

# Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav

Josef Tlustý | Jan Kyncl | Ladislav Musil | Jan Špetlík |  
Jan Švec | Petr Hamouz | Miroslav Müller | Zdeněk Müller





# Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav

Josef Tlustý

Jan Kyncl

Ladislav Musil

Jan Špetlík

Jan Švec

Petr Hamouz

Zdeněk Müller

Miroslav Müller



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



Recenzent: prof. Ing. Viktor Valouch, CSc.

© Josef Tlustý, Jan Kyncl, Ladislav Musil, Jan Špetlík, Jan Švec,  
Petr Hamouz, Zdeněk Müller, Miroslav Müller, 2011

ISBN 978-80-01-04940-2

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

|           |                                                         |           |
|-----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1.</b> | <b>Současné a budoucí trendy v ES .....</b>             | <b>9</b>  |
| 1.1.      | Elektroenergetické systémy .....                        | 9         |
| 1.2.      | Kritéria přenosu elektrické energie.....                | 10        |
| 1.3.      | Regulační opatření .....                                | 11        |
| 1.4.      | Současné problémy elektrizačních soustav .....          | 13        |
| 1.5.      | Výzvy do budoucna .....                                 | 14        |
| <b>2.</b> | <b>Teorie řízení výkonových toků v soustavách.....</b>  | <b>16</b> |
| 2.1.      | Výkonové toky na vedení .....                           | 16        |
| 2.1.1.    | Vliv odporu přenosové linky .....                       | 19        |
| 2.2.      | Principy řízení výkonových toků .....                   | 21        |
| 2.2.1.    | Paralelní pasivní prvek .....                           | 22        |
| 2.2.2.    | Sériový pasivní prvek .....                             | 23        |
| 2.2.3.    | Paralelní vstřikování proudu .....                      | 24        |
| 2.2.4.    | Sériové vstřikování napětí.....                         | 24        |
| 2.3.      | Možnosti regulačních prostředků .....                   | 25        |
| 2.3.1.    | Řízení jalového výkonu .....                            | 26        |
| 2.3.2.    | Řízení činného výkonu .....                             | 27        |
| 2.4.      | Charakteristiky kompenzačních prostředků .....          | 28        |
| 2.4.1.    | Paralelní regulace napětí .....                         | 28        |
| 2.4.2.    | Sériová kapacitní kompenzace .....                      | 29        |
| 2.4.3.    | Statická synchronní sériová kompenzace.....             | 31        |
| 2.5.      | Vliv výkonových toků na napěťovou úroveň.....           | 33        |
| 2.6.      | Literatura .....                                        | 39        |
| <b>3.</b> | <b>Zařízení FACTS.....</b>                              | <b>40</b> |
| 3.1.      | BSC, BSR.....                                           | 41        |
| 3.2.      | TCSC.....                                               | 41        |
| 3.3.      | SVC .....                                               | 43        |
| 3.4.      | SSSC.....                                               | 45        |
| 3.5.      | STATCOM.....                                            | 47        |
| 3.6.      | UPFC.....                                               | 50        |
| 3.6.1.    | Provozní režimy UPFC a řízení výkonů .....              | 51        |
| 3.7.      | Transformátor s regulací napětí a fáze (PST, PAR) ..... | 55        |
| 3.8.      | HVDC .....                                              | 59        |
| 3.9.      | Literatura .....                                        | 60        |
| <b>4.</b> | <b>Prvky a měniče výkonové elektroniky .....</b>        | <b>61</b> |
| 4.1.      | Výkonové polovodičové součástky .....                   | 61        |
| 4.2.      | Tyristorový měnič .....                                 | 62        |
| 4.2.1.    | V-A charakteristika paralelní kompenzace.....           | 69        |
| 4.2.2.    | Admitanční modely.....                                  | 70        |
| 4.3.      | VSC .....                                               | 74        |
| 4.3.1.    | Jednofázový poloviční můstek .....                      | 74        |
| 4.3.2.    | Jednofázový úplný můstek.....                           | 76        |
| 4.3.3.    | Trojfázový šestipulzní měnič .....                      | 80        |
| 4.3.4.    | Pulzně šířková modulace .....                           | 83        |

|           |                                                |            |
|-----------|------------------------------------------------|------------|
| 4.3.5.    | Dimenzování měničů.....                        | 85         |
| 4.3.6.    | Víceúrovňové měniče.....                       | 85         |
| 4.4.      | Literatura .....                               | 89         |
| <b>5.</b> | <b>Vodiče pro venkovní vedení.....</b>         | <b>90</b>  |
| 5.1.      | Druhy vodičů .....                             | 91         |
| 5.1.1.    | Materiály používané ve vodičích .....          | 91         |
| 5.1.2.    | Klasické vodiče .....                          | 91         |
| 5.1.3.    | Celohliníkové vodiče .....                     | 92         |
| 5.1.4.    | Vodiče ze zesílené hliníkové slitiny .....     | 92         |
| 5.2.      | Tvar vodičů .....                              | 92         |
| 5.2.1.    | Lana Z-Formed.....                             | 93         |
| 5.2.2.    | Segmentová lana .....                          | 94         |
| 5.2.3.    | Válcovaná lana.....                            | 95         |
| 5.3.      | Speciální vodiče .....                         | 95         |
| 5.3.1.    | Vysokoteplotní vodiče .....                    | 95         |
| 5.3.2.    | Vodiče s optickými vlákny .....                | 99         |
| 5.3.3.    | Další vodiče.....                              | 101        |
| 5.4.      | Systém značení vodičů .....                    | 101        |
| 5.4.1.    | Specifikace a schéma konstrukce lana .....     | 102        |
| 5.5.      | Literatura .....                               | 103        |
| <b>6.</b> | <b>Ampacita linek venkovních vedení .....</b>  | <b>105</b> |
| 6.1.      | Tepelné modely venkovního vedení .....         | 105        |
| 6.1.1.    | Diferenciální rovnice pro teplotu vodiče ..... | 106        |
| 6.1.2.    | Ustálený stav.....                             | 107        |
| 6.1.3.    | Dynamické stavy .....                          | 112        |
| 6.1.4.    | Přechodné děje .....                           | 114        |
| 6.2.      | Vliv parametrů na změnu ampacity.....          | 115        |
| 6.2.1.    | Změna teploty okolí.....                       | 116        |
| 6.2.2.    | Změna rychlosti větru.....                     | 116        |
| 6.2.3.    | Změna úhlu větru .....                         | 117        |
| 6.2.4.    | Změna intenzity slunečního záření .....        | 118        |
| 6.2.5.    | Změna součinitele emisivity .....              | 119        |
| 6.2.6.    | Změna nadmořské výšky .....                    | 120        |
| 6.3.      | Proudové zatížení venkovních vedení .....      | 120        |
| 6.3.1.    | Dimenzování a normativní požadavky .....       | 123        |
| 6.4.      | Literatura .....                               | 125        |
| <b>7.</b> | <b>Mechanika vodiče venkovního vedení.....</b> | <b>126</b> |
| 7.1.      | Vodorovné pole .....                           | 126        |
| 7.1.1.    | Průhyb řetězovky .....                         | 131        |
| 7.1.2.    | Délka vodorovného pole .....                   | 132        |
| 7.2.      | Šikmé pole.....                                | 132        |
| 7.2.1.    | Určení délky vodiče při šikmém poli.....       | 135        |
| 7.2.2.    | Průhyby šikmého pole.....                      | 137        |
| 7.3.      | Namáhání vodiče .....                          | 138        |
| 7.4.      | Odvození stavové rovnice.....                  | 141        |
| 7.5.      | Nesymetrické stavy venkovních vedení.....      | 143        |
| 7.6.      | Dynamika zavěšeného vodiče .....               | 147        |

|            |                                                                                             |            |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.7.       | Literatura .....                                                                            | 149        |
| <b>8.</b>  | <b>Environmentální vlivy venkovních vedení.....</b>                                         | <b>150</b> |
| 8.1.       | Vliv elektromagnetického pole generovaného venkovními vedeními vvn na okolní prostředí..... | 150        |
| 8.2.       | Výpočet elektrického pole v blízkosti vedení vvn.....                                       | 153        |
| 8.3.       | Výpočet magnetického pole v blízkosti vedení vvn.....                                       | 158        |
| 8.4.       | Možnosti ovlivnění elektrického a magnetického pole v blízkosti vedení vvn.....             | 162        |
| 8.5.       | Literatura .....                                                                            | 165        |
| <b>9.</b>  | <b>Elektrické ochrany .....</b>                                                             | <b>166</b> |
| 9.1.       | Poruchy v elektrických rozvodných systémech.....                                            | 166        |
| 9.1.1.     | Druhy zkratových proudů .....                                                               | 166        |
| 9.1.2.     | Podmínky výpočtů zkratových proudů .....                                                    | 168        |
| 9.1.3.     | Poruchy na generátoru.....                                                                  | 169        |
| 9.2.       | Odolnost elektrických zařízení .....                                                        | 169        |
| 9.2.1.     | Odolnost zařízení s ohledem na tepelné účinky zkratových proudů a nadproudů .....           | 170        |
| 9.2.2.     | Odolnost zařízení s ohledem na dynamické účinky zkratových proudů .....                     | 175        |
| 9.2.3.     | Napěťová odolnost zařízení .....                                                            | 179        |
| 9.2.4.     | Zkratová odolnost uzemnění s ohledem na nebezpečné dotykové napětí .....                    | 180        |
| 9.3.       | Ochrany zařízení elektrických provozů .....                                                 | 184        |
| 9.3.1.     | Stavová reprezentace chránění .....                                                         | 184        |
| 9.3.2.     | Základní požadavky na ochrany .....                                                         | 185        |
| 9.3.3.     | Měřicí zařízení pro ochrany.....                                                            | 187        |
| 9.3.4.     | Přehled ochran a principy chránění .....                                                    | 197        |
| 9.3.5.     | Koncepce chránění elektrárenského bloku.....                                                | 220        |
| 9.3.6.     | Komunikace ochran.....                                                                      | 225        |
| 9.4.       | Literatura .....                                                                            | 228        |
| <b>10.</b> | <b>Distanční ochrany .....</b>                                                              | <b>229</b> |
| 10.1.      | Základní princip distančních ochran.....                                                    | 229        |
| 10.2.      | Doba vybavení ochrany.....                                                                  | 230        |
| 10.3.      | Charakteristika distanční ochrany .....                                                     | 232        |
| 10.3.1.    | Charakteristika analogových ochran .....                                                    | 234        |
| 10.3.2.    | Charakteristika digitálních ochran .....                                                    | 235        |
| 10.4.      | Specifické vlivy .....                                                                      | 236        |
| 10.4.1.    | Boční napájení .....                                                                        | 236        |
| 10.4.2.    | T-odbočky.....                                                                              | 240        |
| 10.4.3.    | Impedanční nesymetrie přenosových a distribučních sítí .....                                | 240        |
| 10.4.4.    | Paralelní vlivy .....                                                                       | 243        |
| 10.4.5.    | Vliv odporu poruchy.....                                                                    | 247        |
| 10.5.      | Nové směry lokalizace poruch .....                                                          | 251        |
| 10.5.1.    | Princip užití H parametrů, příklad pro jednofázové vedení .....                             | 251        |
| 10.5.2.    | Zobecnění užití H parametrů pro vícenásobná vedení .....                                    | 255        |
| 10.6.      | Literatura .....                                                                            | 255        |





# 1. Současné a budoucí trendy v ES

## 1.1. Elektroenergetické systémy

Rostoucí poptávka po elektrické energii, otevření trhu s elektrickou energií, integrace nových zdrojů do elektrizačních soustav a nutnost respektovat životní prostředí mají často za následek, že stávající linky přenosových soustav jsou provozovány a zatěžovány blízko svých tepelných, elektrických či mechanických limitů a občas i za hranicemi svých přenosových schopností. Obchod s elektrickou energií na otevřeném trhu a požadavky dodavatelů a zákazníků často nerespektují fyzikální zákony pro toky elektřiny. Jedním z typických příkladů jsou tzv. kruhové toky výkonů mezi jednotlivými částmi rozsáhlých soustav nebo dokonce mezi soustavami několika států, které vznikají rozdílnou přenosovou schopností očekávaných tras. Tato skutečnost může vyvolat nadměrné zatížení mezinárodních propojení či klíčových vnitrostátních profilů, a omezit tak jejich disponibilní přenosovou kapacitu určenou pro jiné využití. Situaci rovněž komplikuje okolnost, že se mnoho výrobních kapacit nalézá poměrně daleko od míst největší spotřeby elektrické energie.

Rostoucí požadavky na přenosy výkonů by měl doprovázet proces výstavby nových přenosových tras, případně zvýšení přenosových schopností tras stávajících na základě obnovy či náhrady prvků jednotlivých soustav, což by přispělo k zachování přijatelné úrovně spolehlivosti dodávky elektrické energie i zajištění přenosové kapacity potřebné při nárůstu zatížení. Mezi soustavami i uvnitř nich existuje řada tzv. úzkých míst, kde za nejrůznějších podmínek bývá dosahováno limitů přenosové schopnosti. Vlivem postupného nárůstu zatížení a nedostatečných investic do zmíněných soustav se počet úzkých míst může postupně zvyšovat. V Evropě je řada úzkých míst trvalých (Francie - Španělsko, Itálie - sousední země, střední Evropa - jihovýchod Evropy). Některá však mají pouze sezónní charakter, daný např. nevyrovnanou produkcí energie z vodních nebo větrných elektráren v určitých zemích (Norsko - Švédsko, Dánsko - Německo, severovýchod - jihovýchod Německa, sever - jih Rakouska).

Spolehlivým řešením řady problémů v přenosových a distribučních soustavách by byla výstavba nových vedení, která je však velmi obtížná, někde téměř nemožná, a to z důvodů ekologických, vlastnických či politických. Výstavba nových linek obvykle nedokáže držet krok s rostoucím výkonem elektráren i poptávkou po elektrické energii. Pro ekonomický, spolehlivý a bezpečný provoz stávajících sítí je nezbytné zavádět nové technologie a principy řízení do elektrizačních soustav. Potřeba inovativních mechanismů postupně narůstá. Řešením mohou být nejrůznější metody, postupy, strategie a technologie pro řízení výkonových toků v soustavách. Tyto strategie musí zachovat nezbytnou úroveň spolehlivosti dodávek i při výpadku velkých zdrojů, přenosových linek, či při velkých změnách v systémovém zatížení.

Se spolehlivou dodávkou elektrické energie konečným spotřebitelům souvisí i problematika kvality elektrické energie. Pro zajištění kvality dodávek elektrické energie je v první řadě nezbytné zajistit spolehlivý a pokud možno bezchybný chod přenosových a distribučních soustav. Vzhledem k trvalým trendům zvyšování spotřeby elektrické energie, k ochraně životního prostředí, k volnému trhu s elektřinou a při omezených možnostech investic do přenosových a distribučních systémů nabý-

vá zajištění pohotového a flexibilního řízení toků činného výkonu a napětí v soustavách na důležitosti.

## 1.2. Kritéria přenosu elektrické energie

Při analýze chování přenosového systému, jeho součástí a při hodnocení provozních stavů je třeba respektovat základní kritéria, která mohou omezit přenos výkonových toků:

*Teplotní kritéria*, která hlídají dlouhodobou či momentální teplotu vodičů a jsou svázána s teplotními limity pro dané provozní stavy. Obvykle souvisejí s dlouhodobým nadměrným zatížením linek, náhlou změnu v konfiguraci systému po výpadcích nebo při poruchách a mohou být dodržena rekonfigurací systému nebo aktivací zařízení pro kontrolu výkonových toků. Teplotní hlediska bývají omezující u kabelů, krátkých vedení nebo obecně při nepříznivých tepelných poměrech okolního prostředí. U dlouhých vedení se naopak spíše uplatňují hlediska stability a úbytků napětí.

*Kritéria řízení napětí a jalového výkonu*, jež souvisejí s požadavkem udržovat napětí v úzkých předepsaných mezích. Podpětí může zhoršit funkci některých spotřebičů, přepětí pak může být nebezpečné z důvodu přeskoků, průrazu izolačních systémů nebo saturace transformátorů. V ustálených chodech může být limitujícím faktorem zejména nízké napětí při velkém zatížení, což je možné korigovat zejména kompenzací jalového výkonu a tedy změnou účinníku spotřeby. Naopak vysoké napětí u málo zatížených vedení (či naprázdno) lze kromě regulace odbočkami transformátoru omezit připínáním paralelních tlumivek. Úroveň napětí je obvykle velmi citlivá na toky jalového výkonu, proto je jeho kompenzace jedním z klíčových procesů v soustavách. Systémově ji lze rozdělit na kompenzaci v generátorech, zátěží a kompenzaci přenosového systému.

*Kritéria toků výkonu* se týkají zejména řízení činného výkonu v soustavách za účelem vyššího a rovnoměrnějšího využití prvků přenosových soustav, minimalizace ztrát či tvorby dostatečných rezerv přenosových cest. Překračování limitů výkonových toků lze odstranit vybudováním nových přenosových kapacit či výrobních jednotek. Řešením může být také instalace přídavných zařízení v sítích.

*Kritéria stability a dynamických jevů*, která souvisejí s dynamickým chováním systému. Dynamická stabilita popisuje schopnost systému úspěšně přecházet mezi rozdílnými stabilními pracovními body a může být zlepšena změnou konfigurace nebo uzlových výkonů v klíčových bodech systému. S rostoucím zatížením nabývá na důležitosti také napěťová stabilita, kterou lze optimalizovat úpravou napětí pomocí hladinové regulace transformátorů, podpůrnými zařízeními v uzlech systému či v krajním případě odpínáním zátěže.

Všechna kritéria lze teoreticky sjednotit pod jediný požadavek zachování *kvality dodávky elektrické energie*. Toto široké kritérium nelze jednoznačně kvantifikovat, protože v sobě obsahuje řadu veličin (od kvality napěťové sinusovky v uzlech přes přípustná pásma frekvence, výkonů či teploty až po spolehlivostní veličiny, které určují schopnost soustavy přenést elektrickou energii až ke konečnému spotřebiteli).

## 1.3. Regulační opatření

Existuje mnoho případů a situací, kdy musejí být některé prvky a části elektrizační soustavy řízeny, aby zůstal zachován bezpečný a spolehlivý chod soustavy jako celku. Důvodem k regulačnímu zásahu může být dosažení či překročení limitů podle některého z uvedených kritérií, náhlá nerovnováha bilanci výkonů nebo též plánovaná změna v konfiguraci systému. Realizovaná opatření se v zásadě mohou dotýkat strany výroby, strany spotřeby či změn v přenosových linkách.

### Řízení na straně výroby

Jestliže v soustavě dojde k náhlé výkonové nerovnováze mezi výrobou a spotřebou, je nutné, aby dodávaný činný výkon z elektráren byl změněn v příslušném rozsahu za účelem návratu frekvence na svoji jmenovitou hodnotu v daném časovém horizontu buď automaticky, nebo na popud operátora soustavy. K realizaci řízení činného výkonu a frekvence slouží systém primárních, sekundárních, terciárních a dalších regulací v elektrárnách. Ty jsou provozovány v systému podpůrných služeb, jež většinou poskytují výrobci a využívá je provozovatel přenosové soustavy, kterému slouží k zajištění jeho systémových služeb a naplnění povinnosti zajistit bezpečný a spolehlivý chod elektrizační soustavy. Obdobně jsou poskytovány služby související s regulací jalového výkonu a napětí, ty však mají lokální charakter a slouží k udržení napětí v uzlech systému v předepsaných mezích.

### Stav nouze

Při mimořádných stavech, živelných pohromách či jiných nouzových podmínkách může být v soustavě vyhlášen tzv. stav nouze. Dochází při něm k určité změně pravomocí, kdy provozovatelé přenosové a distribučních soustav mohou dát pokyn k omezení či odstavení výroby i části spotřeby v dané části soustavy. Tyto postupy jsou dány tzv. regulačním a vypínacím plánem. Všechny subjekty musí uposlechnout příslušných pokynů operátora, které mohou rovněž omezit vliv obchodních smluv na dodávku elektrické energie. Nouzové zásahy mohou zabránit nepřiměřené změně frekvence v soustavě (jež by mohla vést až rozsáhlým výpadkům dodávek blackoutům) a zastavit nadměrné nebo dlouhodobé proudové přetěžování klíčových linek soustavy (což by vedlo k jejich vypnutí a přenesení problému na další prvky soustavy). Jde o vyhlášení tzv. regulačních stupňů, které začínají striktním dodržováním sjednaných odběrových diagramů a končí snížením spotřeby až o stovky MW do několika hodin a po dobu, kdy příslušný regulační stupeň trvá.

### Řízení v přenosové soustavě

Také přímo v přenosové soustavě jsou zařízení, která umožňují řízení na linkách a v rozvodnách. Jsou to buď zařízení již dlouhodobě instalovaná za účelem zlepšit provozní parametry, nebo jde o zařízení moderní, jejichž přímý cíl je umožnit plynulé a rychlé řízení napětí a výkonů v soustavě. Nejrozšířenějšími jsou pasivní prvky s konstantními nebo skokově měnitelnými parametry, např. sériové kondenzátory pro kompenzaci reaktance vedení u dlouhých linek, sériové reaktory pro omezení zkratových proudů, paralelní tlumivky pro řízení napětí nebo paralelní kondenzátory pro kompenzaci jalového výkonu a řízení napětí. Další možností jsou transformátory s regulací fáze, které umožňují měnit fázi výstupního napětí a tím

řídít toky výkonů v soustavě. Současným trendem je rozšiřování prvků a měničů využívajících výkonovou elektroniku, jejichž pomocí lze dosáhnout velkou variabilitu, rychlost i plynulost řízení. K jejich rozmachu přispěl vývoj elektronických součástí schopných pracovat s napětím v řádu kV a s výkony v řádu MVA.

## Řízení strany spotřeby

Pomineme-li možnosti řízení odběru činného výkonu u spotřebitelů při stavu nouze, je hlavním prostředkem realizovaným na této straně regulace jalového výkonu. Jeho změna, resp. instalace a řízení reaktančních prvků, slouží ke kompenzaci zátěže ve třech základních kritériích: 1. kompenzace účinníku, 2. regulace napětí, 3. symetrizace. Kompenzace účinníku souvisí zejména s lokální potřebou jalového výkonu u specifických typů zátěží, který je efektivnější produkovat na místě, než přenášet po síti, kde omezuje přenosovou kapacitu a vyvolává přídatné činné ztráty. Napětí je obvykle řízeno v klíčových uzlech soustavy, vzhledem k silnému vlivu jalového výkonu na napětí však požadavky na jeho regulaci u spotřebitelů (limity pro účinník) ovlivňují nejen zatěžování sítě, ale i napěťovou úroveň. Nesymetrickým zatížením vznikají v soustavě zpětná a netočivá složka proudu, které způsobují přídatné ztráty ve strojích, mechanické oscilace, nesprávné funkce zařízení apod.

## Řízení propustnosti sítě

Klasické řízení propustnosti sítě (Congestion Management) zahrnuje činnosti, které provádí provozovatel PS v souladu s energetickým zákonem ve vymezených případech, kdy hrozí přetížení nebo je vyčerpána přenosová schopnost vedení či přenosového profilu a je nutné změnit nasazení výrobních jednotek, aby nastalo odlehčení profilu a soustava se vrátila do normálního stavu. Kromě těchto online zásahů jsou prováděny rovněž zásahy preventivní, které mají za cíl předejít vzniku nebezpečných situací a výpadků, nazývají se *redispečink* a *protiobchod*.

Při interním redispečinku jsou využívány pouze zdroje uvnitř soustavy a je nutné dodržet saldo regulační oblasti. Dojde-li tedy ke zvýšení výkonu v jednom uzlu, musí se v jiném uzlu stejný výkon snížit. Při mezinárodním redispečinku jsou využívány zdroje v obou sousedních soustavách dotčeného přeshraničního přenosového profilu, také zde je nutno dodržet celkové saldo obou oblastí. Při protiobchodu jsou rovněž využity zdroje na obou stranách dotčeného profilu, ale není nutné dodržet plánované saldo obou oblastí. Efektivnost těchto zásahů je však závislá na hustotě sítě a na paralelních cestách, přes které výkon může protékat díky hustému zasmýčkování. To lze pro danou situaci v sítích kvantifikovat citlivostním koeficientem, který stanoví, jak se změní zatížení vedení při opačných změnách výkonů ve dvou uzlech.

