příslušným řídícím pracovištěm.

Pověření k vydání příkazu „B-PPN“

Příkaz „B-PPN“ vydává a podepisuje osoba pověřená osobou odpovědnou za elektrické zařízení.

Osoby, na které se vystavuje příkaz „B-PPN“

Příkaz „B-PPN“ se vystavuje na vedoucího práce. Vedoucí práce a všechny zúčastněné osoby musí být řádně zacvičeny pro činnost PPN a vlastnoručními podpisy potvrdí seznámení se všemi bezpečnostními opatřeními.

Příkaz „B-PPN“ se vydává jen na jedno pracoviště a jednu pracovní skupinu.

Příkaz „B-PPN“ má obsahovat následující údaje:

- a) číslo příkazu;
- b) červený nápis „POZOR, PRÁCE POD NAPĚTÍM“;
- c) jméno a podpis osoby příkaz vydávající;
- d) jméno a podpis vedoucího práce;
- e) místo a druh a dobu práce;
- f) počet členů pracovní skupiny/zúčastněných osob;
- g) údaje o ZRP a atmosférických podmínkách;
- h) prohlášení všech zúčastněných osob o provedené instruktáži, o fyzické a psychické dispozici k provedení PPN;
- i) další bezpečnostní opatření, údaje o případném přerušení a znovuzahájení práce a údaje o ukončení prací.

Doba platnosti příkazu „B-PPN“

Doba platnosti příkazu „B-PPN“ je stanovena na 24 hodin.

Předání příkazu „B-PPN“

Příkaz „B-PPN“ se zásadně předává spolehlivými cestami a musí být včetně ZRP oboustranně potvrzena správnost předávaného textu.

Uzavření příkazu „B-PPN“

Uzavření příkazu „B-PPN“ provede vedoucí práce po ukončení PPN a po odstranění všech ochranných a pracovních pomůcek umístěných na EZ, po soustředění všech osob na určeném místě a po nahlášení ukončení řídicímu pracovišti, nebo osobě pověřené osobou odpovědnou za EZ.

Dokumentování příkazu „B-PPN“

Příkaz „B-PPN“ se vydává ve dvou vyhotoveních (originál a kopie) souhlasného číslování. V příkazu „B-PPN“ je zakázáno jakékoliv vymazávání, opravování, přepisování, a škrtnutí (s výjimkou volby z několika možností v předtištěném textu).

Vydané a uzavřené originály příkazů „B-PPN“ se všemi přílohami se musí uschovávat po dobu nejméně jednoho roku na místě určeném osobou odpovědnou na EZ.

7.9. Literatura

- [1] Vyhláška MPO 79/2010 Sb. o dispečerském řízení elektrizační soustavy a o předávání údajů pro dispečerské řízení
- [2] ČSN 34 1610:1993. Elektrický silnoproudý rozvod v průmyslových provozovnách
- [3] Pravidla provozování distribučních soustav [on-line]. 2011 [cit. 2011-11-1]. Dostupné z www.eru.cz
- [4] PNE 18 4310. Standardizované informační soubory dispečerských řídicích systémů
- [5] PNE 38 2530. Hromadné dálkové ovládání. Automatiky, vysílače a přijímače
- [6] Vyhláška MPO č. 80/2010 Sb. ze dne 18.3.2010 Sb. o stavu nouze v elektroenergetice a o obsahových náležitostech havarijního plánu
- [7] ČSN EN 50160 ed. 3: 2011. Charakteristiky napětí dodávané z veřejné distribuční sítě
- [8] Trojánek, Z. Řízení elektrizačních soustav. Praha: ČVUT, 1982, s. 306
- [9] Elcom [on-line]. 2009 [cit. 2011-6-13]. Dostupné z www.elcom.cz/aplikovana-elektronika/produkty/clanek/145-linkovy-kondicioner.html
- [10] Kaláb, P., Steinbauer, M., Veselý, M. Bezpečnost v elektrotechnice. Skriptum VUT v Brně, 2009, s. 72
- [11] ČSN EN 50110-1 ed.2:2005. Obsluha a práce na elektrických zařízeních
- [12] ČSN EN 50110-2 ed.2:2011. Obsluha a práce na elektrických zařízeních – Část 2: Národní dodatky
- [13] TNI 34 3100:2005. Obsluha a práce na elektrických zařízeních – Komentář k ČSN EN 50110-1 ed. 2: 2006
- [14] ČSN 33 1310 ed.2:2009. Bezpečnostní předpisy pro elektrická zařízení určená k užívání osobami bez elektrotechnické kvalifikace
- [15] Vyhláška 50/1978 Sb. o odborné způsobilosti v elektrotechnice

- [16] Meravý, J., Kocman, K. Elektrotechnická spôsobilosť pre elektrikárov. LIGHTNING-slужby elektro: Trenčín, 2007, druhé vydání, s. 309, ISBN 978-80-968509-3-8
- [17] Cipra, M., Kříž, M., Kůla, V. Elektrotechnická kvalifikace. Skriptum ČVUT v Praze, s. 157
- [18] PNE 33 0000-6: 2007. Obsluha a práce na elektrických zařízeních pro výrobu, přenos a distribuci elektrické energie

Doc. Ing. Petr Toman, Ph.D., doc. Ing. Jiří Drápela, Ph.D.,
doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D., doc. Ing. Jaroslava Orságová, Ph.D.,
Ing. Martin Paar, Ph.D., Ing. David Topolánek, Ph.D. a kolektiv

Provoz distribučních soustav

Vydalo České vysoké učení technické v Praze,

Zikova 1905/4, 166 36 Praha 6

Grafický návrh obálky: Michaela Kubátová Petrová

Vytiskl EUROPRINT, a.s., Pod Kotlářkou 3, 150 00 Praha 5

Počet stran 264

Vydání první. Praha 2011

ISBN 978-80-01-04935-8