Dojde-li k výpadku nějakého zařízení a ke vzniku hrozby přetížení jiných prvků sítě, provádí dispečer PS tzv. korekční opatření, kterými kromě výše uvedených může být i tzv. *rekonfigurace*, tedy změna zapojení sítě. Jedná se např. o změnu stavu spínače přípojnic, což může vést k efektivní změně impedance na dotčeném profilu, a tím i změně toku výkonu. Je však třeba respektovat skutečnost, že rekonfigurací dojde k přerozdělení výkonových toků, tj. k jejich přesunu do částí sítě, které byly doposud méně zatížené. Proto je nutné znát vliv opatření na jiná vedení, aby nedošlo k jejich přetížení.

## 1.4. Současné problémy elektrizačních soustav

Současné celosvětové trendy v elektroenergetickém odvětví neustále směřují k postupnému nárůstu výroby a spotřeby elektrické energie, což vzhledem k velké setrvačnosti výrobní základny, založené stále zejména na menším množství výrobních jednotek velkých výkonů, vede k postupnému zvyšování přenosů elektrické energie z míst výroby do oblastí spotřeby. Naopak standardní způsoby posilování elektrizačních sítí výstavbou nových vedení a rozveden naráží často na legislativní překážky týkající se územních rozhodnutí či ekologických aspektů. Kombinací těchto vlivů dochází k vysokému zatěžování prvků zejména přenosových soustav a relativně často i k přetěžování vedení, které může vyvolat problémy různé závažnosti, od dočasného nadměrného průhybu vodičů až po kaskádovité vypínání linek vedoucích k velkým výpadkům v soustavách.

Historicky vzniklé propojování a spolupráce elektrizačních soustav (např. Union for the Coordination of Transmission of Electricity - UCTE, ETSO, ATSOI, UKTSOA, NORDEL, BALTSO (v současné době The European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E) obecně vedou k technickým výhodám a umožnily i rozvoj mezinárodního volného trhu s elektrickou energií. Nicméně právě podmínky volného trhu způsobují v některých regionech stavy ne vždy příznivé pro provozovatele soustav. Jedním z důsledků jsou rozdíly mezi fyzikálními a obchodními toky elektrické energie, které mohou vyvolat neočekávaná lokální přetížení prvků soustav, neboť obchod s elektrickou energií bývá omezen pouze výrobními a spotřebními kapacitami a často nerespektuje přenosové možnosti sítí. V této souvislosti se v mezinárodním měřítku vyskytují tranzitní toky výkonů, které zabírají část přenosové kapacity vnitrostátních vedení, aniž by daná soustava tyto toky vyvolala ze strany své výroby nebo spotřeby. Specifickou problematikou jsou pak úzká místa v sítích, kde díky těmto tranzitům dochází k překračování přenosových schopností a je třeba toto řešit technicky či legislativně. Často diskutované jsou přeshraniční profily, které propojují národní přenosové soustavy, jejichž původní dimenzování předpokládalo spíše vzájemnou technickou výpomoc soustav, nikoliv mezinárodním volný trh (tento stav se mění jen velmi pomalu).

Velmi aktuální a stále více diskutované téma je velký rozmach obnovitelných zdrojů elektrické energie (OZE) a jejich připojování do distribučních a přenosových soustav. Hlavním diskutovaným zdrojem jsou v této oblasti větrné elektrárny, které vykazují značnou proměnlivost vyráběného výkonu (proměnlivá velikost změn i časová nestálost), jejichž celkový instalovaný výkon dramaticky zvyšuje. V samotné soustavě ENTSO-E je v současnosti instalováno cca 90 000 MW VTE a v několika následujících letech by tato hodnota měla dosáhnout až cca 300 000 MW, čímž jsou VTE nejrychleji se rozvíjejícím zdrojem elektrické energie. O něco příznivější je situace u fotovoltaických elektráren, jejichž proměnlivost je o něco nižší a vázána na denní cyklus. Souběžně s nárůstem celkového výkonu těchto typů OZE roste také instalovaný výkon jednotlivých farem VTE připojených do elektrizačních soustav v jednom bodě, čímž tyto zdroje přestávají v soustavách hrát roli tzv. rozptýlených zdrojů a naopak vznikají zdroje velkých výkonů, ovšem s nestabilní a hůře predikovatelnou výrobou. Tím dochází ke značné proměnlivosti velikostí a často i směrů výkonových toků v soustavách, které ještě dále ztěžují možnost řízení nejen prvků soustav s ohledem na jejich možné přetížení, ale také řízení soustav jako celků.

Všechny zmíněné vlivy mohou vést ke vzniku problematických situací v provozu elektrizačních soustav, zvláště když se přidají klimaticky extrémní stavy. Těmi mohou být zejména horké letní dny, kdy bývá složité udržet rovnováhu mezi výrobou a spotřebou elektrické energie (nižší výroba v kondenzačních elektrárnách z důvodů omezeného chlazení), objevují se velké průhyby vodičů a hrozí jejich kontakt s vegetací, plánované opravy a revize vedou k provozu sítí v neúplných konfiguracích, často se objevuje malá výroba z obnovitelných zdrojů energie (větrných a vodních). Významný vliv mohou mít také bouře, vichřice, sněh nebo námraza. Celkový dopad je takový, že v současné době dochází k výskytu řady velmi rozsáhlých poruch elektrizačních soustav vyvolaných přírodními vlivy či napjatými poměry v soustavách, které ve svém důsledku vedou až k dlouhotrvajícím výpadkům zásobování velkých územních celků elektrickou energií.

Problematické situace v provozu elektrizačních soustav mohou být zesíleny ústupem některých zemí od jaderné energetiky. Jaderné elektrárny obvykle pracují v základním zatížení a tvoří jeden ze základních opěrných pilířů pro stabilitu provozu elektrizačních soustav. Má-li být výroba elektřiny z těchto zdrojů nahrazena výrobou ze zdrojů obnovitelných, je nezbytné podstatně změnit strukturu elektrizačních soustav. Kromě obvyklých tepelných zdrojů, dnes především rozvíjejících se paroplynových cyklů, musí nastoupit nové technologie: skladování elektrické energie ve velkém měřítku, vodíkové hospodářství, palivové články, elektromobilita apod. Dále je potřeba změnit legislativní rámec pro rezervní výkon, vybudovat evropskou supersíť, pravděpodobně stejnosměrnou (HVDC), změnit systém řízení a aplikovat do systému moderní prvky na bázi FACTS.

## 1.5. Výzvy do budoucna

Všechny uvedené problémy je třeba řešit, lokálně i mezinárodně, technicky, ekonomicky i legislativně. Především z analýzy velkých poruch jasně vyplývá nutnost výzkumu a návrhů komplexních řešení v této oblasti, neboť jejich dopady jsou velmi závažné ekonomicky i sociálně. V současných podmínkách liberalizovaného trhu s elektrickou energií však neexistuje jednotná a obecně přijímaná strategie, jak takto závažným stavům předcházet. Nedořešen zůstává rovněž okruh problémů, které se pojí s rozvojem, spolehlivostí a bezpečností elektroenergetického systému.

Oblast neplánovaných tranzitů a výroby z obnovitelných zdrojů energie i přetěžování prvků elektrizačních soustav lze celkem úspěšně řešit v rámci národní elektrizační soustavy, ovšem na mezinárodní úrovni je vhodné se v budoucnu zaměřit na nové definování podmínek mezinárodní spolupráce, které by výrazně omezily možnosti vzniku dalších problematických stavů v elektrizačních soustavách. Z technického hlediska se jako perspektivní jeví slučování několika národních soustav do jednotně řízených celků se společnou výkonovou bilancí a vnitřně kontrolovatelnými toky výkonů. Toto je vhodné tam, kde fyzikální a technické podmínky propojení soustav takový přístup umožňují. Dále lze očekávat, že do obchodních pravidel bude začleněno více technických kritérií, že dojde k výraznějšímu napojení obnovitelných a rozptýlených zdrojů elektrické energie na řídicí centra včetně možnosti omezovat jejich výrobu a že bude možno řídit jejich nasazení podle požadavků diagramů zatížení i možnosti zařazení do mechanismů podpůrných a systémových služeb.

V budoucnu bude stále více kladen důraz na zvyšování bezpečnosti a spolehlivosti celého elektroenergetického systému, což bude mít dopad i na technické aspekty elektrizačních soustav. Lze očekávat snahy optimalizovat rozvoj elektrizačních soustav tak, aby byla posílena úzká místa v soustavách, vyvinuty metody přípravy provozu elektrizačních soustav a řízení v reálném čase, které bude schopné reagovat na vnitrodenní trhy s elektrickou energií i momentální výrobu z obnovitelných zdrojů energie, či co nejlépe využívat přenosové cesty a zvyšovat jejich kapacity.

Současné trendy naznačují možnosti budoucího vývoje. Jednou z perspektivních možností navýšení přenosových schopností zejména venkovních vedení a efektivnějšího využití stávajících prvků elektrizačních soustav, aniž by byl nutný rychlý rozvoj a posilování, je využití klimaticky závislého řízení zatížitelnosti na základě okolních podmínek. V závislosti na okolním prostředí (teplotě okolí, větru, slunečního záření) je pak možné ve specifických časových intervalech měnit horní mez zatížení každého individuálního prvku elektrizačních soustav a získat tak možnost překonat běžné i mimořádné stavy v elektrizačních soustavách bez potřeby jiných regulačních zásahů či nutnosti vypínání prvků, které může v kritických případech vést až ke kaskádovitému rozpadu sítě. Nejambicióznějším cílem je dosáhnout online řízení a kontroly zatížitelnosti všech prvků soustavy, což umožní mít aktuální přehled nad možnostmi prvků elektrizačních soustav v každém okamžiku. S tímto systémem pak bude možné dosáhnout mezních schopností soustavy zejména v mimořádných stavech, a to bez ohledu na aktuální okolní podmínky, čímž se oproti dnešním neměnným mezím zvýší flexibilita systému a v kritických situacích, které by dnešní přístupy plně nezvládly, dojde ke zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti dodávek elektrické energie.

Dalším vysoce aktuálním trendem je stále vyšší zapojování prvků výkonové elektroniky do všech úrovní elektrizačních soustav. Tyto prvky provozované buď ve standardních střídavých sítích (zařízení FACTS), nebo pracující se stejnosměrným napětím (HVDC) jsou v soustavách instalovány již řadu let a přinášejí řadu výhod zejména do oblasti kvality elektrické energie, řízení napětí či přenosu na velké vzdálenosti. Nedávný významný pokrok v oblasti součástek výkonové elektroniky (např. ve výkonech, napěťových limitech a přesnosti) však umožnil rozvoj nových typů těchto zařízení s vyšší flexibilitou provozu, rychlostí působení i širšími možnostmi použití. V současné době se tak začíná objevovat větší množství projektů, jak tyto nové systémy využívat v elektrizačních soustavách. Výzkum se rovněž zaměřuje na nová zařízení FACTS a nové aplikace reagující na potřeby soustav. Tato zařízení se prosazují i v přenosových soustavách zejména v aplikacích připojování velkého množství obnovitelných zdrojů energie v elektroenergetických systémech, propojování soustav podmořskými kabely, přenos výkonů na větší vzdálenosti, řízení výkonových toků na mezistátních profilech, řízení výkonů v zatížených oblastech národních soustav atd. Další instalace těchto prvků do soustav, jejich vhodné řízení a zapojení do dispečerských systémů povede k maximalizaci kvality, spolehlivosti a bezpečnosti elektroenergetického systému.

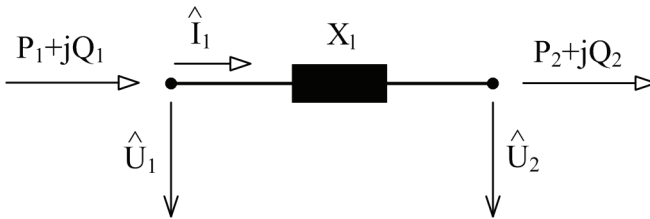
Moderní technické prostředky usnadní flexibilní provoz soustav při respektování podmínek volného trhu s elektrickou energií, a to především ve stavech nuceného zvládnutí mimořádných a silných výkonových toků, které vytváří přenos elektrické energie od zdrojů ke spotřebě.



## 2. Teorie řízení výkonových toků v soustavách

### 2.1. Výkonové toky na vedení

Výkonové toky na linkách elektrizační soustavy mohou být ovlivněny změnou základních elektrických parametrů, zejména impedancí vedení a uzlovými napětími, jak je zřejmé z obr. 2.1 a vztahu (2.2). Uvažujme nyní jednu linku vedení odděleně od zbytku soustavy a modelovanou jako její sériová reaktance, což je zejména u přenosové soustavy s dobrou přesností možné, neboť pro podélné parametry přenosových linek platí, že reaktance je mnohem vyšší než činný odpor. Poznamenejme, že v dalším budou úvahy prováděny na jednopólových schématech částí elektrické sítě.



Obr. 2.1: Přenosová linka

Zdánlivý výkon  $\hat{S}_1$  (VA) tekoucí po vedení z uzlu 1 směrem k uzlu 2 je dán:

$$\hat{S}_1 = \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_1^* = P_1 + jQ_1 \quad (2.1)$$

$$P_1 = \operatorname{Re} \left\{ \hat{U}_1 \cdot \left( \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{jX_1} \right)^* \right\} \quad (2.2)$$

$$Q_1 = \operatorname{Im} \left\{ \hat{U}_1 \cdot \left( \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{jX_1} \right)^* \right\}$$

kde

$P_1$  ..... činný výkon tekoucí z uzlu 1 (W)

$Q_1$  ..... jalový výkon tekoucí z uzlu 1 (VAr)

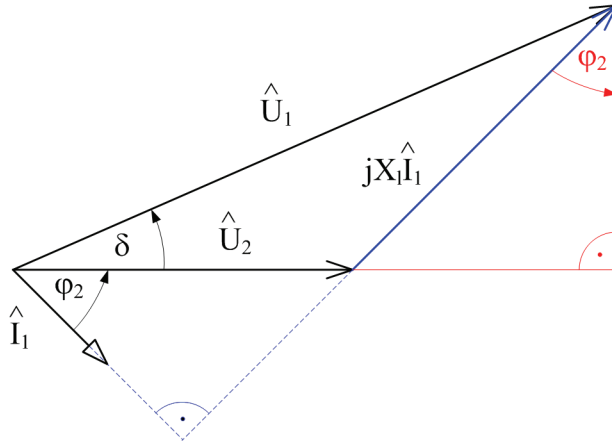
$\hat{U}_1$  ..... efektivní hodnota napětí v uzlu 1 (V),  $\hat{U}_1 = U_1 \cdot e^{j\delta_1}$

$\hat{U}_2$  ..... efektivní hodnota napětí v uzlu 2 (V),  $\hat{U}_2 = U_2 \cdot e^{j\delta_2}$

$X_1$  ..... reaktance vedení ( $\Omega$ )

$\hat{I}_1$  ..... proud po vedení (A)

Na základě fázorového diagramu na obr. 2.2 lze odvodit výkonové rovnice popisující toky činného a jalového výkonu na obou koncích vedení.



**Obr. 2.2: Fázorový diagram vedení**

Protože vedení je uvažováno jako bezztrátové, platí pro činné výkony:

$$P_2 = U_2 I_1 \cos \varphi_2$$

$$X_1 I_1 \cos \varphi_2 = U_1 \sin \delta$$

$$I_1 \cos \varphi_2 = \frac{U_1}{X_1} \sin \delta$$

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{X_1} \sin \delta = P_1 \quad (2.3)$$

Obdobně lze získat vztahy pro jalové výkony:

$$Q_2 = U_2 I_1 \sin \varphi_2$$

$$X_1 I_1 \sin \varphi_2 + U_2 = U_1 \cos \delta$$

$$I_1 \sin \varphi_2 = \frac{U_1}{X_1} \cos \delta - \frac{U_2}{X_1}$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{X_1} \cos \delta - \frac{U_2^2}{X_1} \quad (2.4)$$

$$Q_1 = Q_2 + X_1 I_1^2$$

$$Q_1 = \frac{U_1 U_2}{X_1} \cos \delta - \frac{U_2^2}{X_1} + \frac{1}{X_1} (U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{X_1} - \frac{U_1 U_2}{X_1} \cos \delta \quad (2.5)$$

kde

$\delta$  ..... úhel přenosu ( $^\circ$ ),  $\delta = \delta_1 - \delta_2$

Uvedené rovnice dobře slouží k pochopení řízení výkonových toků. Je zřejmé, že pro zvýšení přenášeného činného výkonu je možné:

- zvýšit amplitudy uzlových napětí na koncích vedení (regulace napětí)
- snížit reaktanci vedení (sériová kompenzace)
- zvýšit úhel přenosu (fázový posun)

Směr toku činného výkonu může být obrácen se změnou znaménka úhlu přenosu, tj. kladný tok výkonu odpovídá toku z uzlu 1 do uzlu 2, zatímco při záporném úhlu přenosu ( $\delta_2 > \delta_1$ ) dochází k opačnému toku výkonu.

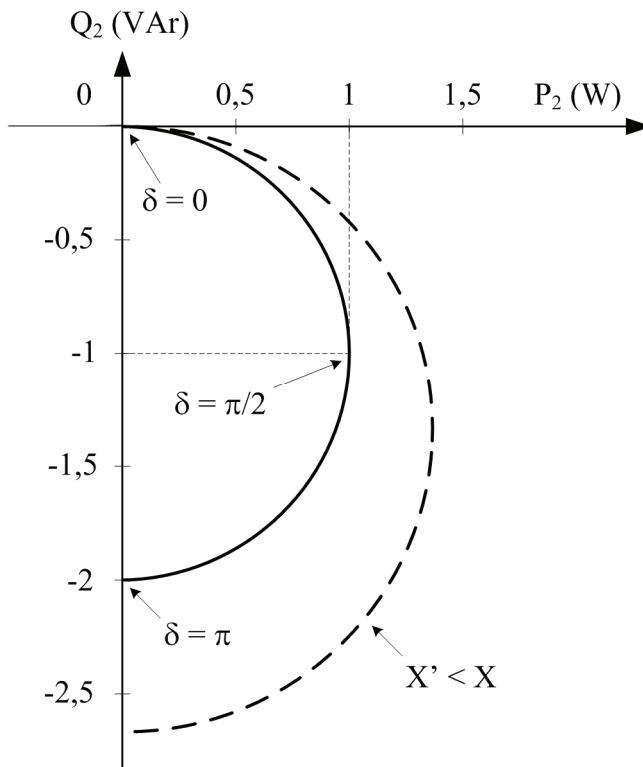
Pro další pochopení výkonových poměrů je možné sloučit vztahy (2.3) a (2.4):

$$(P_2(\delta))^2 + \left( Q_2(\delta) + \frac{U_2^2}{X_1} \right)^2 = \left( \frac{U_1 U_2}{X_1} \right)^2 \quad (2.6)$$

Rovnice (2.6) představuje kružnici se středem  $S \left( 0, -\frac{U_2^2}{X_1} \right)$  a poloměrem

$r = \frac{U_1 U_2}{X_1}$ . Určuje vztah mezi činným a jalovým výkonem vstupujícími do uzlu 2 pro čtyři parametry:  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $\delta$  a  $X_1$ . Pro znázornění vlivu úhlu  $\delta$  na výkony  $P_2$  a  $Q_2$

předpokládejme poměry  $U_1 = U_2 = U$  a  $U^2 / X_1 = 1$  VA. Odpovídající kružnice je na *obr. 2.3* (plná čára). Dojde-li ke snížení reaktance vedení  $X_1$  na hodnotu  $X_1' < X_1$  při zachování velikostí napětí, zvětší se poloměr kružnice (čárkovaná čára). [2]



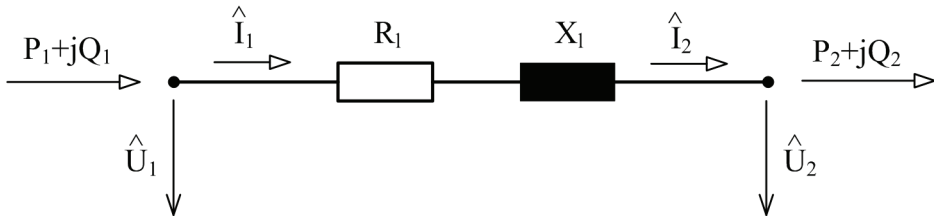
**Obr. 2.3: P-Q kružnice pro nekompenzovaný přenos**

Obdobně lze sloučením vztahů (2.3) a (2.5) psát pro uzel 1:

$$(P_1(\delta))^2 + \left( Q_1(\delta) - \frac{U_1^2}{X_1} \right)^2 = \left( \frac{U_1 U_2}{X_1} \right)^2 \quad (2.7)$$

### 2.1.1. Vliv odporu přenosové linky

Dosud uvažovaná konfigurace počítala pouze s podélnou reaktancí vedení. Přestože na přenosových linkách se podélný odpor vedení s dobrou přesností zanedbává, na nižších napěťových hladinách je již třeba odpor uvažovat. Proto je vhodné provést přesnější odvození pro výkonové vztahy při uvažování nenulového podélného odporu vedení (viz. *obr. 2.4*).



**Obr. 2.4: Přenosová linka s nenulovým odporem**

Pro zdánlivý výkon na začátku vedení platí:

$$\hat{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_1^* = \hat{U}_1 \cdot \left( \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{R + jX} \right)^*$$

Odtud

$$P_1 = \frac{U_1^2 R - U_1 U_2 R \cos \delta + U_1 U_2 X \sin \delta}{R^2 + X^2} \quad (2.8)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2 X - U_1 U_2 X \cos \delta - U_1 U_2 R \sin \delta}{R^2 + X^2} \quad (2.9)$$

Pro zdánlivý výkon na konci vedení platí ( $\hat{I}_1 = \hat{I}_2$ ):

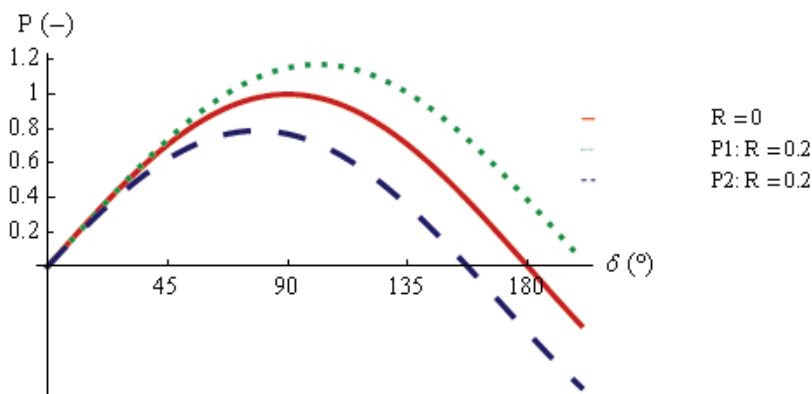
$$\hat{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \hat{U}_2 \cdot \hat{I}_2^* = \hat{U}_2 \cdot \left( \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{R + jX} \right)^*$$

Odtud

$$P_2 = \frac{U_1 U_2 R \cos \delta + U_1 U_2 X \sin \delta - U_2^2 R}{R^2 + X^2} \quad (2.10)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2 X \cos \delta - U_1 U_2 R \sin \delta - U_2^2 X}{R^2 + X^2} \quad (2.11)$$

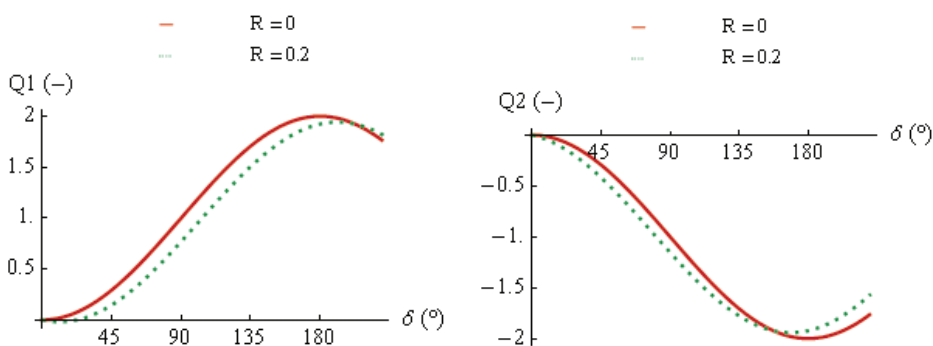
Pro případ  $R = 0$  přejdou vztahy (2.8) až (2.11) přímo ve vztahy (2.3) až (2.5). Pro porovnání vlivu  $R$  na výkonové charakteristiky poslouží grafy na obr. 2.5, v nichž platí  $U_1 = U_2 = 1$ ,  $X = 1$  a  $R$  nabývá pro srovnání hodnot 0 a 0,2 (vše v poměrných hodnotách), tj. bezeztrátové vedení a vedení s dominantní reaktancí.



Obr. 2.5: Charakteristiky činného výkonu

V případě bezztrátového vedení je činný výkon pochopitelně stejný na začátku i na konci vedení. Respektujeme-li odpor, dojde vzhledem ke ztrátám na vedení k navýšení  $P_1$  a ke snížení  $P_2$ , výrazněji pro vyšší úhly přenosu. Navíc dojde k posunu maxima přenášeného výkonu, pro začátek vedení nad  $90^\circ$ , pro konec vedení pod  $90^\circ$ .

Mají-li obě koncová napětí shodné amplitudy, je pro případ bezztrátového vedení absorbovaný jalový výkon dodáván rovnoměrně z obou konců vedení. Při respektování odporu a kladném toku činného výkonu z uzlu 1 do uzlu 2 dochází v běžném rozsahu úhlů přenosu ke snížení výkonu  $Q_1$  a zvýšení výkonu  $Q_2$  (viz. obr. 2.6). Zároveň se opět objevuje posun maxima jalového výkonu, pro začátek vedení nad  $180^\circ$ , pro konec vedení pod  $180^\circ$ .



Obr. 2.6: Charakteristiky jalového výkonu

## 2.2. Principy řízení výkonových toků

Z teoretického pohledu je možné za účelem řízení toku činného a jalového výkonu ovlivňovat jeden nebo více parametrů ve vztazích (2.2) a (2.3) pomocí různých

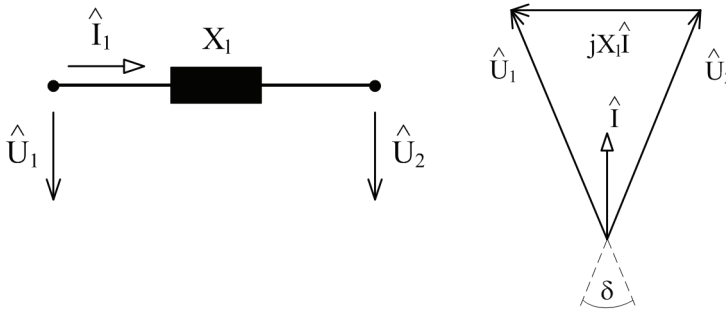
ných výkonových prvků a zařízení. Základními možnostmi jsou instalace některého z uvedených systémů:

- paralelní pasivní prvek
- sériový pasivní prvek
- paralelní vstřikování proudu
- sériové vstřikování napětí
- kombinace více prostředků

Pro objasnění základních myšlenek řízení výkonů použijeme následující předpoklady:

- vedení je bezztrátové
- oba konce vedení mají konstantní amplitudu napětí
- regulační prostředek je umístěn uprostřed linky vedení

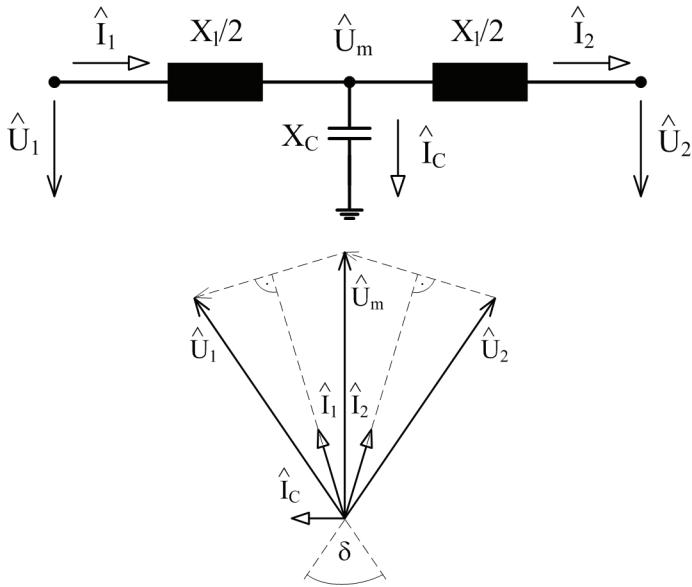
Následující varianty implementací paralelních a sériových zařízení vycházejí z nekompensovaného symetrického vedení, v přenosové soustavě modelovaného jeho podélnou reaktancí [3]. Jestliže budou splněny předpoklady bezztrátovosti a pevných amplitud napětí na obou koncích, objeví se poměry odpovídající obr. 2.7.



Obr. 2.7: Nekompensované vedení

### 2.2.1. Paralelní pasivní prvek

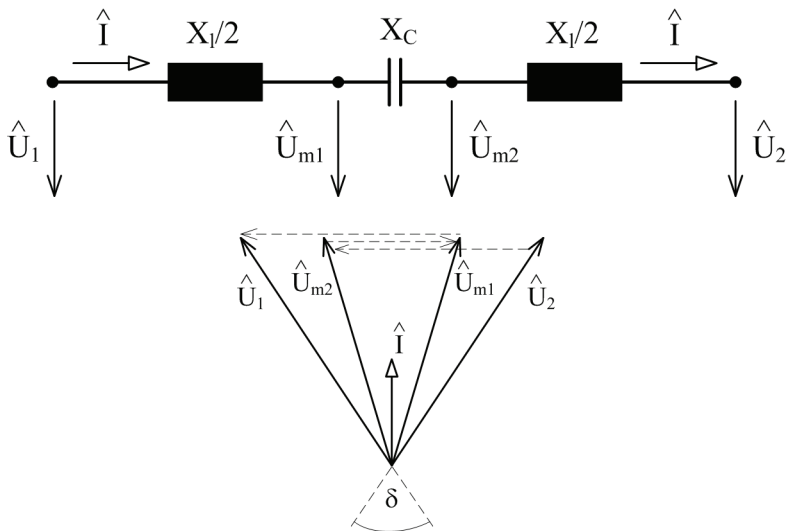
Vliv paralelní kapacity o reaktanci  $X_C$  na výkonové toky lze vyšetřovat pomocí modelu a fázorového diagramu na obr. 2.8. Paralelní zařízení v zásadě ovlivňují napětí v místě jejich připojení. Jsou-li připojena v bodech soustavy s velkou napěťovou citlivostí, lze změnou napětí významně ovlivnit i toky výkonů.



Obr. 2.8: Paralelní kapacita

### 2.2.2. Sériový pasivní prvek

Napětí v sérii s úbytkem na vedení lze vytvořit instalací sériového prvku (např. s kapacitní reaktancí  $X_C$ ), na němž díky procházejícímu proudu vznikne přirozený úbytek napětí. Vložení sériového prvku do přenosové cesty přímo ovlivní celkovou impedanci přenosu a tedy i toky výkonů po vedení. Vliv kapacity a jejího sériového napětí je ilustrován na obr. 2.9.

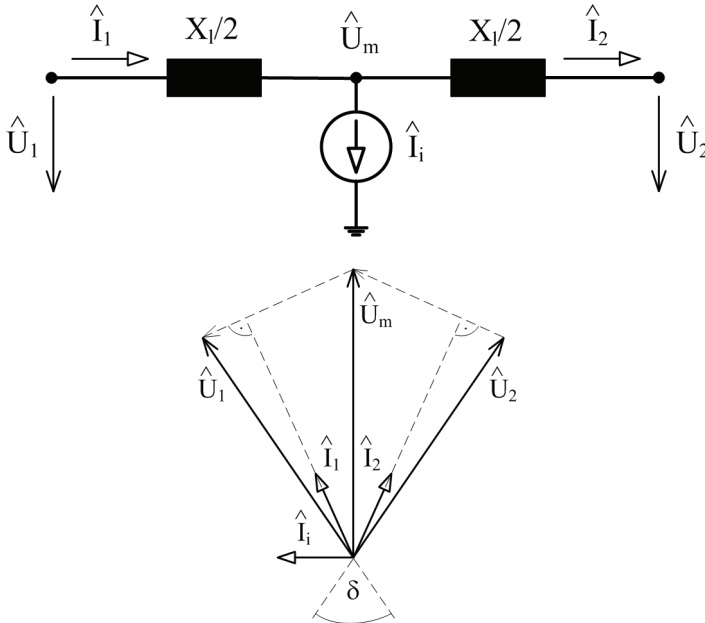


Obr. 2.9: Sériová kapacita



### 2.2.3. Paralelní vstřikování proudu

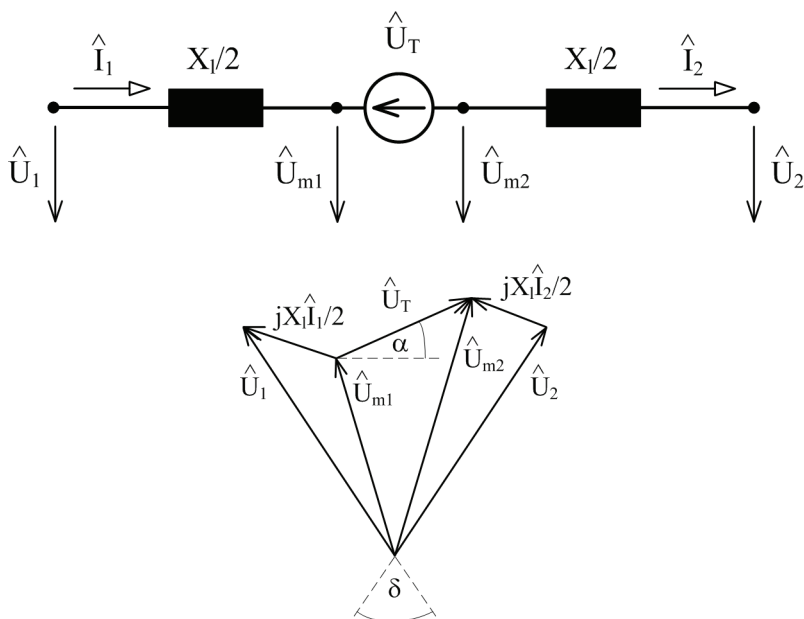
Zařízení pro řízení výkonových toků mohou být rovněž založena na koncepci řízeného vstřikování aktivní elektrické veličiny. Podle konstrukce, zapojení a provozního režimu se jedná o paralelní proud nebo sériové napětí. Princip zařízení se vstřikováním paralelního proudu  $I_i$  je popsán na obr. 2.10.



Obr. 2.10: Paralelní vstřikování proudu

### 2.2.4. Sériové vstřikování napětí

Sériové napětí může být rovněž realizováno pomocí řízeného zdroje napětí. Tento zdroj může být schopen vstřikovat napětí s proměnlivou amplitudou  $U_T$  a/nebo fází  $\alpha$ . Vliv na výkonové toky je naznačen na obr. 2.11.



Obr. 2.11: Sériové vstřikování napětí

### 2.3. Možnosti regulačních prostředků

Změnou základních elektrických parametrů lze tedy ovlivnit výkon přenášený po jednotlivých linkách vedení, což může přispět ke zvýšení přenosové schopnosti soustavy jako celku. Na zlepšení provozních charakteristik soustavy se jednotlivé regulační prostředky podílejí různou měrou podle veličin, které ovlivňují nejvíce (viz. [3]).

**Paralelní zařízení** pomáhají zejména udržovat napětí při změnách přenášeného výkonu. Paralelní tlumivky jsou využívány pro kompenzaci přebytku jalového výkonu v případech malých odběrů nebo vedení naprázdno. U některých dlouhých vedení bývají tyto tlumivky trvale připojeny k soustavě, aby bylo eliminováno nebezpečí přepětí při náhlém odlehčení nebo odpojení vedení. Standardní paralelní kondenzátory slouží k efektivní kompenzaci jalového výkonu i jako jalový zdroj pro případy, nastane-li požadavek na zvýšení napětí.

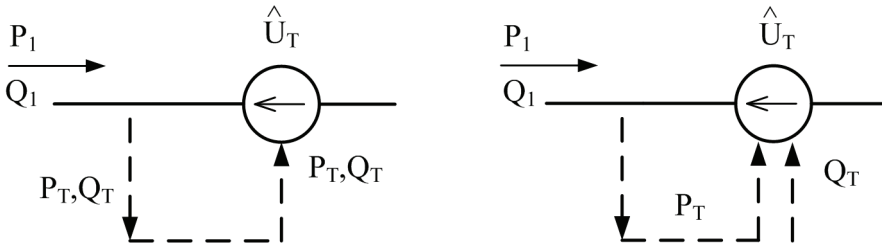
**Systémy paralelního vstřikování**, ať už klasické nebo moderní s elektronickými měniči, zejména pomocí dodávky jalového proudu zlepšují udržování uzlových napětí v limitech při proměnlivém přenosu činného výkonu a zlepšují tak výkonovou přenosovou schopnost systému. Kromě regulace napětí mohou sloužit též v omezeném rozsahu k řízení výkonových toků po vedení pomocí dodávky nebo odběru jalového výkonu v místě svého připojení.

Klasická **sériová kompenzace** je realizována sériovými kondenzátory, které snižují celkovou efektivní reaktanci přenosové linky a tím i úbytek napětí na vedení. Tím zmírňují poklesy napětí zejména pro velká zatížení a pomáhají rozšiřovat ob-

last napěťové stability. Rovněž pomáhají zlepšovat dynamickou stabilitu a měnit toky výkonů pomocí změn  $P-\delta$  charakteristik.

**Systémy sériového vstřikování** mohou díky své flexibilitě zajistit kromě zvýšení přenosové kapacity i celkové zlepšení provozních parametrů soustavy. Přenášený činný výkon může být ovlivněn změnou amplitudy i fáze injektovaného sériového napětí. Čím větší je amplituda sériového napětí, tím je také větší regulační rozsah výkonů. Je-li možné měnit fázi vstřikovaného napětí v celém rozsahu  $0^\circ$  až  $360^\circ$ , pak může být činný výkon tekoucí po přenosové lince regulován v maximálním možném rozsahu.

U systémů sériového vstřikování existují dvě základní možnosti generování sériového napětí (viz. obr. 2.12). Činný a jalový výkon  $P_T$  a  $Q_T$  vstřikované v souvislosti se sériovým napětím  $\hat{U}_T$  mohou být buď oba odebírané ze sítě, nebo může být ze sítě odebírán pouze činný výkon a jalový výkon je generován lokálně. Se změnou fáze  $\alpha$  napětí s konstantní amplitudou  $U_T$  dochází k ovlivňování toku činného výkonu po vedení. Jestliže se úhel  $\alpha$  může pohybovat v rozsahu  $0$  až  $360^\circ$ , činný výkon protékající přenosovým vedením může kolísat v maximálním možném rozsahu. Varianta s lokálně generovaným jalovým výkonem má při změnách  $\alpha$  větší vliv na změnu  $P_1$  než při odebrání  $Q_T$  ze sítě a také vykazuje širší regulační pásmo  $P_1$  i pro větší úhly přenosu.



**Obr. 2.12: Možnosti sériového vstřikování**

Paralelní kompenzace je efektivní pro udržení požadovaného napěťového profilu na přenosových linkách a jako podpora napětí na konci radiálních linek při rostoucích požadavcích na odebráný výkon. Nabízí tak možnost zvýšit přenosovou schopnost vedení v určitých případech až k tepelným mezím vedení. Je však méně účinná při řízení okamžitého toku činného výkonu, který je při definovaných napětích dán a limitován zejména podélnou reaktancí linky a úhlem přenosu mezi koncovými napětími. Ke zvýšení přenášeného činného výkonu je tak vhodná právě sériová kompenzace založená na kapacitní kompenzaci podélné reaktance nebo na sériovém vstřikování napětí do přenosové linky.

### 2.3.1. Řízení jalového výkonu

V elektrizačních soustavách je napětí v uzlech významně ovlivňováno změnami zatížení a topologie soustavy. Při vysokém zatížení síť může docházet k výrazným poklesům napětí a případně až k napěťovému kolapsu. To vede k působení podpěťových ochranných masivnímu odpojování zátěží, a tím k negativním

dopadům na odběratele. Na druhou stranu při velmi nízkém zatížení se na odlehčených linkách může objevit přepětí způsobené Ferrantiho jevem, kapacitním pře-kompenzováním. Přepětí způsobuje poruchy zařízení kvůli poškození izolace, či nežádoucí produkci vyšších harmonických kvůli magnetické saturaci transformátorů. Proto je nutné udržet napětí v soustavě blízko jmenovitých hodnot, aby byl zachován spolehlivý chod celého systému.

K tomuto účely jsou tradičně používány paralelní tlumivky, které odebírají jalový výkon, a tak snižují napěťovou hladinu v místě svého připojení. Naopak paralelní kondenzátory dodávající jalový výkon slouží ke zvýšení napětí v uzlu. Při proměnlivých požadavcích jsou používány synchronní kompenzátory, které dodávají, resp. odebírají, jalový výkon ze soustavy při provozu v přebuzeném, resp. podbuzeném, stavu obdobně jako synchronní generátory. ovšem při nulové dodávce činného výkonu.

Rozvoj výkonové elektroniky a řídicích mechanismů vedl v 70. letech k vývoji rychlých zařízení SVC se spínanými tlumivkami a kapacitami, které téměř nahradily synchronní kompenzátory. Nedávný vývoj v oblasti elektronické paralelní kompenzace umožnil realizaci zařízení STATCOM, které je založeno na principu trojfázového můstkového měniče (VSC) bez nutnosti instalace střídavých tlumivek a kondenzátorů a kombinuje provozní výhody synchronních kompenzátorů a SVC. [4]

### 2.3.2. Řízení činného výkonu

Osvědčeným způsobem zvýšení přenosové schopnosti vedení je instalace sériové kompenzace, která vede ke snížení podélné impedance linek. Takováto kompenzace pomocí elektronických prvků vede k možnosti rychlých a přesných zásahů podle požadavků. Využit lze např. sériově instalovanou TCSC, která dokáže efektivně řídit tok činného výkonu díky své schopnosti pracovat v induktivním i kapacitním režimu. Kapacitní provoz zkracuje elektrickou délku vedení, a tím zvyšuje možný přenášený činný výkon (vedení se chová jako fyzicky kratší úsek). U induktivního provozu je tomu naopak. U moderní sériové kompenzace je možné instalovat větší množství těchto LC členů do série, z nichž každý má své nezávislé řízení.

Jinou možností řízení činného výkonu je změna rozdílu napětí mezi koncovými uzly vedení, tj. změna amplitudy či fáze. Principálně je toto realizováno injektováním vhodného sériového napětí (sériově s linkou vedení), které je tak ve výsledku přičteno k jednomu z krajních uzlových napětí. Tento způsob je možné realizovat mechanicky či elektronicky regulovatelnými transformátory s natáčením fáze (PST) nebo elektronickým měničem v systémech SSSC. Elektronické způsoby mají pochopitelně rychlejší odezvu na požadavek. Podle režimu provozu je přídatné napětí obvykle vstříkováno kolmo na uzlové napětí či na protékající proud.

Současné řízení činného i jalového výkonu je možné pomocí komplexních FACTS zařízení jako jsou SSSC nebo UPFC, případně stejnosměrných přenosů HVDC.

Rovněž je vhodné poznamenat, že v uzlových soustavách nelze zcela oddělit řízení činného a jalového výkonu a napětí. Každý systém v zásadě ovlivňuje všechny veličiny ve všech uzlech systému, jejich změna však závisí na topologii soustavy, instalaci dalších zdrojů a kompenzačních zařízení a fyzikálním principu

vlastního zařízení. Výrazná změna cíleně regulované veličiny obvykle vede k menší (ale nevyhnutelné) změně veličiny další.

## 2.4. Charakteristiky kompenzačních prostředků

### 2.4.1. Paralelní regulace napětí

Uvažujme paralelní zapojení kompenzačního zdroje uprostřed přenosové linky dle *obr. 2.10*. V úvahu berme tentokrát ideální napěťový zdroj dodávající (odebírající) pouze jalový výkon, tj.  $P = 0$ , který v místě připojení udržuje konstantní velikost napětí  $U_m$  rovnou koncovým napětím  $U_1$  a  $U_2$  (rovnou  $U$ ). Takovýto kompenzační prostředek rozděluje přenosovou linku ( $X = 1$ ) na dvě nezávislé části. Mají-li koncová napětí obou částí vedení stejné amplitudy, rozdělí proudy ( $I_1 = I_2 = I$ ) a napětí celkový úhel přenosu  $\delta$  na 4 shodné části (viz. fázorový diagram na *obr. 2.13*). Pak lze pro přenášený činný výkon bezeztrátového vedení odvodit:

$$P = U_1 I_1 \cos \frac{\delta}{4} = U_2 I_2 \cos \frac{\delta}{4} = U_m I_1 \cos \frac{\delta}{4} = U_m I_2 \cos \frac{\delta}{4}$$

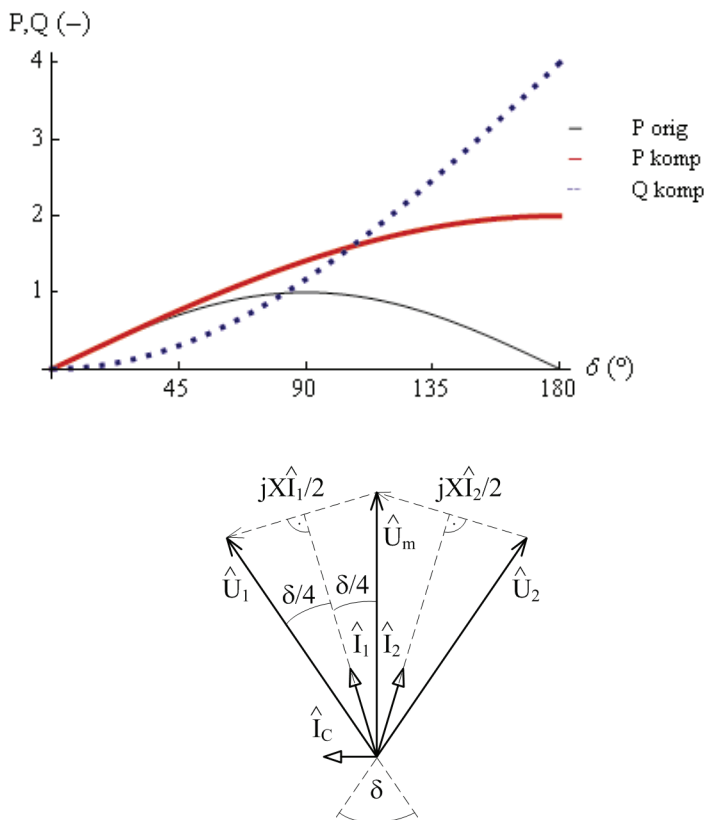
$$\frac{X}{2} I = 2 \cdot U \sin \frac{\delta}{4} \Rightarrow I = 4 \cdot \frac{U}{X} \sin \frac{\delta}{4}$$

$$P = UI \cos \frac{\delta}{4} = U \cos \frac{\delta}{4} \cdot 4 \cdot \frac{U}{X} \sin \frac{\delta}{4} = 2 \frac{U^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.12)$$

Obdobně pro jalový výkon na obou koncích vedení:

$$Q = UI \sin \frac{\delta}{4} = 4 \frac{U^2}{X} \left( 1 - \cos \frac{\delta}{2} \right) \quad (2.13)$$

Výkonové charakteristiky jsou na *obr. 2.13*. Je zřejmé, že paralelní kompenzaci lze zvýšit přenášený činný výkon, ovšem za cenu rychle rostoucího jalového výkonu. Uvedené charakteristiky jsou tak platné pouze pro ideální kompenzační zdroj bez omezení jalového výkonu. Reálné kompenzační zdroje (SVC, STATCOM) mají zejména z ekonomických důvodů nižší výkonové dimenzování než by odpovídalo maximálnímu činnému výkonu, nejsou tak často schopny v celém provozním rozsahu udržet konstantní velikost napětí  $U_m$  a jejich charakteristiky obsahují limity.



Obr. 2.13: Charakteristiky a fázorový diagram ideální paralelní kompenzace

### 2.4.2. Sériová kapacitní kompenzace

Uvažujme přenosovou linku s konstantními koncovými napětími ( $U_1 = U_2 = U$ ), na které je pro snížení podélné reaktance ( $X_L = 1$ ) instalována sériová kapacita. Ta může být na lince umístěna uprostřed dle obr. 2.9 či jiným způsobem, vzhledem k sériovému zapojení prvků L a C na umístění kapacity pro účely odvození výkonových charakteristik nezáleží. Bude-li kapacita umístěna na začátku linky, platí fázorový diagram na obr. 2.14. Sériovou kombinací dvou reaktančních prvků dostaneme výslednou efektivní reaktanci linky ( $X_L = \omega L, X_C = -1/\omega C$ )

$$X_{ef} = X_L + X_C = (1 - k) \cdot X_L \quad (2.14)$$

k..... stupeň sériové kompenzace

$$k = \left| \frac{X_C}{X_L} \right| \quad 0 \leq k < 1 \quad (2.15)$$

Obvykle se stupeň sériové kompenzace pohybuje v rozsahu 25 % až 75 %. [5]

Z fázorového diagramu pak plynou vztahy pro proud kompenzované linky a pro přenášený činný a jalový výkon na konci linky:

$$\frac{X_{ef}}{2} I = U \sin \frac{\delta}{2} \Rightarrow I = 2 \cdot \frac{U}{(1-k)X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.16)$$

$$P = UI \cos \frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{(1-k)X_L} \sin \delta \quad (2.17)$$

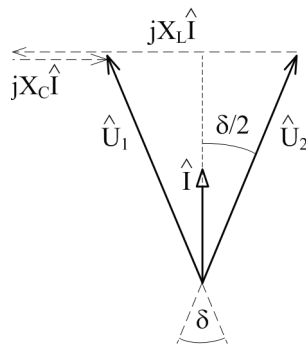
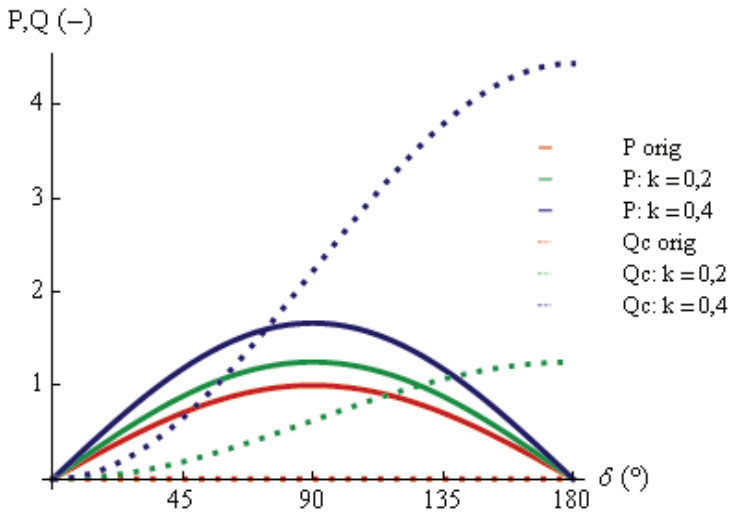
$$Q = UI \sin \frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{(1-k)X_L} (1 - \cos \delta) \quad (2.18)$$

Výkonové charakteristiky jsou tak pouze násobkem vztahů pro nekompenzovanou linku s konstantními napětími, daným stupněm sériové kompenzace  $k$ .

Jalový výkon generovaný sériovou kapacitou pak činí:

$$Q_C = X_C I^2 = \frac{2U^2}{X_L} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) \quad (2.19)$$

Charakteristiky přenášeného činného výkonu a jalového výkonu dodávaného kapacitou pro různé stupně kompenzace jsou na *obr. 2.14*.



**Obr. 2.14: Charakteristiky a fázorový diagram sériové kapacitní kompenzace**

Dle očekávání přenášený činný výkon rychle roste s vyšším stupněm sériové kompenzace  $k$ , stejně tak jako jalový výkon  $Q_C$ , který rovněž roste s úhlem přenosu  $\delta$  obdobně jako jalový výkon tekoucí z uzlu do linky. Na realizovaný nárůst přenášeného výkonu lze rovněž pohlížet jako na zvýšení celkového napětí přiloženého na sériovou reaktanci, který vyvolá nárůst proudu a tedy i výkonu. Jak je zřejmé z fázorového diagramu, toto zvýšení napětí je umožněno výskytem „protinapětí“ kapacity přičteného k síťovým napětím s opačnou polaritou, než má induktivní úbytek na vedení. Kromě kapacity je možné toto „protinapětí“ realizovat i obecným napěťovým zdrojem, zejména pomocí elektronických měničů (viz. dále).

### 2.4.3. Statická synchronní sériová kompenzace

Sériová kompenzace realizovaná trojfázovým můstkovým měničem s vypínatelnými součástkami odpovídá sériovému vstřikování napětí příslušným zdrojem dle obr. 2.11. Jak bylo uvedeno, jedná se v případě zdroje kapacitního jalového výkonu v principu o přiložení „protinapětí“, které zvýší celkové napětí na



podélné reaktanci vedení. Protože jde opět o sériové spojení, můžeme takovýto zdroj umístit na začátek přenosové linky bez ovlivnění výkonových charakteristik.

Je-li přiložené napětí zdroje  $\hat{U}_T$  kolmé na protékající proud, tedy v případě čistě jalového zdroje, pak pro kapacitní režim zdroje platí fázorový diagram na *obr. 2.15*. Obecně pro čistě jalový zdroj je napětí omezeno dimenzováním měniče ( $0 \leq U_T \leq U_{T_{\max}}$ ) a může nabývat obou polarit podle volby L, C módu.

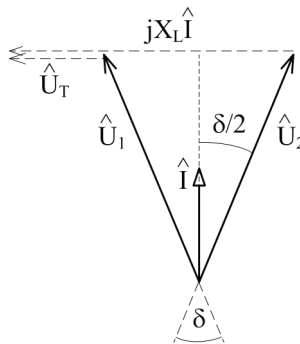
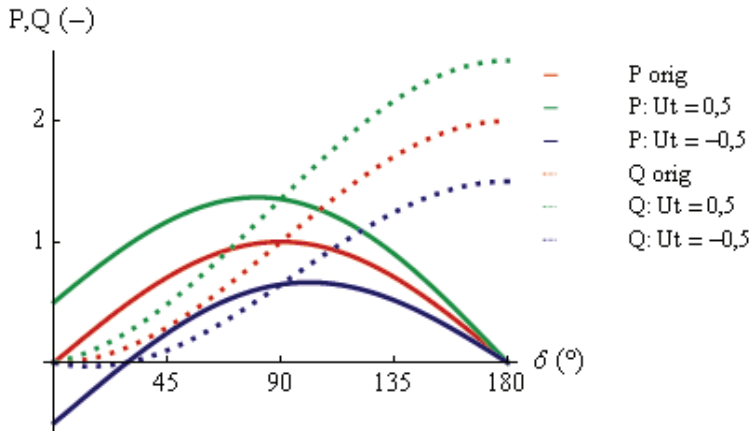
Mají-li opět obě koncová napětí linky konstantní hodnoty  $U$ , lze pro přenášené výkony z fázorového diagramu odvodit ( $U_T > 0$  pro C kompenzaci,  $U_T < 0$  pro L kompenzaci):

$$I = \frac{2U \cdot \sin \frac{\delta}{2} + U_T}{X_L} \quad (2.20)$$

$$P = UI \cos \frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{X_L} \sin \delta + \frac{U \cdot U_T}{X_L} \cos \frac{\delta}{2} \quad (2.21)$$

$$Q = UI \sin \frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{X_L} (1 - \cos \delta) + \frac{U \cdot U_T}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.22)$$

Je zřejmé, že výkonové charakteristiky pro nekompenzovaný přenos jsou změněny přičtením členu závislého na úhlu přenosu a pevně nastaveném kompenzačním napětí  $U_T$ . Pro obě polarity kompenzačního napětí jsou charakteristiky znázorněny na *obr. 2.15*.



**Obr. 2.15: Charakteristiky a fázorový diagram statické synchronní sériové kompenzace**

Z grafů je vidět, že sériový zdroj napětí umožňuje změnit přenášený činný výkon o konstantní hodnotu téměř nezávisle na úhlu přenosu a úměrně sériově vstříkovanému napětí právě v nejdůležitějším rozsahu  $0 \leq \delta \leq \pi/2$ . (Sériová kapacita měnila výkon o konstantní poměr z nekompenzované hodnoty.) Naopak jalové výkony se v běžném rozsahu úhlů přenosu liší pro různé úrovně kompenzace spíše méně a jejich rozdíl roste s větším úhlem přenosu. Proto je tento typ sériové kompenzace vhodný právě pro řízení toků činného výkonu.

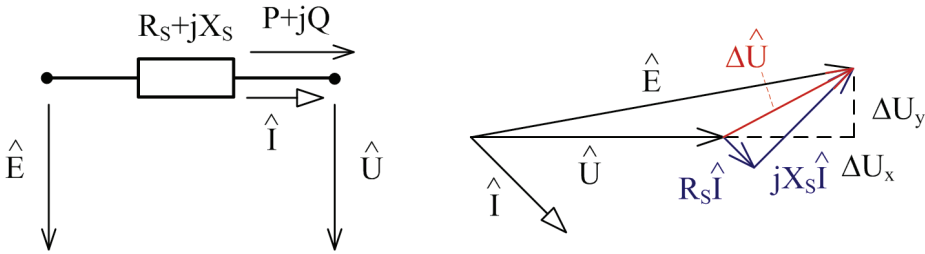
Za zmínku stojí fakt, že při vyšší induktivní kompenzaci může dojít ke změně polarity napětí přiloženého na podélnou indukčnost vedení, což má za následek obrácený tok proudu i činného výkonu po lince. Toto je další možnost, jak využít SSSC pro kompenzaci. [5]

## 2.5. Vliv výkonových toků na napěťovou úroveň

Toky, odběry a dodávky činného i jalového výkonu mohou mít významný vliv na úroveň napětí v uzlech soustavy, které musí být podle technických standardů

udržováno v předepsaném pásmu, aby byla zajištěna bezpečná a spolehlivá funkce konečných spotřebičů.

Bude-li v uzlu na konci radiální linky připojen odběr činného a jalového výkonu  $P + jQ$ , lze zbytek soustavy nahradit ekvivalentním zdrojem s vnitřním napětím  $\hat{E}$  a impedancí  $\hat{Z}_s = R_s + jX_s$ . V místě odběru je pak dosaženo uzlového napětí  $U$  (předpokládejme polohu fázoru  $\hat{U} = U$  v reálné ose a jednofázovou soustavu). Situaci včetně fázorového diagramu zachycuje obr. 2.16.



**Obr. 2.16: Úbytek napětí v místě spotřeby**

Pro úbytek napětí platí známý vztah:

$$\Delta \hat{U} = \hat{Z} \cdot \hat{I} = (R_s + jX_s) \cdot \frac{P - jQ}{U}$$

$$\Delta \hat{U} = \frac{R_s P + X_s Q + j(X_s P - R_s Q)}{U} \quad (2.23)$$

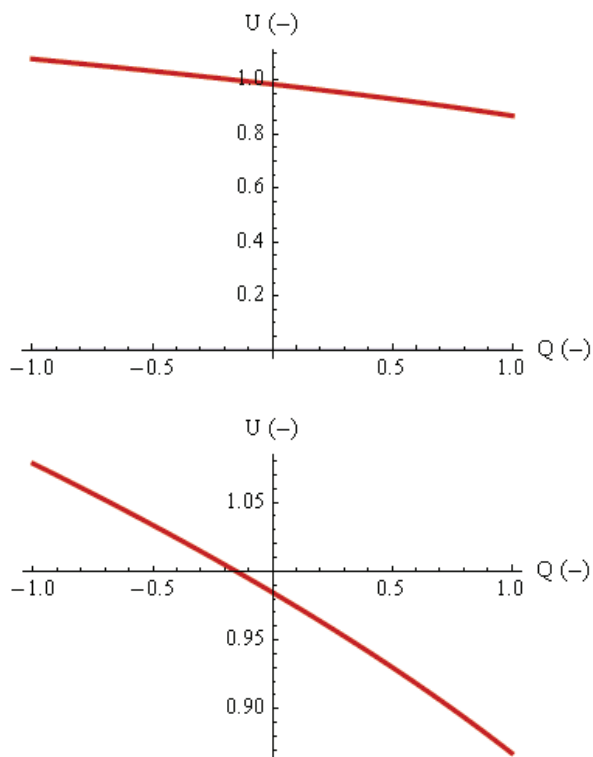
Při odvození křivek závislosti napětí na výkonových odběrech předpokládáme konstantní (známou) amplitudu  $E$  vnitřního napětí sítě  $\hat{E}$  a dále je zřejmá závislost úbytku napětí na samotném svorkovém napětí  $\hat{U}$  vzhledem k definování odběru pomocí výkonů. Známe-li impedanci soustavy  $\hat{Z}_s$  i odebíraný zdánlivý výkon  $P + jQ$ , lze fázory  $\hat{E} = E_x + jE_y$  a  $\hat{U} = U$  plně určit z následující soustavy rovnic [1]:

$$E_x + jE_y = U + \Delta \hat{U} = U + \frac{R_s P + X_s Q + j(X_s P - R_s Q)}{U}$$

$$E_x^2 + E_y^2 = E^2 \quad (2.24)$$

Pro známou impedanci soustavy a konstantní odebíraný činný výkon lze poté stanovit závislost napětí v odběrném uzlu na odběru (dodávce) jalového výkonu,

což je důležité pro určení vlivu regulátoru napětí, který obvykle pracuje právě se vstřikováním jalového výkonu. Na *obr. 2.17* je příklad tzv. systémové křivky napětí pro veličiny v poměrných hodnotách ( $E = 1$ ;  $R = 0,1$ ;  $X = 1$ ;  $P = 1$ ). Kladné hodnoty jalového výkonu odpovídají induktivní zátěži, záporné hodnoty kapacitní zátěži.



**Obr. 2.17: Systémová křivka napětí**

Platí tedy základní úvaha, že induktivní odběr napětí snižuje a kapacitní odběr napětí zvyšuje. Jak je zřejmé z detailu systémové křivky, hodnoty napětí  $U$  rovného vnitřnímu napětí ekvivalentního zdroje soustavy  $E$  (ideálně jmenovitého napětí) lze obecně dosáhnout při mírně kapacitním zatížení.

Při orientačních výpočtech se často zanedbává odpor soustavy a uvažuje se pouze reaktance  $X_S$ . Rovněž se často uvažuje pouze reálná část úbytku  $\Delta \hat{U}$ . Potom zjednodušeně platí:

$$U = E - \frac{X_S Q}{U} \quad (2.25)$$

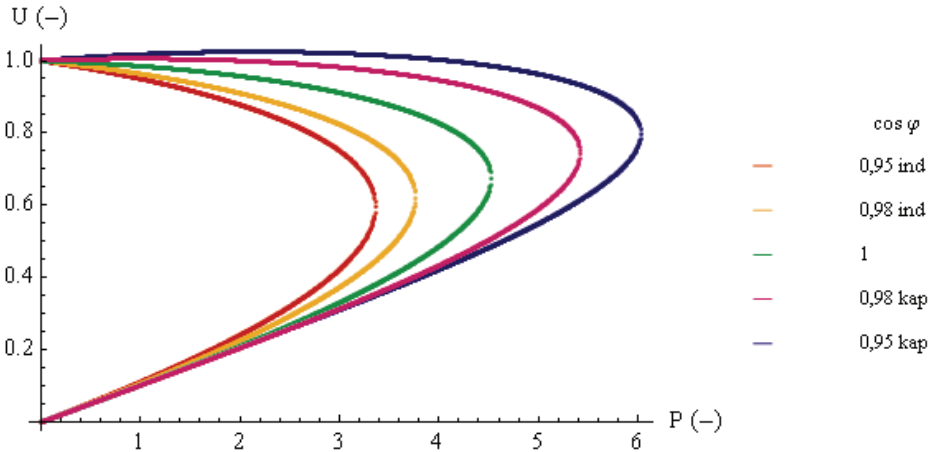
a křivka napětí je pro běžný rozsah  $Q$  velmi blízká přímce procházející bodem  $(0, E)$ .

Ze vztahu (2.23) plyne zajímavý závěr pro čistě reaktivní regulátor napětí, připojený paralelně v místě připojení odběru. Jak již bylo uvedeno, lze při určité hodnotě  $Q$  eliminovat úbytek napětí tak, že svorkové napětí  $U$  má stejnou hodnotu jako vnitřní napětí soustavy  $E$ . Pokud by regulátor zároveň sloužil ke kompenzaci jalového výkonu, pak při dosažení jednotkového účinníku  $\cos\varphi = 1$  bude úbytek napětí

$$\Delta\hat{U} = \frac{(R_s + jX_s) \cdot P}{U} \quad (2.26)$$

Tento úbytek je však nenulový a nezávislý na jalovém výkonu. Proto čistě reaktivní regulátor nemůže zároveň zajistit jednotkový účinník i udržení jmenovitého napětí v místě připojení.

Obdobně jako pro jalový výkon můžeme analyzovat vliv velikosti odebíraného činného výkonu na napětí v uzlu. Závislost napětí  $U$  na odběru  $P$  je stanovena pro známou impedanci soustavy a konstantní účinník odběru, s činným výkonem se tak adekvátně mění i výkon jalový. Tyto  $P$ - $U$  křivky jsou důležité pro stanovení maximálního možné zatížení v uzlech soustavy s ohledem na napěťovou stabilitu. Soustava křivek na obr. 2.18 je vynesena pro veličiny v poměrných hodnotách ( $E = 1$ ;  $R = 0,01$ ;  $X = 0,1$ ), účinník je parametrem.

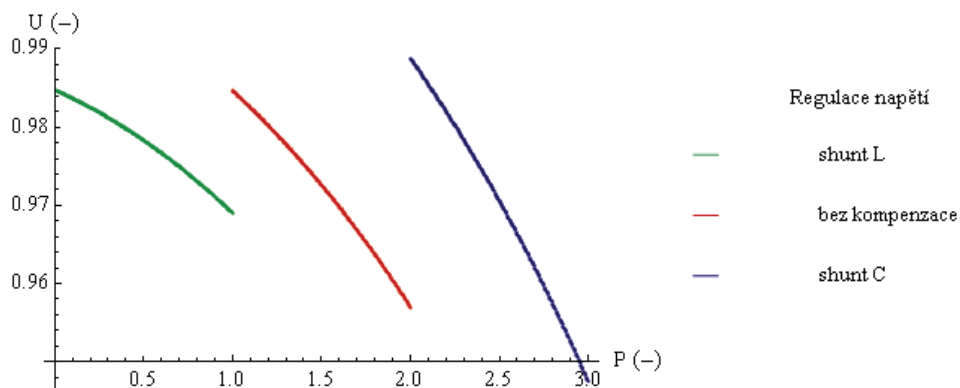


**Obr. 2.18: Závislost napětí na zatížení**

Z křivek je zřejmé, že pro každé zatížení menší než maximální možné existují dvě možná napětí plynoucí z řešení rovnic. Pro běžný chod jsou však přípustné pouze vyšší hodnoty blízké jednotkovému napětí (v poměrných hodnotách). Opět je patrné, že pouze pro kapacitní zátěž je možné zvýšení napětí, a to pouze pro oblast nižšího zatížení, úměrně účinníku. Pro všechny účinníky však existuje oblast výkonů, pro něž začne napětí strměji klesat s rostoucím zatížením, až je dosaženo bodu zvratu. Bez ohledu na přípustnost napětí v bodu zvratu není možné dále zvyšovat zatížení. Vysoká záporná strmost  $dU/dP$  vede při zvýšení odebíraného vý-

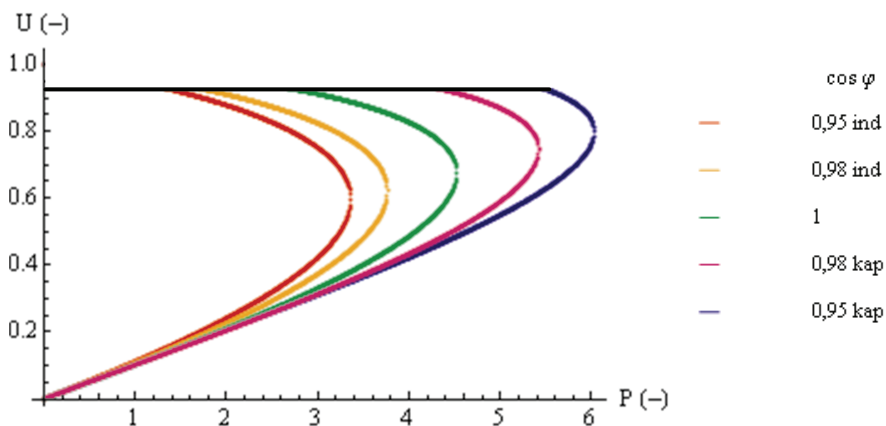
konu k prudkému poklesu napětí, které se nazývá napěťový kolaps. Limit napěťové stability klesá s induktivní zátěží a roste s více kapacitní zátěží.

Hrubou regulací napětí v případě proměnlivého zatížení lze provádět jednorázovým připínáním paralelních reaktančních prvků v místě odběru. Při nízkém odebraném výkonu, kdy napětí je vyšší, lze připojit paralelní indukčnost. Naopak pro vyšší odběry napětí klesá, a tak ho lze zvýšit připojením paralelní kapacity. Toto je patrné z *obr. 2.19*, který je v podstatě detailem křivky z *obr. 2.18* pro jednotkový účinník zátěže. Zátěž je ponechána bez kompenzace pro činný výkon v rozsahu 1 až 2 (-), pro nižší výkony je připojena indukčnost s jalovým výkonem 0,15 (-), pro vyšší výkony kapacita s jalovým výkonem 0,3 (-).



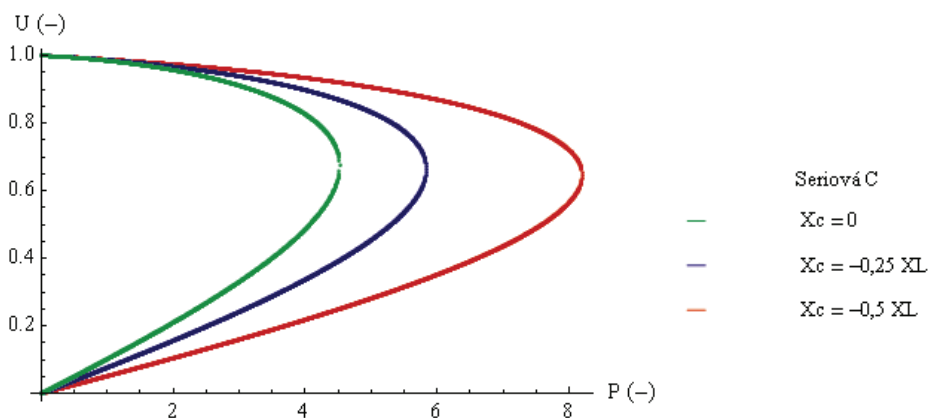
**Obr. 2.19: Kompenzace napětí příčnými prvky**

Paralelním připojením reaktančních prvků je tak možné udržet napětí ve výrazně užším pásmu než v případě bez kompenzace. Rostoucí strmost křivky napětí pro vyšší odebrané výkony však zůstává, proto stále existuje omezení pro odběry, které brání nepřipustnému poklesu napětí. Spojitou změnou jalového výkonu dodávaného kompenzačním zařízením v místě odběru (např. SVC, STATCOM) je možné udržet napětí konstantní i pro proměnlivý odběr činného výkonu, neboť celkový účinník odběru je spojitě měněn a pracovní bod se tak pohybuje po umělé charakteristice vzniklé z jednotlivých bodů původních charakteristik (viz. *obr. 2.20*). Bod potenciálního vzniku napěťového kolapsu se na umělé charakteristice vyskytuje pro minimální dovolený (možný) kapacitní účinník.



**Obr. 2.20: Vliv paralelní reaktivní kompenzace v místě odběru**

Rovněž sériovou kompenzací lze omezit změnu napětí na konci linky s odběrem a zmírnit riziko napěťového kolapsu. Tento vliv je ilustrován na *obr. 2.21*, kdy podélná reaktance vedení je kompenzována dvěma různými sériovými kapacitami. Jako referenční případ bez kompenzace je brán čistě činný odběr s parametry z *obr. 2.18* (zelená křivka).



**Obr. 2.21: Vliv sériové kompenzace na napěťovou stabilitu**

Z uvedeného je zřejmé, že paralelní i sériová kompenzace dokáží zvýšit hranice napěťové stability buď dodávkou jalového výkonu v místě spotřeby, nebo zmírněním úbytku napětí na přívodním vedení. Při stejném výkonovém dimenzování kompenzačních prvků bývá pro zlepšení napěťové stability sériová kompenzace účinnější než paralelní.

## 2.6. Literatura

- [1] Acha, E., Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O., Miller, T.J.E.: Power Electronic Control in Electrical Systems. Oxford: Newnes Press, c2002. 443 s. ISBN 0-7506-5126-1.
- [2] Skvarenina, T.L.: The Power Electronics Handbook. CRC Press, 2002. 664 s. ISBN 0-8493-7336-0.
- [3] Wirth, E., Kara, A.: Innovative Power Flow Management and Voltage Control Technologies. IEE Power Engineering Journal. 2000, vol. 14, is. 3, s. 129-140.
- [4] Grünbaum, R., Noroozian, M., Thorvaldsoson, B.: FACTS – Powerful Systems for Flexible Power Transmission. ABB Review, 1999, is. 5, s. 1-12.
- [5] Hingorani, N.G., Gyugyi L.: Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, c2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8.
- [6] Doležal, J., Tlustý, J., Valouch, V.: Moderní prostředky na zvýšení kvality elektrické energie. In Sborník Poděbrady 2004. Poděbrady: EGÚ Praha Engineering, a.s., 2004. s. 1-8.
- [7] Ptáček, J.: Regulace toků výkonů v propojených elektrizačních soustavách. Brno, 2004. 174 s. FEKT VUT v Brně. Disertační práce.
- [8] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C.R., Ambriz-Pérez, H., Angeles-Camacho, C.: FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2004. 403 s., ISBN 0-470-85271-2.



### 3. Zařízení FACTS

Existují různá zařízení pro řízení výkonových toků, která mohou být účelně provozována pro splnění přenosových kritérií. Vhodnost jejich použití pro řešení příslušného problému závisí na mnoha faktorech, zejména na technických a ekonomických kalkulacích. Moderní přístup k výkonovému řízení může být realizován díky vývoji výkonové elektroniky, která také slouží ke zvyšování kvality elektrické energie. Tato kapitola poskytuje stručný popis konstrukce, možností a výkonových charakteristik jednotlivých systémů FACTS. Podle způsobu připojení zařízení k soustavě můžeme rozlišovat FACTS systémy sériové (TCSC, SSSC), paralelní (SVC, STATCOM) a kombinované (PST, UPFC).

Podle oficiální terminologie IEEE lze definovat (viz. [1]):

**Flexible AC Transmission System (FACTS):** Střídavý přenosový systém obsahující regulátory statické a založené na výkonové elektronice za účelem zlepšit říditelnost a zvýšit přenosovou schopnost systému.

**FACTS kontrolér:** Zařízení výkonové elektroniky nebo statické, které umožňuje řízení jednoho nebo více parametrů střídavého (AC) přenosového systému.

Zařízení a kontroléry FACTS se staly běžným pojmem v elektroenergetice a postupně začaly získávat své místo v nových instalacích i při náhradách stávajících mechanických regulačních prostředků. Zcela jistě začínají hrát stále významnější roli při provozu a řízení elektrizačních soustav současnosti i budoucnosti. Systémy FACTS řeší zejména regulaci napětí a jalových výkonů, regulaci výkonových toků a stabilitu sítí. Řešení pomocí FACTS systémů je vhodné všude tam, kde aplikace vyžaduje některý z těchto atributů:

- rychlá odezva na požadavek
- častá změna výstupu
- plynule nastavitelný výstup

Výhody použití zařízení FACTS v elektrizačních soustavách lze shrnout následovně:

- lepší využití stávajících zařízení přenosových soustav
- zvýšení spolehlivosti a dostupnosti přenosové soustavy
- zvýšení dynamické stability soustavy a omezení kruhových toků
- zvýšení kvality dodávky pro citlivé odběry
- ekologické přínosy

Pro většinu problémů v soustavách existují řešení klasická i pomocí FACTS aplikací. FACTS zařízení jsou vyžadována tam, kde je potřeba rychle reagovat na dynamicky se měnící podmínky v soustavě, zatímco klasická řešení jsou obvykle levnější, ale limitována svými dynamickými vlastnostmi. První FACTS instalace ve světě byly zprovozněny již před cca 30 lety a jejich současný instalovaný výkon se pohybuje v řádu desítek tisíc MVar ve stovkách instalací po celém světě. Ačkoliv primární použití těchto systémů spadá do oblasti elektroenergetiky, nacházejí svá

uplatnění také v jiných odvětvích průmyslu u spotřeby, pro regulaci napětí v trakčních systémech či ve výzkumných centrech.

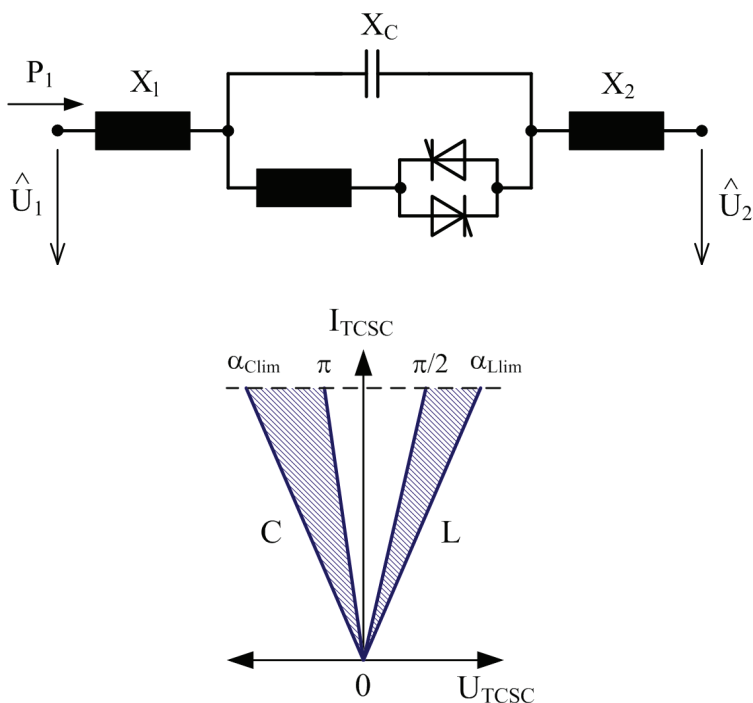
Dále uváděné provozní charakteristiky jsou platné při dodržení stejných předpokladů jako v kapitole 2, tj. bezeztrátové vedení, koncová napětí o stejné amplitudě, umístění FACTS zařízení uprostřed linky (není-li uvedeno jinak). Základní přehled FACTS zařízení lze nalézt např. v [1], [2], [3], [4], [5].

### 3.1. BSC, BSR

Spínaný kondenzátor (breaker switched capacitor = BSC) a spínaná tlumivka (breaker switched reactor = BSR) bývají připojeny paralelně. Tato zařízení umožňují dodávat jalový výkon pomocí kondenzátoru nebo ho odebírat pomocí tlumivky, a tak mají významný vliv na napětí v bodě připojení. Sériově připojená zařízení umožňují měnit impedanci přenosové linky, a tím mají přímý vliv na přenosovou schopnost. Tato zařízení mohou být do systému připojena trvale nebo pomocí spínacích zařízení, což nabízí dispečerům flexibilitu v přizpůsobení jalového výkonu požadavkům soustavy. Obvykle jsou navržena tak, že mohou být spínána na nejvýš několikrát za den. Jejich činnost je omezena stupňovitými regulačními charakteristikami.

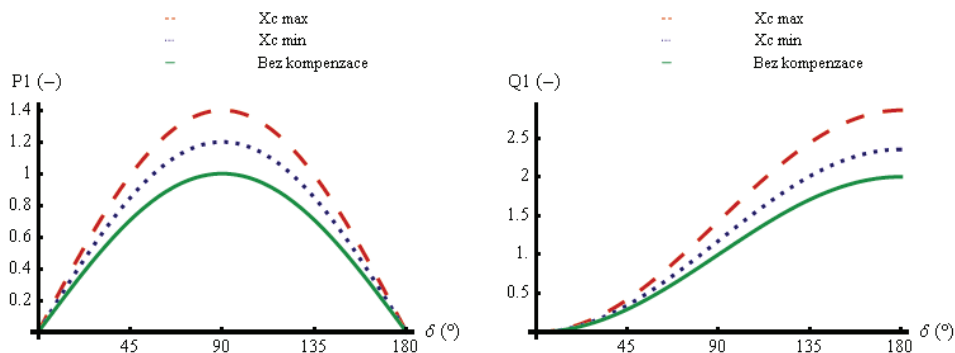
### 3.2. TCSC

Tyristorově řízený sériový kondenzátor (thyristor-controlled series capacitor = TCSC) je sériově připojená paralelní kombinace pevného kondenzátoru a tyristorově řízené tlumivky. Tato kombinace umožňuje plynulou regulaci kapacitní reaktance pro základní harmonickou v širokém rozsahu. Velikost celkové reaktance je určena řídicím úhlem tyristorů ve dvojsměrném ventilu. Tlumivka bývá vzduchová a jako ochrana proti přepětí na kondenzátoru je připojeno přemostění přes varistor. Řídicím parametrem ovlivňujícím tok výkonu je celková reaktance TCSC. Základní konfigurace je na *obr. 3.1*. V-A pracovní oblast je omezena maximálním dovoleným proudem a limitními hodnotami řídicího úhlu při spínání tyristorových ventilů. Pro sériově připojené zařízení zahrnuje jednu polaritu proudu (procházející síťový) a vzhledem k možnosti induktivního nebo kapacitního charakteru výsledné impedanace obojí polaritu sériově injektovaného napětí. Je rozdělena na dvě části, které vycházejí z možností realizovat příslušnou admitanci (impedanci) instalovanými kondenzátory a tlumivkami a dovoleným spínáním tyristorových ventilů – řídicí úhel  $\alpha$  (viz. kap. 4.3).



**Obr. 3.1: TCSC a jeho V-A pracovní oblast**

Provozní charakteristiky na *obr. 3.2* přímo plynou ze vztahů (2.3) a (2.5) změnou podélné reaktance díky sériovému spojení vedení a TCSC.



**Obr. 3.2: Provozní charakteristiky TCSC**

TCSC je schopen řídit tok činného výkonu po vedení velmi rychle, proto je používán pro řízení výkonových toků a tlumení elektromechanických oscilací v systému. V případě úplného uzavření tyristorových ventilů prochází proud pouze kondenzátorem a TCSC pracuje jako pevně připojená kapacita. Naopak při úplném otevření ventilů je do série s linkou připojena minimální kapacitní reaktance  $X_C$  a

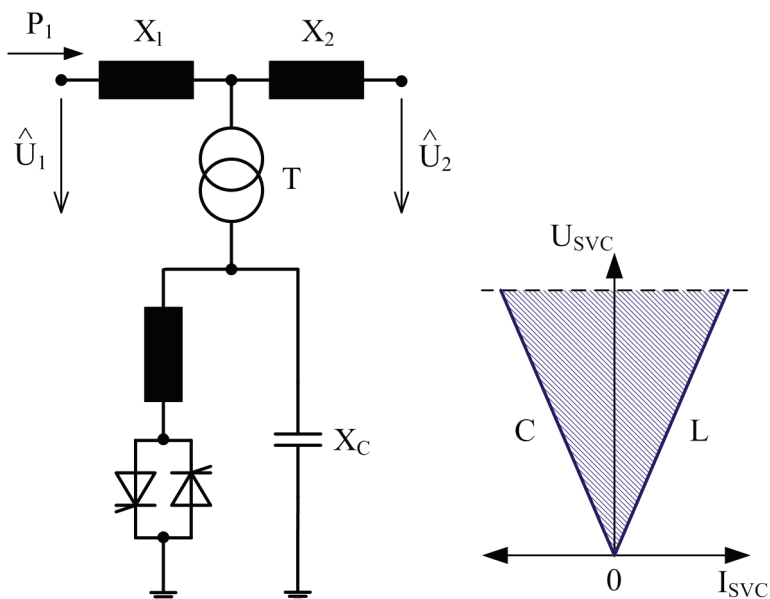
kondenzátorem prochází nejmenší proud, což je vhodné při přetížení a poruchách jako ochrana proti napěťovému přetížení kondenzátoru.

### 3.3. SVC

Statický VAR kompenzátor (static VAR compensator = SVC) je kombinace pevných kondenzátorů (BSC), tyristorově spínaných kondenzátorů (thyristor-switched capacitor = TSC), tyristorově spínaných tlumivek (thyristor-switched reactor = TSR) a tyristorově řízených tlumivek (thyristor-controlled reactor = TCR) připojených paralelně k soustavě většinou přes zvyšovací transformátor. TCR je realizována jako pevná tlumivka obvykle se vzduchovým jádrem spojená do série s dvojsměrným tyristorovým ventilem, který pomocí fázového řízení mění proud protékající tlumivkou. Konstrukce TSR a TSC je podobná TCR, ale tyristorový ventil není regulován plynule, nýbrž připíná a odpíná tlumivku, resp. kondenzátor po celých násobcích půlperiod napětí. V tomto případě nejsou tedy reaktanční prvky řízeny fázově, ale jsou připínány jejich celé jmenovité hodnoty. Výhodou TSR a TSC oproti TCR je fakt, že tyristorové měniče neprodukují žádné vyšší harmonické proudy. Je vhodné poznamenat, že v obvodech TSC je v sérii s kondenzátorem a tyristorovým ventilem ještě tlumivka, která omezuje proudy v případě mimořádných podmínek a zároveň může sloužit k ladění filtru na příslušnou frekvenci.

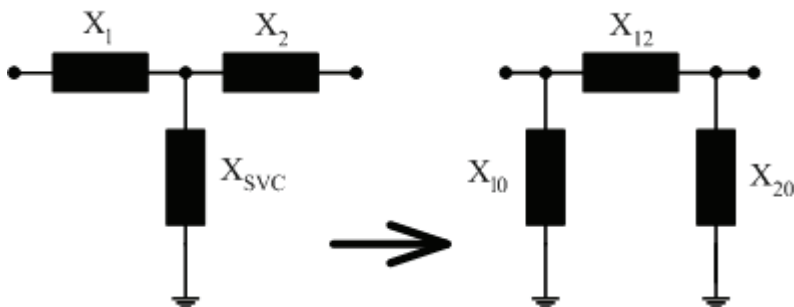
Jalový výkon dodávaný nebo odebíraný SVC je vyráběn nebo absorbován pasivními reaktančními prvky. Řídicím parametrem v tomto zařízení je jeho kapacitní reaktance, která může být spojitě nastavitelná. Když SVC dosáhne svého kapacitního nebo induktivního limitu, chová se jako paralelní kondenzátor nebo tlumivka. Základní konfigurace je na *obr. 3.3*.

Pracovní rozsah SVC je určen impedancemi tlumivek, kondenzátorů a případných zvyšovacích transformátorů. Voltampérová pracovní oblast paralelně připojeného zařízení obsahuje jednu polaritu napětí, ke kterému je zařízení připojeno a díky možnému dvojímu charakteru impedance obsahuje obě polarity kompenzačního jalového proudu. V-A pracovní oblast na *obr. 3.3* je základem pro V-A charakteristiku (viz. *obr. 4.9*), která má dvě různé provozní oblasti. Uvnitř řídicího rozsahu je napětí regulovatelné s přesností danou sklonem charakteristiky. Vně řídicího rozsahu se jedná o charakteristiku čisté kapacity pro nízká napětí a čisté indukčnosti pro velká napětí, tj. konstantní admitance příslušného typu. Maximální kompenzační proud je tedy přímo úměrný napětí sítě a dodávaný, resp. absorbovaný jalový výkon je úměrný kvadrátu napětí.



**Obr. 3.3: SVC a jeho V-A pracovní oblast**

Pro určení provozních charakteristik na základě vztahů (2.3) a (2.5) je vhodné si převést základní uspořádání připojení SVC dle obr. 3.3, což je v podstatě zapojení do hvězdy, na ekvivalentní zapojení do trojúhelníku (viz. obr. 3.4).

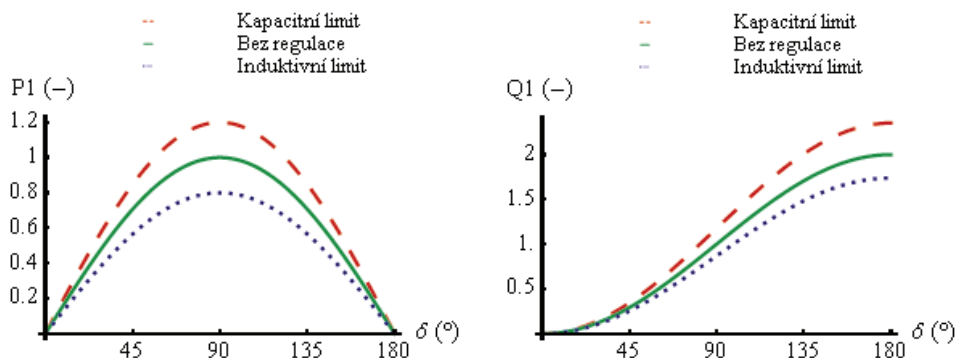


**Obr. 3.4: Transfigurace vedení s SVC**

Vztahy pro přenos činného a jalového výkonu pak v sobě zahrnují reaktanci  $X_{12}$ , pro kterou platí:

$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_{SVC}}{X_1 \cdot X_2} \quad (3.1)$$

Bude-li reaktance SVC induktivní, dojde k nárůstu celkové reaktance mezi koncovými body vedení, a tím k poklesu činného výkonu. Bude-li reaktance SVC kapacitní ( $X_{SVC} < 0$ ), celková reaktance přenosu poklesne a činný výkon vzroste.



**Obr. 3.5: Provozní charakteristiky SVC**

SVC je instalováno za účelem následujících funkcí:

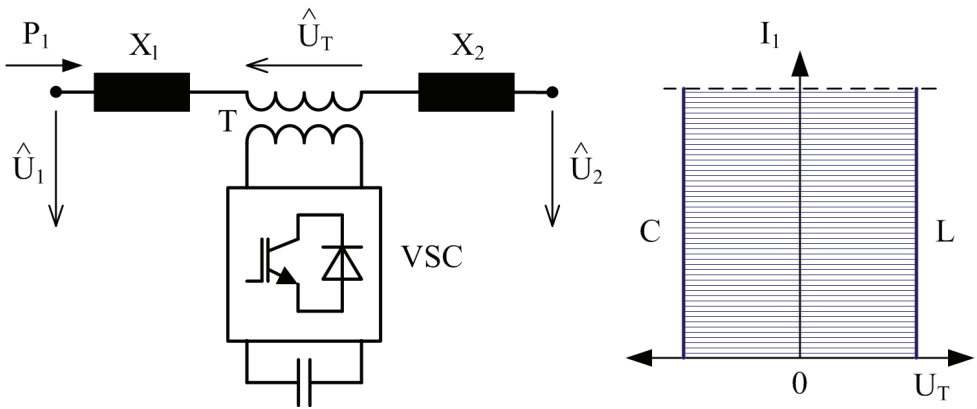
- dynamická stabilizace napětí (zvýšení přenosové schopnosti, omezení kolísání napětí)
- zlepšení stability systému (zvýšení dynamické stability, zlepšené tlumení při kývání)
- vyrovnávání dynamického zatížení
- podpora napětí v ustáleném stavu

SVC bývá instalována ve třech základních typech oblastí. Jednak ve *významných centrech spotřeby*, kde tlumí rušivé vlivy sítě na citlivé odběry, kompenzuje výkyvy napětí vlivem poruch v síti i proměnlivého zatížení v průběhu denního cyklu a při výkonových špičkách může zabránit napětovému kolapsu. Dále se jedná o *kritické uzly v soustavách*, které mají velkou napětovou citlivost, zde mohou také tlumit kývání v systémech. Další možností je instalace v *napájecích bodech velkých průmyslových závodů*, kde slouží k omezení rušivých vlivů průmyslové výroby (např. obloukové pece) na okolní spotřebu, která by jinak trpěla sníženou kvalitou elektrické energie.

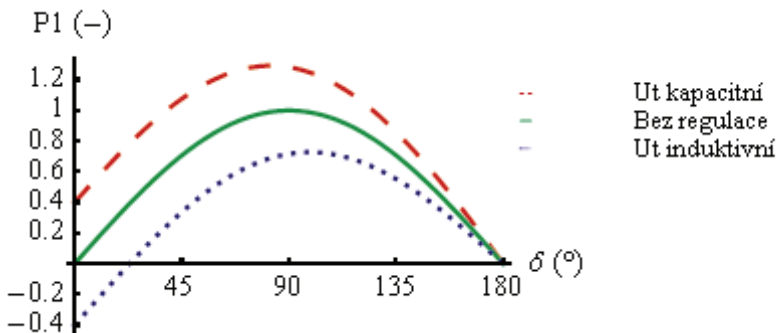
### 3.4. SSSC

Statický synchronní sériový kompenzátor (static synchronous series compensator = SSSC) využívá trojfázový měnič (voltage source converter = VSC) s vypínatelnými součástkami výkonové elektroniky tak, že je schopen dodávat nebo absorbovat jalový výkon. Řídicím parametrem je sériově vstřikované napětí  $U_T$ , které je do systému dodáno většinou pomocí přídavného transformátoru. Základní konfigurace je na *obr. 3.6*.

Jestliže stejnosměrná větev obsahuje zdroj, je SSSC schopen se soustavou vyměňovat činný i jalový výkon a u vstřikovaného napětí  $U_T$  může být regulována amplituda i fáze. Při čisté kompenzaci jalového výkonu je regulovatelná pouze amplituda napětí, protože fázor vstřikovaného napětí musí být kolmý na proud protékající vedením. V tomto případě sériové vstřikované napětí bude předbíhat proud, nebo se za ním zpožďovat, o  $90^\circ$  a jeho amplituda může být plynule regulovatelná v mezích provozního rozsahu VSC. SSSC se tak chová podobně jako říditelná kapacita nebo indukčnost zařazená sériově s vedením. Hlavním rozdílem oproti TCSC ovšem je, že velikost vstřikovaného napětí  $U_T$  nezávisí na proudu vedením a může být říditelná nezávisle. Tato důležitá vlastnost znamená, že SSSC může být efektivně provozována při nízkém i vysokém zatížení systému. Za zmínku však rovněž stojí fakt, že přídavný transformátor mírně snižuje účinnost SSSC, protože do cesty zavádí svoji přídavnou reaktanci, což může být v budoucnu vyřešeno používáním zařízení bez transformátoru.



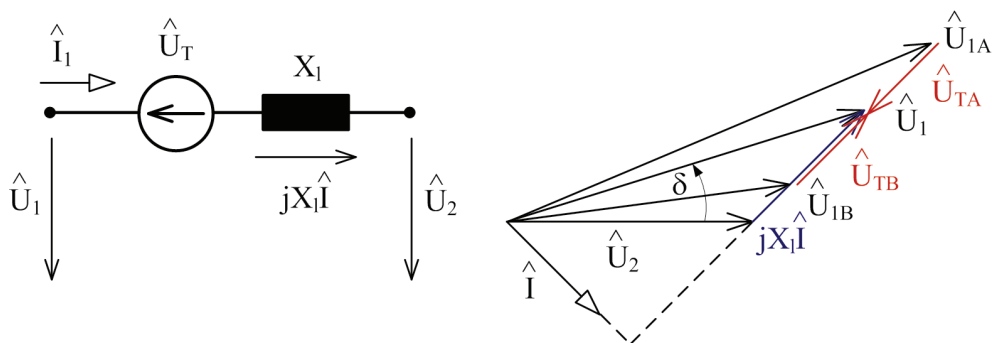
Obr. 3.6: SSSC a jeho V-A pracovní oblast



Obr. 3.7: Provozní charakteristiky SSSC

Pracuje-li SSSC v induktivním módu, dochází ke zvětšování zátěžného úhlu mezi koncovými napětími linky, v kapacitním módu je tomu naopak (při konstant-

ním proudy). V případě čisté induktivní kompenzace musí platit  $U_T < jX_1 I$ , jinak by nastal zpětný tok činného výkonu. Poměry při čisté reaktivní kompenzaci znázorňuje obr. 3.8, index A odpovídá L módu, index B odpovídá C módu.



**Obr. 3.8: Sériová kompenzace SSSC**

Obecné aplikace SSSC jsou následující:

- dynamické řízení výkonových toků
- tlumení elektromechanických oscilací
- zlepšení napěťové stability
- zlepšení úhlové stability

Čistě jalovou kompenzací lze řídit cíleně tok činného výkonu, jak plyne z předchozí úvahy. Jalový výkon bude pochopitelně také změněn, ale jeho velikost je již pevně svázána s výkonem činným na základě výkonových charakteristik.

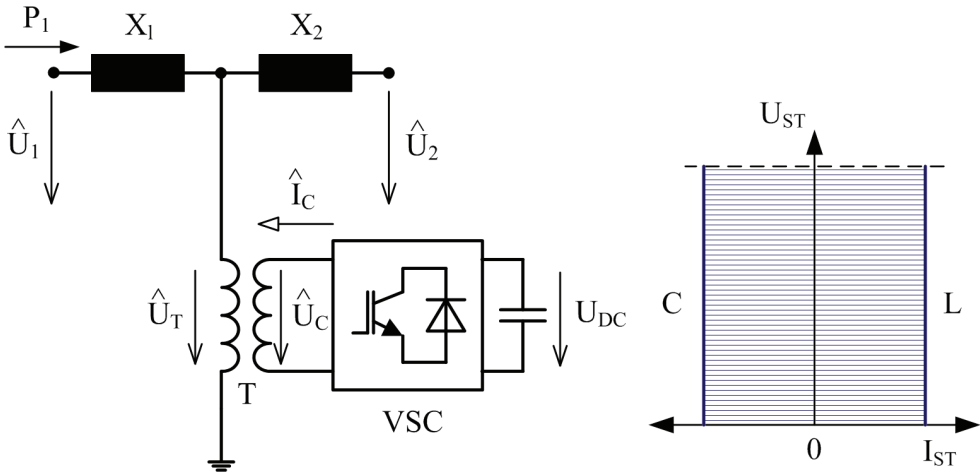
Obsahuje-li stejnosměrný obvod měniče i zdroj činného výkonu, je rovněž možné kompenzovat podélný odpor přenosové linky. Pak svírá vstřikované sériové napětí  $U_T$  s protékajícím proudem jiný úhel než  $90^\circ$ . Činné ztráty na odporu vedení samozřejmě při konstantním proudu zůstanou nezměněny, ale jejich část je hrazena právě ze stejnosměrného zdroje. Takovýmto generováním napětí je možné na přenosové lince nezávisle řídit přenášený činný i jalový výkon současně.

### 3.5. STATCOM

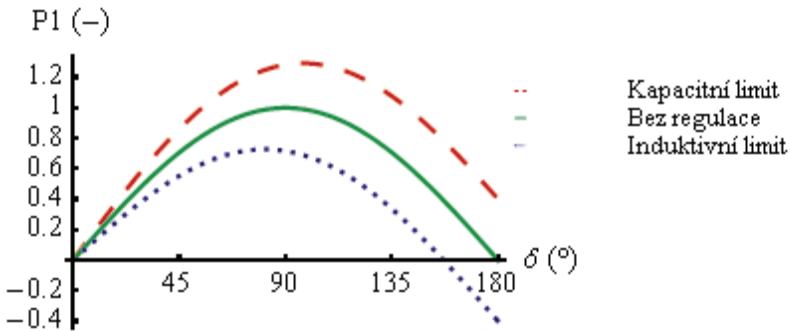
Statický synchronní kompenzátor (static synchronous compensator = STATCOM) využívá trojfázový měnič VSC podobně jako SSSC, vazební transformátor a stejnosměrnou větev. Pracuje podobně jako SVC, ale má lepší provozní charakteristiky. Ve srovnání s SVC nevyžaduje velké induktivní nebo kapacitní prvky pro dodávku jalového výkonu, takže má menší nároky na prostor. Jalový výkon je dodáván nebo absorbován pomocí vlastního měniče díky jeho spínacím režimům a reaktanční prvky ve stejnosměrné větvi slouží pouze k akumulaci energie při spínání. STATCOM dokáže dodávat konstantní jalový proud téměř v celém regulačním rozsahu nezávisle na napětí v místě připojení a jeho maximální jalový výkon je tedy lineárně závislý na napětí. Řídicím parametrem STATCOM je jeho jalový proud. V-A pracovní oblast je tak omezena pouze maximálním dovoleným



proudem a napětím zařízení. Základní konfigurace je na obr. 3.9. Provozní charakteristiky na obr. 3.10 pak odpovídají konstantnímu kompenzačnímu proudu  $\hat{I}_C$ .



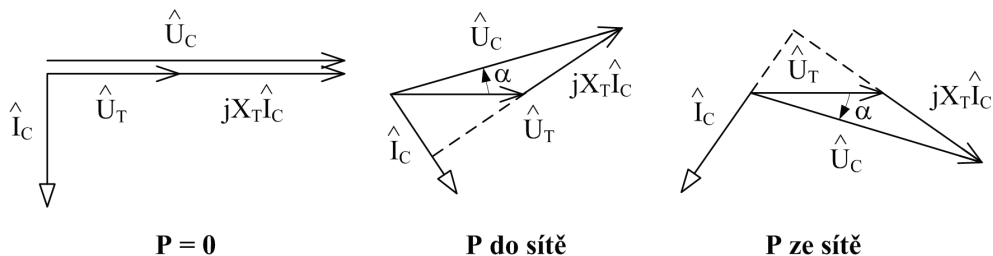
**Obr. 3.9: STATCOM a jeho V-A pracovní oblast**



**Obr. 3.10: Provozní charakteristiky STATCOM**

Je-li ve stejnosměrné větvi pouze kapacita, může být mezi STATCOM a systémem vyměňován pouze jalový výkon. Výstupní proud měniče  $\hat{I}_C$  je pak kolmý na napětí měniče  $\hat{U}_C$ . (Vše za předpokladu zanedbání ztrát měniče a transformátoru, které musejí být v reálu kryty činným výkonem tekoucím ze soustavy do měniče.) Amplituda  $\hat{U}_C$  i jalový výkon jsou říditelné. Je-li amplituda napětí měniče větší než napětí systému  $U_C > U_T$ , STATCOM dodává do systému jalový výkon (C mód). V opačném případě  $U_C < U_T$  STATCOM absorbuje jalový výkon dodaný ze systémem (L mód). Při rovnosti napětí  $U_C = U_T$  nedochází k výměně jalového výkonu. Jestliže bude ve stejnosměrné větvi instalován zdroj, může mezi systémem a

STATCOM docházet i k výměně činného výkonu. Možnosti dodávky (odběru) činného výkonu jsou znázorněny na obr. 3.11. Směr toku činného výkonu mezi STATCOM a soustavou je určen úhlem mezi fázory  $\hat{U}_C$  a  $\hat{U}_T$ .

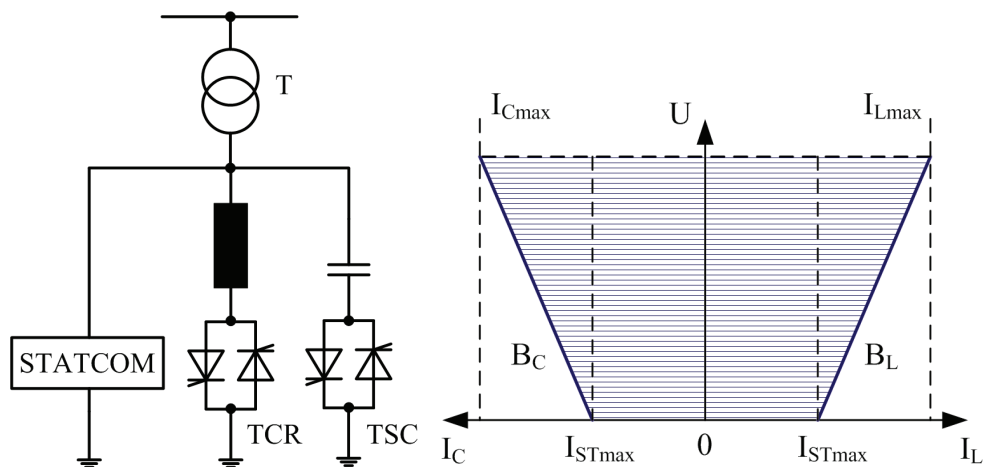


**Obr. 3.11: Regulace činného výkonu STATCOM (C mód)**

Základními funkcemi STATCOM jsou:

- dynamická stabilizace napětí (zvýšení přenosové schopnosti, omezení kolísání napětí)
- zlepšení stability systému (zvýšení dynamické stability, zlepšené tlumění při kývání)
- vyrovnávání dynamického zatížení
- podpora napětí v ustáleném stavu
- zlepšení kvality elektrické energie

Pracovní oblast paralelní kompenzace lze rozšířit pomocí kombinovaného zapojení STATCOM a některých součástí SVC (TCR, TSC) – viz. obr. 3.12. TSC způsobí skokový posun pracovní oblasti, TCR naopak plynulé rozšíření proudového rozsahu.



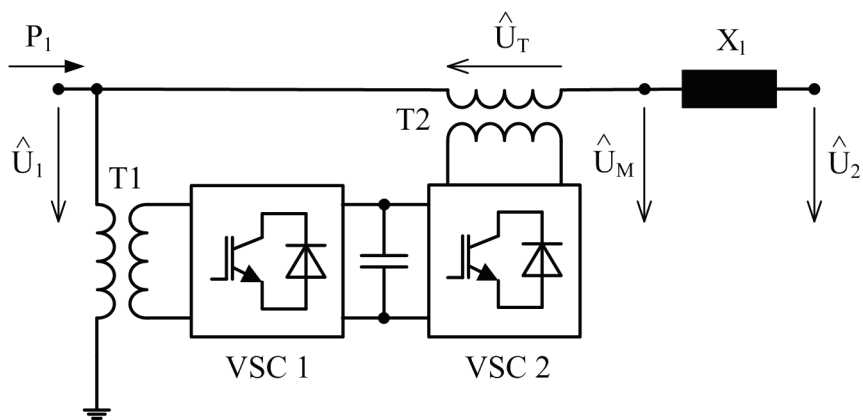
**Obr. 3.12: Kombinovaná paralelní Var kompenzace**

### 3.6. UPFC

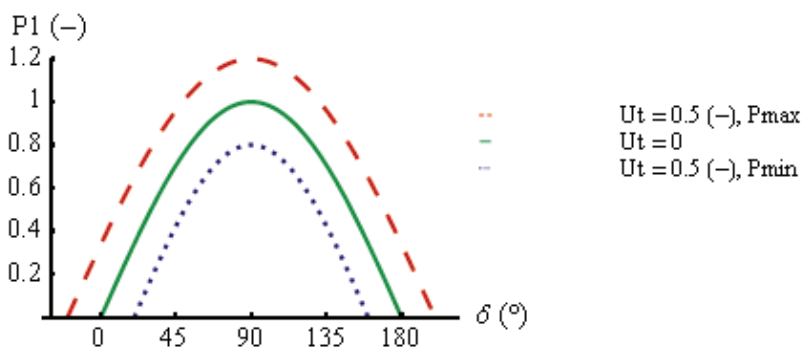
Univerzální regulátor výkonových toků (unified power flow controller = UPFC) je jedno z nejkompexnějších zařízení FACTS využívaných v elektroenergetice. Je využíváno především pro nezávislé řízení činného a jalového výkonu v přenosových linkách pro účely možného flexibilního, spolehlivého a ekonomického provozu a zatěžování elektrizační soustavy. Umožňuje souběžné a nezávislé řízení všech čtyř parametrů, které ovlivňují tok výkonu po vedení ( $U_1$ ,  $U_2$ ,  $X_1$ ,  $\delta$ ). UPFC je v podstatě schopen vykonávat funkce jiných FACTS systému popsaných výše, zejména regulaci napětí, řízení výkonových toků a zlepšení stability.

UPFC se skládá z paralelního (budicího) a sériového (přídavného) transformátoru. Oba transformátory jsou spojeny dvěma měniči VSC se společným stejnosměrným meziobvodem realizovaným pomocí kondenzátoru (back-to-back spojení). Topologicky se jedná o spojení STATCOM a SSSC, funkčně se však oproti těmto systémům objevují nové možnosti. Jedním z rozdílů mezi UPFC a PST je fakt, že jalový výkon UPFC vstřikovaný do vedení sériovou větví nemusí být přenášen z paralelní větve. Kromě toho jalový výkon nemůže protékat přes stejnosměrný meziobvod, ale je generován nebo absorbován lokálně každým měničem zvlášť a nezávisle. Činný výkon vstřikovaný do systému sériovou větví musí být odebrán ze systému pomocí paralelní větve a přenášen do sériové větve přes stejnosměrný meziobvod. Jalový výkon paralelní větve může být navíc řízen stejně jako u STATCOM, tj. nezávisle na poměrech v uzlu připojení. Paralelní měnič může generovat jalový proud tak, aby napětí uzlu  $U_1$  bylo drženo na požadované hodnotě. Pak měnič pracuje v *režimu řízení napětí*. Paralelní jalový proud může rovněž odpovídat požadovanému induktivnímu nebo kapacitnímu jalovému výkonu, pak měnič pracuje v *režimu řízení jalového výkonu*.

Sériový měnič vstřikuje střídavé napětí  $\hat{U}_T = U_T \cdot e^{j(\delta_1 + \varphi_T)}$ , které může mít libovolnou fázi  $0 < \varphi_T < 360^\circ$  vzhledem ke vstupnímu napětí  $\hat{U}_1$  a libovolnou amplitudu v rozsahu  $0 < U_T < U_{Tmax}$ , který odpovídá dimenzování UPFC. Sériový měnič tedy může pracovat ve všech čtyřech kvadrantech a řídit nezávisle činný a jalový výkon linky. Řídicími parametry UPFC jsou amplituda a fáze vstřikovaného napětí  $\hat{U}_T$  a amplituda jalového proudu paralelní větve. Základní konfigurace je na obr. 3.13.



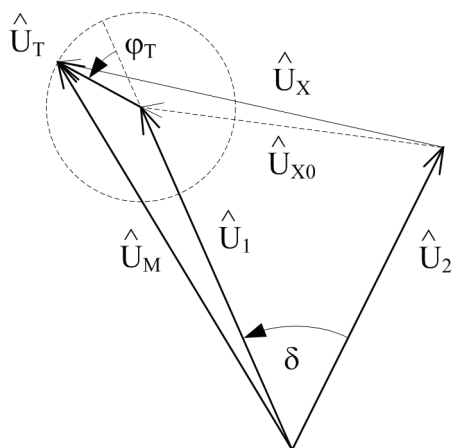
Obr. 3.13: UPFC



Obr. 3.14: Provozní charakteristiky UPFC

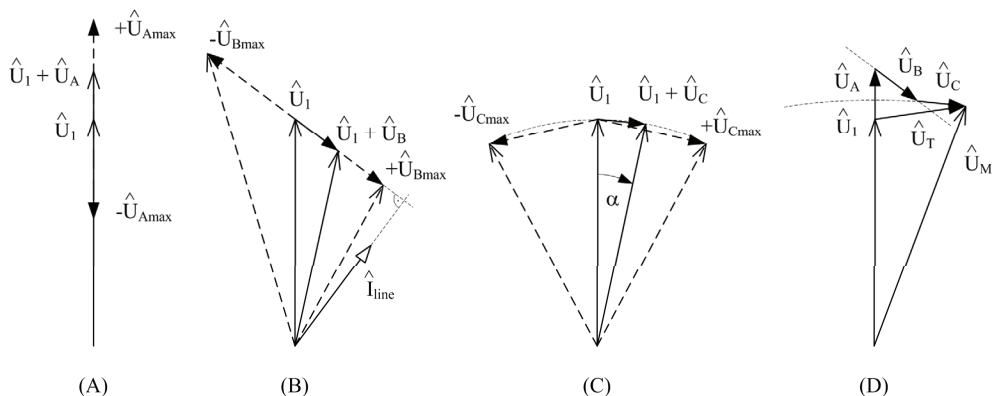
### 3.6.1. Provozní režimy UPFC a řízení výkonů

Vstřikování sériového napětí  $\hat{U}_T$  do systému je znázorněno na fázorovém diagramu na obr. 3.15. [6]



**Obr. 3.15: Fázorový diagram UPFC**

Protože UPFC je flexibilní zařízení, může pracovat v několika základních provozních režimech daných sériovým vstřikováním napětí, které jsou schopny provozovat jiná zařízení FACTS. Výsledné napětí  $\hat{U}_T$  vstřikované do systému sériovým měničem může vůči uzlovému napětí  $\hat{U}_1$  nabývat několik základních poloh podle provozního režimu, viz. obr. 3.16.



**Obr. 3.16: Fázorové diagramy provozních režimů UPFC**

Sériový měnič může pracovat v těchto režimech:

- a) Regulace napětí

Amplituda napětí na začátku linky může být zvýšena (snížena), jestliže vstřikované napětí  $\hat{U}_A$  je ve fázi (v protifázi) s původním napětím  $\hat{U}_1$  ( $\varphi_T = 0$ ).

- b) Sériová kompenzace

Kompenzace podélné reaktance vedení lze dosáhnout vstřikováním napětí

$\hat{U}_B$ , které je kolmé na protékající proud  $\hat{I}_{line}$ . Efektivní úbytek napětí na podélné reaktanci vedení  $X_1$ , tj. úbytek napětí mezi  $\hat{U}_1$  a  $\hat{U}_2$ , je navýšen (snížen), jestliže napětí  $\hat{U}_B$  se o  $90^\circ$  zpožďuje za proudem  $\hat{I}_{line}$  (o  $90^\circ$  předbíhá proud  $\hat{I}_{line}$ ). Podle požadavků je možné vstříkovat napětí  $\hat{U}_B$  nezávisle na protékajícím proudem obdobně jako u SSSC nebo úměrně proudem obdobně jako u TCSC.

c) Fázové řízení

Požadovaného fázového natočení je dosaženo při vstříknutí napětí  $\hat{U}_C$ , které vyvolá změnu úhlu napětí  $\hat{U}_1$  o  $\pm\alpha$ , ale nezmění jeho amplitudu.

d) Řízení výkonových toků

Možnost souběžného řízení uzlového napětí, sériové impedance i fázového natočení dovoluje UPFC zastávat roli vícefunkčního systému pro řízení výkonů. Amplituda a fáze sériového vstříkovaného napětí  $\hat{U}_T = \hat{U}_A + \hat{U}_B + \hat{U}_C$  je poté zvolena tak, aby celkový proud vedením odpovídal požadavkům na tok činného i jalového výkonu přenosovou linkou.

S klasickými kompenzačními prostředky by nebylo možné realizovat režim automatického řízení výkonových toků, jak je naznačeno pro UPFC. V obvodu podle obr. 3.13 je zdánlivý výkon na konci vedení dán:

$$\hat{S}_2 = \hat{U}_2 \hat{I}_2^* = \hat{U}_2 \left( \frac{\hat{U}_1 + \hat{U}_T - \hat{U}_2}{jX} \right)^* \quad (3.2)$$

Odtud je možné odvodit následující vztahy pro činný a jalový výkon na konci vedení v závislosti na úhlu přenosu  $\delta$  a relativní fázi  $\varphi_T$  sériového vstříkovaného napětí:

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{U_1 U_2}{X_1} \sin \delta + \frac{U_2 U_T}{X_1} \sin(\delta + \varphi_T) = P_0(\delta) + P_T(\delta, \varphi_T) \\ Q_2 &= \frac{U_1 U_2}{X_1} \cos \delta - \frac{U_2^2}{X_1} + \frac{U_2 U_T}{X_1} \cos(\delta + \varphi_T) = Q_0(\delta) + Q_T(\delta, \varphi_T) \end{aligned} \quad (3.3)$$

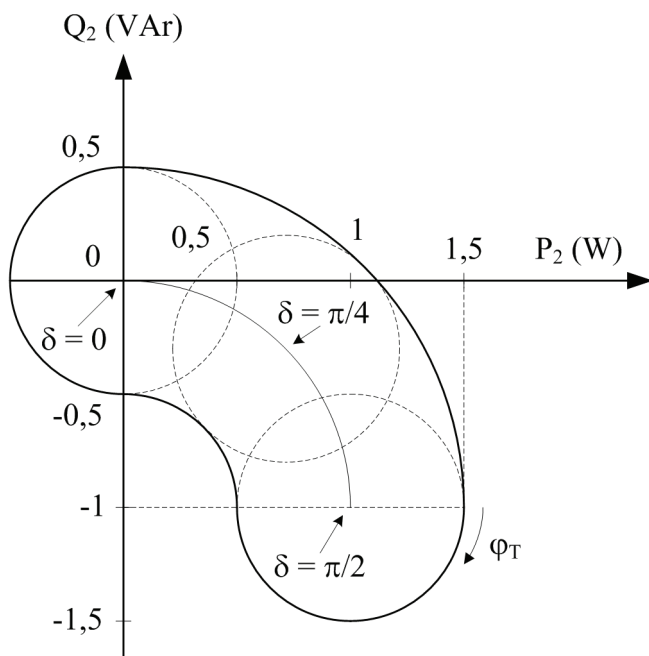
Pro  $U_T = 0$  jsou uvedené rovnice samozřejmě identické se vztahy (2.3) a (2.4), které byly odvozeny pro nekompenzovaný systém. Protože amplituda sériového vstříkovaného napětí UPFC může být řízena v rozsahu od 0 do  $U_{Tmax}$  a jeho fáze v rozsahu od 0 do  $360^\circ$  při jakémkoliv úhlu přenosu  $\delta$ , mohou být činný a jalový výkon řízeny v těchto mezích:

$$\begin{aligned}
 P_2(\delta) &\in \left\langle P_0(\delta) - \frac{U_2 U_{T\max}}{X_1}, P_0(\delta) + \frac{U_2 U_{T\max}}{X_1} \right\rangle \\
 Q_2(\delta) &\in \left\langle Q_0(\delta) - \frac{U_2 U_{T\max}}{X_1}, Q_0(\delta) + \frac{U_2 U_{T\max}}{X_1} \right\rangle
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

Výkonové charakteristiky  $P(\delta)$  a  $Q(\delta)$  jsou pak z charakteristik nekompenzovaného systému snadno rozšiřitelné o  $P_{T\max}$ , resp.  $Q_{T\max}$ , pro obě polarity výkonů. Nezávisle na úhlu přenosu  $\delta$  je tak možné  $P$  i  $Q$  zvýšit či snížit o konstantní hodnotu. Toto je zřejmé i z grafu na *obr. 3.14*. Vzhledem k libovolnému natočení  $\varphi_T$  lze však  $P$  a  $Q$  měnit nezávisle, jak plyne i z dalších úvah v  $P$ - $Q$  rovině.

Rotací fázoru sériového vstřikovaného napětí s efektivní hodnotou  $U_{T\max}$  od 0 do  $360^\circ$  je umožněno řídit činný a jalový výkon po hraniční kružnici o poloměru  $\frac{U_2 U_{T\max}}{X_1}$  a se středem  $(P_0(\delta), Q_0(\delta))$ . Tato kružnice je určena následující rovnicí:

$$(P_T(\delta, \varphi_T) - P_0(\delta))^2 + (Q_T(\delta, \varphi_T) - Q_0(\delta))^2 = \left( \frac{U_2 U_{T\max}}{X_1} \right)^2
 \tag{3.5}$$



**Obr. 3.17: P-Q kružnice s regulací UPFC**

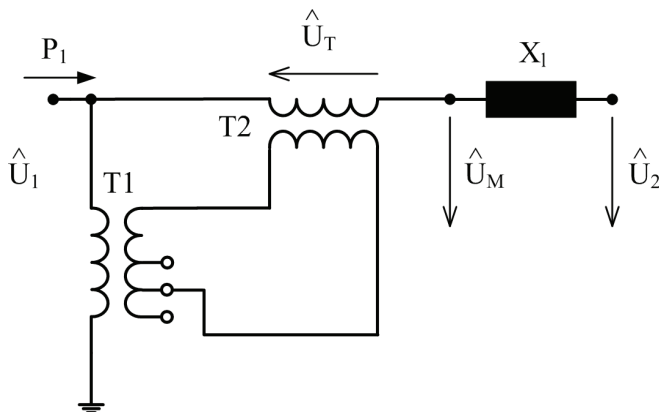
Obr. 3.17 ukazuje P-Q diagram výkonů na konci vedení s vyznačenými oblastmi říditelnými pomocí UPFC, vše pro stejné parametry jako na obr. 2.3 a  $U_2 U_{T_{\max}} / X_1 = 0,5$ . Schopnost UPFC řídit činný a jalový výkon je evidentně nezávislá na úhlu přenosu.

### 3.7. Transformátor s regulací napětí a fáze (PST, PAR)

Transformátory s regulací napětí a fáze (Phase-shifting transformers = PST; Phase-angle regulators = PAR) jsou transformátory s komplexním převodem. Jsou používány zejména k řízení výkonových toků na přenosových vedeních. Na rozdíl od jiných typů sériové kompenzace dokáží měnit fázový rozdíl mezi koncovými napětími linky, což může být pro ovlivňování výkonových toků velmi klíčové. Každý takový transformátor se skládá z paralelního regulačního transformátoru a sériového přidavného transformátoru. Fázového rozdílu mezi hlavními vývody je dosaženo připojením přidavného transformátoru do série s přenosovou linkou. Činné i jalové výkony vstřikované do přenosové linky musejí být odebrány ze sítě pomocí paralelního transformátoru a přesměrovány do přidavného transformátoru. Princip činnosti způsobuje, že i přes jejich malý jmenovitý výkon dokážou řídit toky relativně velkých výkonů. Základní konfigurace je na obr. 3.18.

Obecně lze konstatovat, že vstřikování napětí sériovým transformátorem ve fázi se svorkovým napětím v uzlu vyvolá změnu amplitudy napětí a slouží k řízení jalového výkonu. Naopak vstřikování kolmo na uzlové napětí vede zejména ke změně fáze napětí a tedy k řízení činného výkonu. Kombinace obou způsobů je samozřejmě také možná.

Vstřikování sériového napětí je vždy založeno na přidání vhodné části uzlového napětí právě k tomuto napětí směrem do přenosové linky. V případě vstřikování ve fázi je k uzlovému napětí přičtena příslušná část téhož fázového napětí, v případě kolmé vstřikování se jedná o přičtení části sdruženého napětí. Například k fázovému napětí  $U_a$  je vzhledem ke kolmosti přičtena část napětí  $U_{bc}$ . Z hlediska dimenzování musí transformátor vydržet průchozí výkon daný maximálním vstřikovaným napětím a proudem tekoucím po vedení  $S_{\max} = U_{T_{\max}} \cdot I$ .



Obr. 3.18: Transformátor s regulací napětí a fáze



Pomocí různé konstrukce PST lze dosáhnout dvou základních provozních režimů. První možností je vstřikování přídavného sériového napětí  $\hat{U}_T$  s konstantním fázovým posuvem vůči napětí  $\hat{U}_1$ , ale s různou svojí amplitudou regulovanou pomocí přepínače odboček. Potom dochází ke změně fázového rozdílu mezi koncovými napětími linky  $\hat{U}_M$  a  $\hat{U}_2$  (tj. úhel přenosu) a amplitudy  $\hat{U}_M$ . Je-li  $\alpha = 90^\circ$ , mluvíme o tzv. kolmé regulaci a typu transformátoru QBT (Quadrature booster transformer), který je nejčastějším používaným typem PST. Řídicím parametrem je pak amplituda  $U_T$ .

Pro relativně malé změny je výsledný fázový posun přibližně přímo úměrný vstřikovanému napětí  $U_T$ , zatímco amplituda napětí zůstává téměř beze změny. Nicméně pro větší napětí  $U_T$  dochází k výraznějšímu nárůstu amplitudy uzlového napětí ( $\hat{U}_M = \hat{U}_1 + \hat{U}_T$ ,  $U_M = \sqrt{U_1^2 + U_T^2}$ ). Výkonové rovnice lze pro začátek linky odvodit obdobně jako pro UPFC definováním přenášeného zdánlivého výkonu mezi QBT a začátkem linky:

$$\hat{S}_1 = \hat{U}_M \hat{I}_1^* = (\hat{U}_1 + \hat{U}_T) \left( \frac{\hat{U}_1 + \hat{U}_T - \hat{U}_2}{jX} \right)^* \quad (3.6)$$

Odtud lze odvodit a pro konstantní napětí obou konců vedení  $U_1 = U_2 = U$  upravit:

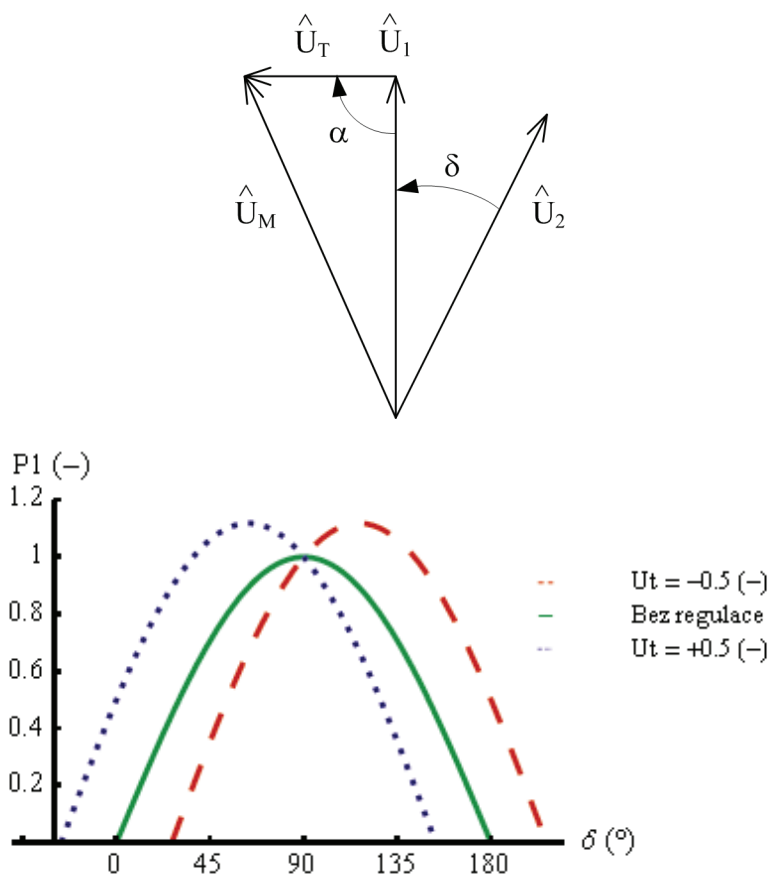
$$P_1 = \operatorname{Re}\{\hat{S}_1\} = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta + \frac{U_T U_2}{X} \sin \left( \frac{\pi}{2} + \delta \right) \quad (3.7)$$

$$P_1 = \frac{U^2}{X} \sin \delta + \frac{U_T U}{X} \cos \delta$$

$$Q_1 = \operatorname{Im}\{\hat{S}_1\} = \frac{U_1^2}{X} + \frac{U_T^2}{X} - \frac{U_1 U_2}{X} \cos \delta - \frac{U_T U_2}{X} \cos \left( \frac{\pi}{2} + \delta \right) \quad (3.8)$$

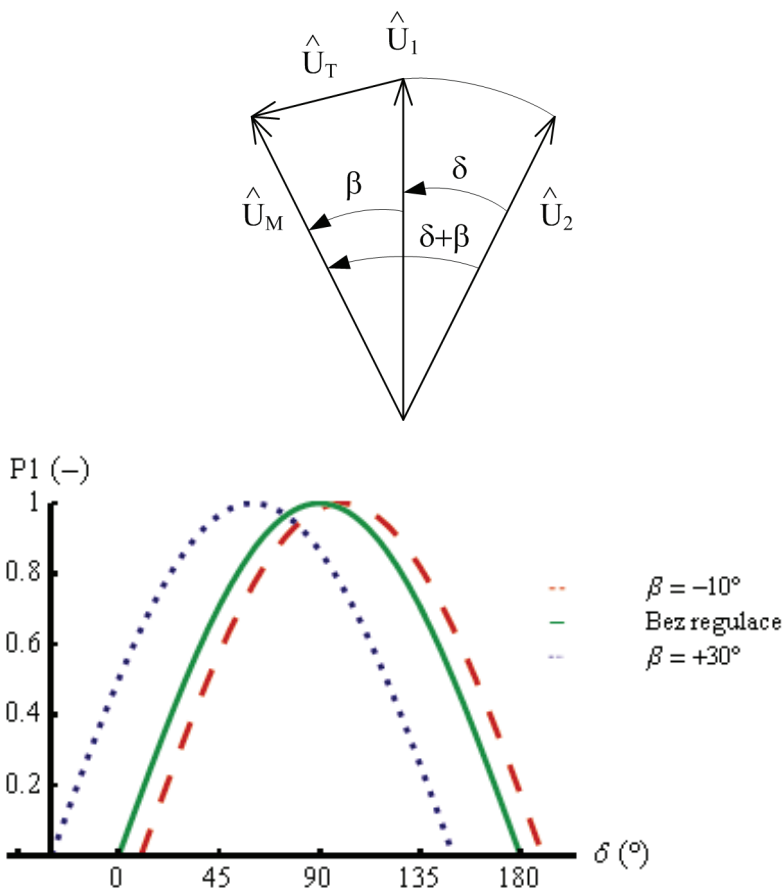
$$Q_1 = \frac{U^2 + U_T^2}{X} - \frac{U^2}{X} \cos \delta + \frac{U_T U}{X} \sin \delta$$

Je-li dle fázorového diagramu na *obr. 3.19*  $\alpha = 90^\circ$ , pak uvažujeme  $U_T$  kladné, je-li  $\alpha = 270^\circ$ , pak uvažujeme  $U_T$  záporné. Protože s rostoucím  $U_T$  roste i koncové napětí přenosové linky, umožňuje QBT zvýšit limitní přenosovou schopnost.



**Obr. 3.19: Vstřikování napětí a provozní charakteristiky pro QBT**

Druhou a konstrukčně složitější možností je měnit amplitudu a fázi  $\hat{U}_T$  tak, že amplitudy vstupního a výstupního napětí jsou shodné, ale mění se úhel mezi nimi. Funkce tohoto fázového regulátoru (Phase angle regulator = PAR) může být realizována změnou magnetického obvodu nebo pomocí tyristorově řízené jednotky (TCPAR). Řídicím parametrem PAR je fázový posuv  $\beta$ .



**Obr. 3.20: Vstřikování napětí a provozní charakteristiky pro PAR**

Na obr. 3.20 je znázorněn fázorový diagram pro PAR umístěný na začátku přenosové linky s konstantními amplitudami koncových napětí. Typ PAR můžeme uvažovat jako zdroj napětí s proměnlivou amplitudou i fází, které umožní realizovat požadované fázové natočení beze změny amplitudy síťového napětí. Platí tedy  $\hat{U}_M = \hat{U}_1 + \hat{U}_T$  a  $U_1 = U_M = U$ . Efektivně tak dochází ke změně rozdílu fází napětí na podélné reakanci vedení, což ovlivní výkonové rovnice přenášeného činného a jalového výkonu:

$$P = \frac{U^2}{X} \sin(\delta + \beta) \quad (3.9)$$

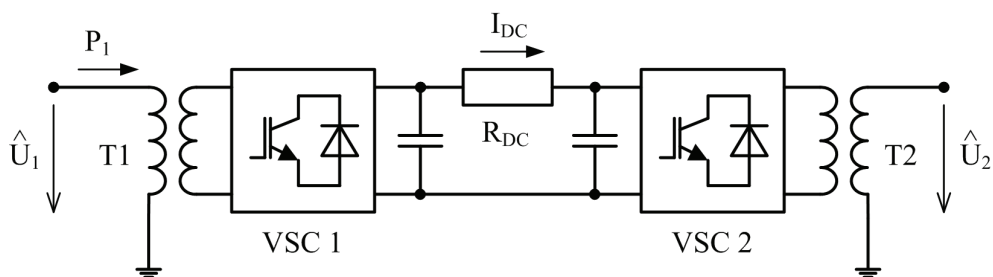
$$Q = \frac{U^2}{X} [1 - \cos(\delta + \beta)] \quad (3.10)$$

Z grafů výkonových charakteristik na obr. 3.20 je zřejmé, že PAR nezvyšuje limitní přenosovou schopnost, ale posunem křivek doleva, resp. doprava lze velmi účinně měnit přenášené výkony. Rovněž platí, že vztah mezi činným a jalovým výkonem je stejný jako pro neregulovanou linku, neboť obě charakteristiky jsou posouvány shodným způsobem.

### 3.8. HVDC

Vysokonapěťový stejnosměrný přenos (High voltage direct current =HVDC) je technologie alternativní ke klasickým střídavým přenosům a systémům FACTS, která může díky svým vlastnostem běžné přenosy nahrazovat nebo jen doplňovat tak, aby byla zvýšena přenosová schopnost, spolehlivost i variabilita přenosového systému. Ačkoliv není přímo součástí distribuční sítě dodávající elektrickou energii zákazníkům, své uplatnění nalézá zejména v případech elektrického přenosu na velké vzdálenosti, propojování nesynchronně pracujících soustav nebo tam, kde by standardní střídavé spojení bylo velmi ekonomicky a technicky náročné. V současné době jsou ve světě realizovány desítky HVDC projektů a mnoho dalších je ve fázi projektových příprav. Jedná se o podmorské kabely, dlouhá venkovní vedení, podzemní přenosy nebo propojení soustav s rozdílnou frekvencí.

Stejnospměrný přenos se skládá ze dvou VSC měničů, z nichž jeden pracuje jako usměrňovač a druhý jako střídač. Oba měniče jsou propojeny buď přímo v rozvodně (tzv. back-to-back spojení), nebo pomocí stejnosměrného vedení překonávající dlouhé vzdálenosti. Jeden VSC řídí stejnosměrné napětí a druhý přenos činného výkonu přes stejnosměrný obvod. Při normálním provozu mají oba měniče nezávislé řízení jalového výkonu. Základní konfigurace je na obr. 3.21.



Obr. 3.21: HVDC

Podle funkce a rozmístění rozveden s měniči lze rozlišovat různé varianty a konfigurace HVDC systémů. [1]

V systému *back-to-back* jsou oba měniče umístěny v téže rozvodně a neexistuje žádné stejnosměrné přenosové vedení. Dvě propojované střídavé soustavy mohou mít stejnou frekvenci nebo rozdílnou (50 Hz vs. 60 Hz), zařízení jsou instalována např. v jižní Americe, Japonsku, Indii. Oproti dalším typům vyžadují nižší náklady na realizaci rozveden.

V *jednopolovém systému* jsou oba měniče v různých rozvodnách spojeny jedním vodičem o kladném či záporném napětí. Často jsou takto realizována přenosová spojení využívající podmorské kabely, zpětný proud je veden přes zem.

*Dvojpólový systém* je nejčastěji používanou variantou HVDC a v podstatě se skládá ze dvou jednopólových systémů, rozvodny jsou spojeny dvěma nadzemními vodiči. Výhodou tohoto systému je možnost přenosu výkonu (i když nižšího) i v případě, že jeden vodič (pól) je vyřazen z provozu z jakéhokoliv důvodu. Každý systém tedy může pracovat samostatně za použití země jako zpětného vodiče. Protože oba póly pracují teoreticky na identickém napětí jen s opačnou polaritou a jejich proudy mají stejnou velikost, zemní proud je ideálně nulový (v praxi zemí teče cca 1 % jmenovitého proudu).

*Systém s více rozvodnami* zvyšuje variabilitu provozu celého HVDC systému, kdy různé skupiny měničů mohou pracovat jako střídače či usměrňovače a naopak a tím ovlivňovat toky výkonů i v navazujících střídavých soustavách. Toto může být výhodné při vzájemném propojování více oblastí, kde sezónně dochází k významnějším změnám k výrobě či spotřebě elektrické energie.

Z hlediska výhodnosti a konkurenceschopnosti lze stanovit, že HVDC lze využít pro spojení delší než přibližně 800 km u venkovních vedení a 50 km u kabelových spojení. Pomocí něj lze nejen usnadňovat obchody mezi dvěma soustavami, ale také využívat zdroje elektrické energie v odlehlých oblastech bez odpovídající spotřeby. Další výhodou je možnost zvýšení přenosové kapacity ve stávajících koridorech či propojení soustav s různou frekvencí nebo jen nesynchronně propojených. Díky rychlým reakcím a principu měničů lze velmi operativně měnit velikost i směr výkonových toků a eliminovat přenos poruchových proudů z jednoho systému do druhého.

### 3.9. Literatura

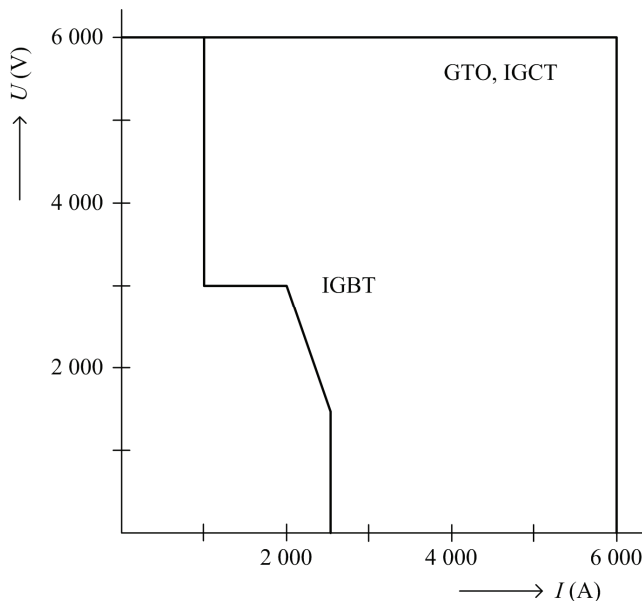
- [1] Hingorani, N.G., Gyugyi L.: Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, c2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8.
- [2] Wirth, E., Kara, A.: Innovative Power Flow Management and Voltage Control Technologies. IEE Power Engineering Journal. 2000, vol. 14, is. 3, s. 129-140.
- [3] Acha, E., Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O., Miller, T.J.E.: Power Electronic Control in Electrical Systems. Oxford: Newnes Press, c2002. 443 s. ISBN 0-7506-5126-1.
- [4] Grünbaum, R., Noroozian, M., Thorvaldsoson, B.: FACTS – Powerful Systems for Flexible Power Transmission. ABB Review, 1999, is. 5, s. 1-12.
- [5] Doležal, J., Tlustý, J., Valouch, V.: Moderní prostředky na zvýšení kvality elektrické energie. In Sborník Poděbrady 2004. Poděbrady: EGÚ Praha Engineering, a.s., 2004. s. 1-8.
- [6] Skvarenina, T.L.: The Power Electronics Handbook. CRC Press, 2002. 664 s. ISBN 0-8493-7336-0.
- [7] Habur, K., O'Leary, D.: FACTS – For Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy. Siemens, Erlangen, Germany, 2000. s 1-11.
- [8] Acha, E., Fuerte-Esquivel, C.R., Ambriz-Pérez, H., Angeles-Camacho, C.: FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2004. 403 s., ISBN 0-470-85271-2.
- [9] CIGRE Working group B4.40: Static Synchronous Series Compensator (SSSC). Paris: CIGRE, 2009. 177 s. ISBN 978-2-85873-058-2.

## 4. Prvky a měniče výkonové elektroniky

### 4.1. Výkonové polovodičové součástky

Základními součástkami výkonových měničů využívaných v zařízeních FACTS jsou dioda, tyristor, GTO tyristor (Gate Turn-off Thyristor), IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) a IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor). FACTS prvky nejčastěji obsahují tyristorové měniče či trojfázové VSC měniče využívající vypínatelné součástky, které jsou na rozdíl od tyristorů dražší a s vyššími ztrátami, ale výsledně tvoří efektivnější a výhodnější zařízení zejména díky možnosti využít při svém provozu pulzně-šířkovou modulaci (viz. dále).

Orientační oblast možného výkonového využití součástek je na obr. 4.1.



**Obr. 4.1: Výkonové možnosti PV součástek**

Pro dimenzování výkonových měničů jsou rozhodující statické a dynamické parametry součástek a jejich ztráty. [1]

K základním statickým parametrům patří:

- $U_{RRM}$  – maximální opakovatelné závěrné napětí diody nebo tyristoru
- $U_{DRM}$  – maximální opakovatelné blokovací napětí tyristoru
- $U_{CEO}$  – maximální napětí kolektor-emitor IGBT
- $I_{F(AV)max}$  – maximální střední hodnota propustného proudu diody, tyristoru

- $I_{Cmax}$  – maximální kolektorový proud IGBT
- $U_{(TO)}$  – prahové napětí (cca 1V u křemíku)

Dynamické parametry jsou:

- $t_q$  – vypínací doba (dioda, tyristor  $10^1 \div 10^2 \mu s$ , IGBT  $10^0 \div 10^1 \mu s$ )
- $t_{gt}$  – zapínací doba (dioda, tyristor  $10^0 \div 10^1 \mu s$ , IGBT  $10^{-1} \div 10^0 \mu s$ )
- $f_{sw}$  – střední spínací frekvence (GTO 1 kHz, IGCT 2 kHz, IGBT  $3 \div 10$  kHz)
- $(du_D / dt)_{crit}$  – maximální strmost nárůstu blokovacího napětí ( $10^2 \div 10^3 V/\mu s$ )
- $(di_T / dt)_{crit}$  – maximální strmost růstu proudu ( $10^2 \div 10^3 A/\mu s$ )

Z hlediska trvalého provozu jsou pro dimenzování důležité parametry trvalého (opakovatelného) výdržného napětí v nevodivém stavu a trvalého propustného proudu ve vodivém stavu. Současná výrobní škála základních výkonových součástek má tyto napěťové a proudové parametry v následujících rozsazích (viz. např. [2], [3], [4], [5]):

- diody: 1200 – 6000 V, 600 – 11000 A
- tyristory: 1600 – 8500 V, 400 – 6100 A
- GTO: 1300 – 6500 V, 150 – 4000 A
- IGCT: 2000 – 6500 V, 500 – 5500 A
- IGBT: 1200 – 6500 V, 200 – 2400 A

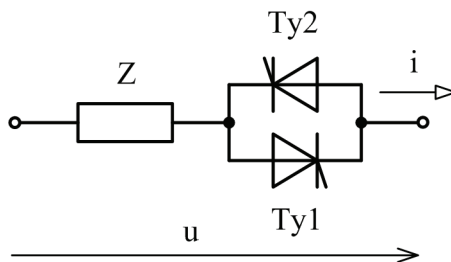
Je potřeba poznamenat, že s ohledem na výkonové dimenzování většina vyráběných součástek nedosahuje mezních parametrů proudu a napětí zároveň. Je-li tedy vyšší výdržné napětí, bývá často propustný proud dimenzován méně a naopak. Z hlediska bezpečnosti provozu také nejsou obvykle součástky zatěžovány uvedenými mezními parametry, ale napětími a proudy výrazně nižšími. Při sériovém nebo paralelním řazení si toto vyžádá větší počet součástek, ovšem za cenu vyšší spolehlivosti provozu výsledného zařízení.

Důležité je hledět rovněž na ztráty součástek, které jsou způsobeny zejména průchodem propustného proudu, průchodem řídicího proudu, zapínáním a vypínáním.

## 4.2. Tyristorový měnič

Dva antiparalelní tyristory zapojené do každé fáze trojfázového střídavého systému slouží jako řízený spínač, který má schopnost řízeně zapínat příslušnou část obvodu. Protože tyristory nelze cíleně vypnout, dochází k přerušení protékající proudu v jeho průchodu nulou. Je-li spínána indukčnost, lze protékající proud regu-

lovat od nuly do jeho maximální hodnoty (nepřerušovaný proud) změnou řídicího úhlu tyristorů v rozsahu 90° až 180°, tedy okamžikem sepnutí na základě impulsu z generátoru impulsů. Při běžném chodu oba tyristory pracují ve stejném režimu střídavě po půlperiodách napájecí frekvence.



**Obr. 4.2: Tyristorový měnič**

Tento typ měniče může obecnou zátěž  $Z$  k síti připínat po celých periodách (tyristorově spínané prvky TSR, TSC) nebo může měnit vlastnosti zátěže v závislosti na řídicím úhlu (tyristorově řízené prvky TCR, TCSC, SVC). Obě varianty lze pochopitelně kombinovat.

Základní rozdíl mezi TCR a TSR plyne z IEEE definic [6]:

**TCR:** paralelně připojená tyristorově řízená indukčnost, jejíž efektivní reaktance je spojitě nastavitelná řízením částečné vodivosti tyristorových ventilů

**TSR:** paralelně připojená tyristorově spínaná indukčnost, jejíž efektivní reaktance je skokově nastavitelná pomocí plné nebo nulové vodivosti tyristorových ventilů

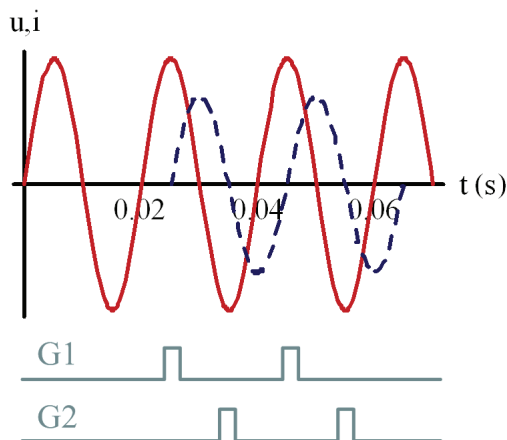
V případě **TSR** slouží tyristory jako rychlé a spolehlivé spínače, které připojují reaktor k síti. Při správné funkci spínají oba tyristory na základě generovaných impulsů v maximu blokovacího napětí (pro každý tyristor jiná polarita), tedy v přirozené nule proudu pro induktivní zátěž. To odpovídá řídicímu úhlu 90° (viz. obr. 4.3).

V případě **TCR** dochází k jinému řízení pomocí impulsů. Pro čistou indukčnost v zátěži a přiložení harmonického napětí platí:

$$u = L \frac{di}{dt}$$

$$u = \sqrt{2}U \sin(\omega t)$$



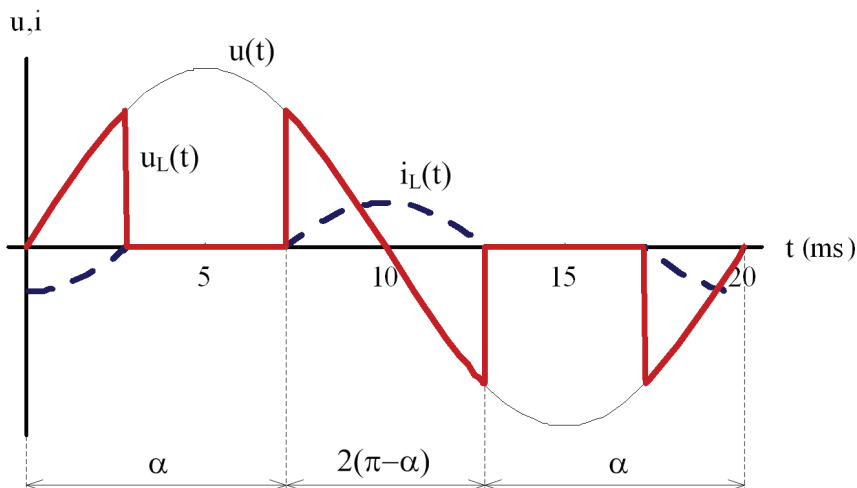


**Obr. 4.3: Časové průběhy napětí, proudu a řídicích impulsů u TSR**

V jedné polaritě, tj. jedním z tyristorů za periodu, pak při řídicím úhlu  $\alpha$  indukčností protéká okamžitý proud:

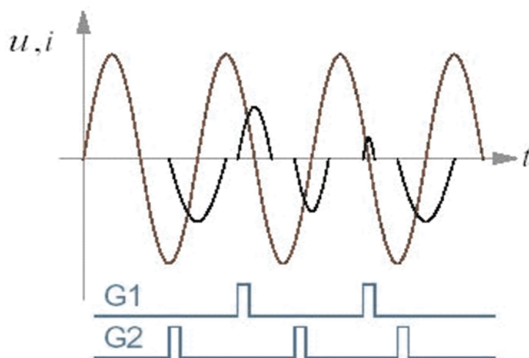
$$i_L = \frac{\sqrt{2}U}{L} \int_{\alpha/\omega}^t \sin \omega\tau \cdot d\tau = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (4.1)$$

Protože tyristorový ventil se uzavírá při průchodu proudu nulou, je uvedený proud veden pouze v rozmezí úhlů  $\omega t \in \langle \alpha ; 2\pi - \alpha \rangle$ , tedy do okamžiku, než proud klesne na nulu (viz. obr. 4.4). Na druhém tyristoru dochází k analogickému chování pro opačnou polaritu s půlperiodovým zpožděním (za předpokladu pravidelného generování řídicích impulsů).



**Obr. 4.4: Průběh napětí a proudu na indukčnosti u TCR**

Je zřejmé, že v rozsahu úhlů  $\omega t \in \langle \alpha ; 2\pi - \alpha \rangle \pm k \cdot \pi / 2$ ,  $k \in \mathbb{N}$  je napětí i proud indukčnosti nenulový, naopak napětí na ideálních tyristorových spínačích je rovno nule. Ve zbylých intervalech je napětí na indukčnosti a proud roven nule a napětí na tyristorech rovno napájecímu harmonickému napětí. Bude-li se řídicí úhel zmenšovat, dojde ke zkracování intervalu, kdy indukčností neprotéká žádný proud. Pro  $\alpha = \pi / 2$  bude indukčností protékat harmonický proud po celou periodu a každým ze dvou tyristorů právě po dobu jedné půlperrody.



**Obr. 4.5: Obecné průběhy napětí, proudu a řídicích impulsů u TCR**

Fázovým řízením TCR dochází ke změně amplitudy 1. harmonické proudu, která je fázově zpožděna o  $90^\circ$  vůči napájecímu napětí v celém rozsahu řídicích úhlů, tj. pro  $\pi / 2 \leq \alpha \leq \pi$ . (U reálné tlumivky by fázový posun zmenšila činná složka proudu rozsahu jednotek procent jalové složky.) Na základě vztahu (4.1) a Fourierovy transformace lze určit amplitudu 1. harmonické proudu v závislosti na úhlu  $\alpha$ , tedy podle tzv. fázového řízení. Při úplném otevření ventilů bude průběh proudu zátěží:

$$i_L(t) = -I_{\max} \cos \omega t$$

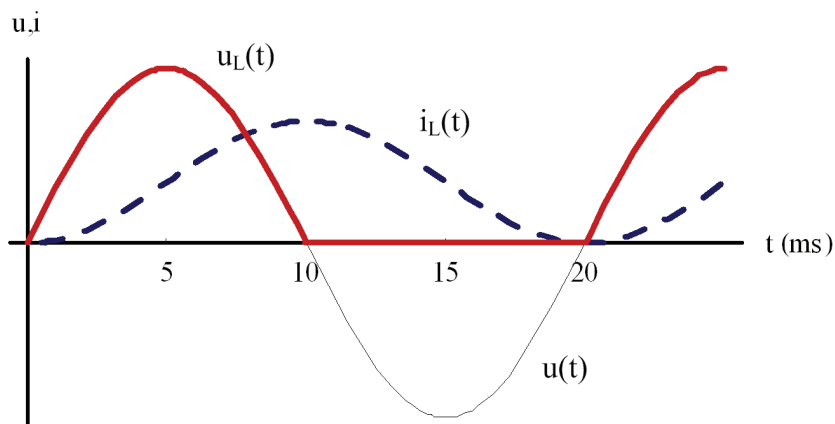
Tím je dána referenční funkce pro Fourierův rozvoj. Amplituda 1. harmonické proudu pak bude

$$I_{L1} = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} i_L(t) \cdot (-\cos \omega t) dt$$

$$I_{L1} = \frac{2\omega}{\pi} \int_{\alpha/\omega}^{(2\pi-\alpha)/\omega} I_{\max} (\cos \alpha - \cos \omega t) \cdot (-\cos \omega t) dt$$

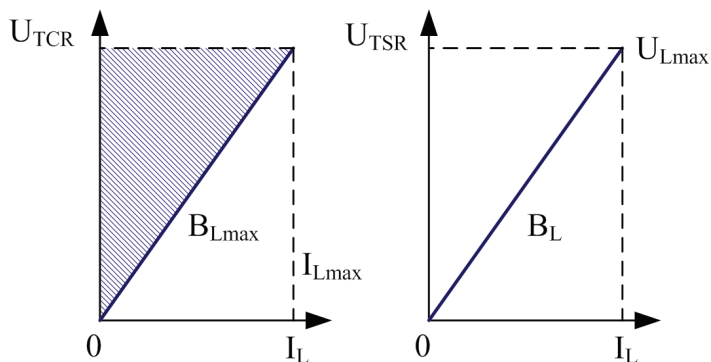
$$I_{L1} = I_{\max} \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (4.2)$$

Jestliže by docházelo k dalšímu zmenšování řídicího úhlu ( $\alpha < \pi/2$ ), byla by doba vedení tyristoru Ty1 delší než  $\pi$  a tyristor Ty2 by přestal spínat. V extrémním případě pro  $\alpha = 0$  by tyristorem Ty1 i induktivní zátěží protékal proud jedné polaroty po celou dobu periody. Napětí na indukčnosti by odpovídalo jednocestnému usměrňovači. Proto regulační obvody zajišťují minimální řídicí úhel  $\alpha = \pi/2$ , což je pro tyristorový měnič kritický úhel.



**Obr. 4.6: Průběh napětí a proudu na indukčnosti u TCR pro  $\alpha = 0^\circ$**

Rozdílným způsobem spínání tyristorů u TCR a TSR vznikají i jejich odlišné V-A charakteristiky a pracovní oblasti, které jsou u TCR plošné a u TSR přímkové (obr. 4.7). Omezení přípustných pracovních oblastí je dáno maximálním proudem, resp. napětím.



**Obr. 4.7: Pracovní oblasti TCR a TSR**

Základní V-A charakteristika TCR je pak podmnožinou možné pracovní oblasti. Tato charakteristika pak spolu se systémovou křivkou napětí (viz. kap. 2.5) určí pracovní bod v uzlu připojení TCR podle obr. 4.8. Zde se jedná pouze o jednu z mnoha možností tvaru V-A charakteristiky, která závisí na systémové křivce napětí, nastavení regulátoru a dimenzování TCR. Protože cílem je udržet napětí uzlu v daných mezích, vyžaduje toto měnit celkovou efektivní reaktanci a tedy řídicí úhel

podle okamžitých podmínek a požadavků, aby výsledná charakteristika měla stanovený tvar vhodný pro kompenzaci napětí a jalového výkonu. Tuto charakteristiku (viz. obr. 4.8) pak lze popsat vztahem

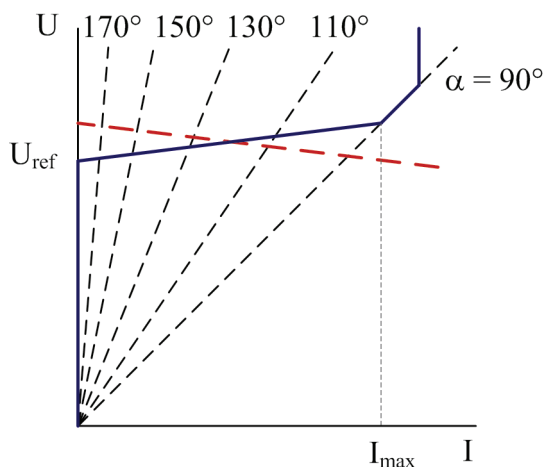
$$U = U_{\text{ref}} + jX_S I \quad 0 < I < I_{\text{max}} \quad (4.3)$$

kde

$X_S$  ..... představuje fiktivní reaktanci určující sklon

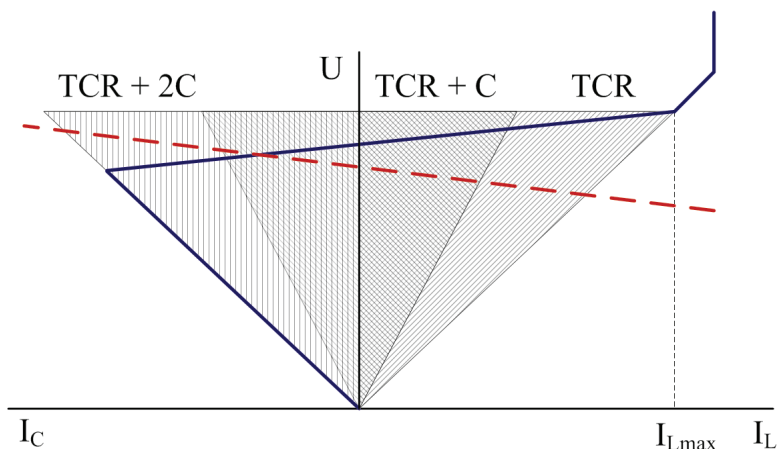
$I_{\text{max}}$  ..... maximální proud

Obdobného chování je dosahováno i u SVC, kde kromě TCR jsou paralelně připojeny další větve (fixní L, C, TSC).



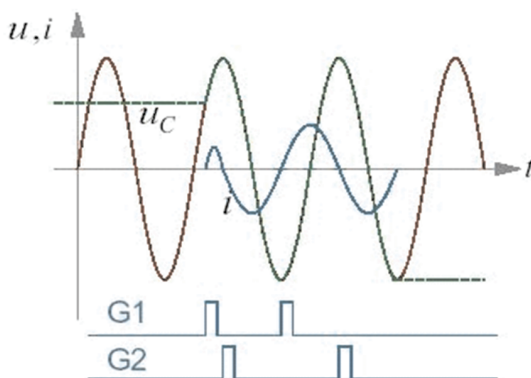
**Obr. 4.8: V-A charakteristika TCR**

Je-li k TCR připojena paralelně kapacita, je možné dosáhnout kromě induktivního také kapacitního charakteru celkového proudu, což je v podstatě realizace SVC kompenzace. Po připojení kapacity C dojde ke skokovému posunu V-A charakteristiky směrem do kapacitních hodnot. Výsledný rozsah proudových hodnot poté záleží na dimenzování vlastní TCR a připojených C. Variabilním připínáním a odpínáním kapacitních sekcí lze dosáhnout rozšíření V-A charakteristiky. Aby byla zachována bilance jalového výkonu při přepnutí kapacitních sekcí, jsou řídicí úhly tyristorů u TCR okamžitě změněny tak, že induktivní jalový výkon TCR spolu s kapacitním výkonem C je roven celkovému jalovému výkonu před změnou (pokud tuto spojitost umožňuje dimenzování TCR a C sekcí a předchází pracovní bod). Kapacity mohou být spínány mechanicky nebo tyristorově (TSC – viz. dále). Příklad V-A charakteristiky TCR se dvěma připojitelnými kapacitami (typ SVC) je na obr. 4.9. Při vhodném dimenzování lze maximální charakteristiky dosáhnout i kombinací jedné pevné kapacity a řízené indukčnosti. Více paralelních kapacit je záležitost např. pasivních LC filtrů na vyšší harmonické, které pro základní harmonickou vykazují kapacitní charakter.



**Obr. 4.9: V-A charakteristika SVC**

Bude-li tyristorový měnič spínat kapacitní zátěž (**TSC**: paralelně připojená tyristorově spínaná kapacita, jejíž efektivní reaktance je skokově nastavitelná pomocí plné nebo nulové vodivosti tyristorových ventilů; rovněž obsahuje malou tlumivku pro omezování přechodných proudů), je toto realizováno po celých půlperiodách v přirozené nule proudu a maximum (minimu) síťového napětí obdobně jako v případě TSR. Při odpínání v nule proudu je tedy kondenzátor nabit na  $U_{max}$  nebo  $U_{min}$ . Při spínání TSC je třeba zaručit, že okamžitá hodnota síťového napětí odpovídá předchozímu nabití kondenzátoru (napětí na tyristorovém ventilu je nulové nebo minimální). Není-li toto zajištěno, dojde po okamžiku připojení k přechodným oscilacím napětí i proudu. Kdyby nedocházelo k samovolnému vybíjení kondenzátorů, neprodukuje tento režim spínání žádné vyšší harmonické. Skokovou změnu celkové kapacitní reaktance je rovněž možné provádět současným spínáním více kapacit v každé fázi, je-li jich instalován větší počet paralelně.



**Obr. 4.10: Připínání TSC na síť při vybíjení kondenzátoru**

Vzhledem k vybíjení kondenzátorů přes jejich svodové odpory a tím exponenciálnímu poklesu napětí nelze vždy připínat TSC na síť v extrému síťového napětí.

V tom případě musí synchronizační obvod zajistit sepnutí v okamžiku rovnosti napětí sítě a kondenzátoru, k čemuž potom nedojde v celém násobku půlperiody (viz obr. 4.10).

#### 4.2.1. V-A charakteristika paralelní kompenzace

Podíváme-li se detailněji na vlastnosti V-A charakteristiky paralelních kompenzátorů admitančního (SVC) i měničového (STATCOM) typu, zjistíme, že hlavní lineární část charakteristiky vykazuje typický sklon dle vztahu (4.3) obdobně, jak bylo vysvětleno pro samostatnou TCR. Pro řadu aplikací je tento sklon výhodnější než použití ideálního regulátoru napětí, který by udržoval svorkové napětí na konstantní hodnotě. Při působení zařízení je tak udržována trvalá regulační odchylka svorkového napětí od jmenovité (referenční) hodnoty, která nezpůsobuje žádné provozní komplikace. Naopak v případě velmi ploché systémové křivky napětí (nízká impedance) by mohlo dojít k nepřesnému stanovení pracovního bodu a možným oscilacím mezi více variantami. [6]

Protože na rozdíl od TCR je SVC i STATCOM schopen dodávat induktivní i kapacitní proud, lze pro lineární část V-A charakteristiky psát

$$U = U_{\text{ref}} + jX_S I \quad -I_{C\text{max}} < I < I_{L\text{max}} \quad (4.4)$$

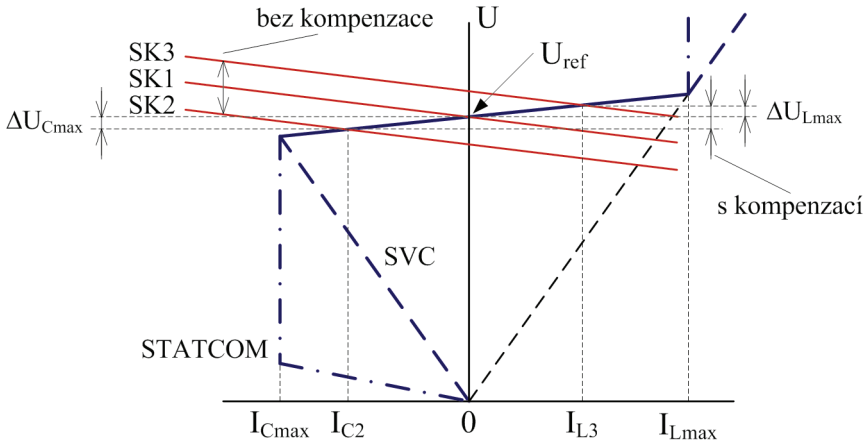
kde pro fiktivní reaktanci  $X_S$  můžeme z limitů proudového dimenzování ( $I_{C\text{max}}$ ,  $I_{L\text{max}}$ ) zjistit maximální odchylky napětí pro kapacitní i induktivní kompenzaci ( $\Delta U_{C\text{max}}$ ,  $\Delta U_{L\text{max}}$ )

$$X_S = \frac{\Delta U_{C\text{max}}}{I_{C\text{max}}} = \frac{\Delta U_{L\text{max}}}{I_{L\text{max}}} \quad (4.5)$$

Z rovnice (4.4) je zřejmé, že oproti stavu bez kompenzace ( $U_{\text{ref}}$ ) dochází k poklesu napětí při kapacitním kompenzačním proudu a k nárůstu napětí při induktivním kompenzačním proudu až do stavu dosažení proudových limitů. Mimo hlavní lineární regulační rozsah daný sklonem  $X_S$  je výstupní proud kompenzátoru dán základním tvarem příslušné V-A charakteristiky. V případě STATCOM tedy zůstane proud na své maximální kapacitní nebo induktivní hodnotě teoreticky pro jakékoliv napětí (prakticky od cca 20 % jmenovitého napětí), v případě SVC bude proud úměrný napětí podle mezní admitance (L,C).

Typická V-A charakteristika kompenzátorů je znázorněna na obr. 4.11 spolu se systémovými křivkami napětí (napětí-jalový proud). Protíná-li systémová křivka (SK1) V-A charakteristiku v referenčním napětí, je výstup kompenzátoru nulový. Je-li systémová křivka situována do nižších napětí (SK2, např. výpadek generátoru), průsečík ukazuje na kapacitní kompenzační proud  $I_{C2}$ . Je-li naopak systémová křivka na vyšší napěťové hladině (SK3, např. odpadnutí zátěže), dojde k toku induktivního kompenzačního proudu  $I_{L3}$ . Průsečíky systémových křivek s napěťovou osou určují odchylku napětí při stavu bez kompenzace. Odchylka napětí při režimu kompenzace je pak výrazně nižší, leží-li průsečíky na lineární části charakteristiky

dané sklonem  $X_S$ , bez ohledu na typ kompenzátoru. Mimo lineární rozsah se SVC a STATCOM chovají odlišně.



**Obr. 4.11: V-A charakteristika SVC a STATCOM**

#### 4.2.2. Admitanční modely

Závislost proudu protékajícího TCR dle vztahu (4.2) podle velikosti řídicího úhlu  $\alpha$  dává návod, jak modelovat zařízení FACTS s tyristorovým měničem v síťových výpočtech. Jestliže admitance, resp. impedance, prvku je regulována přímo řídicí jednotkou (je řídicím parametrem), může být vhodné vložit přímo tuto hodnotu do modelu. Velikost admitance pak následně ovlivní prvky admitanční matice a tím popis systému. Tento popis může být použit pro paralelní i sériové prvky a týká se zejména typů BSC, BSR, SVC nebo TCSC. Celková admitance je zde závislá na řídicím úhlu tyristorů. Činné a jalové výkony jsou ovlivněny přímo touto admitancí. Veškeré admitanční (impedanční) modely jsou uvažovány pro 1. harmonickou napětí a proudu.

##### Model TCR

Neřízené připojení indukčnosti  $L$  do sítě odpovídá připojení admitance

$$\hat{Y}_L = \frac{1}{j\omega L} = -j \frac{1}{\omega L} = jB_L = \frac{\hat{I}_L}{\hat{U}_L}$$

V případě připojování čistě induktivní zátěže (TCR) bude fázový posun mezi fázory napětí a proudu vždy  $90^\circ$ . Pro susceptanci neřízené indukčnosti platí

$$B_L = -\frac{I_{L1}}{U_{L1}} = -\frac{I_{\max}}{U_{\max}} = -\frac{1}{\omega L}$$

kde

$I_{\max}$  ..... amplituda 1. harmonické proudu

$U_{\max}$  ..... amplituda 1. harmonické napětí

Na základě vztahu (4.2) lze pro susceptanci TCR v závislosti na řídicím úhlu  $\alpha$  psát

$$B_{\text{TCR}}(\alpha) = -\frac{I_{\max} \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi}}{U_{\max}} = B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (4.6)$$

Admittance je pak rovna

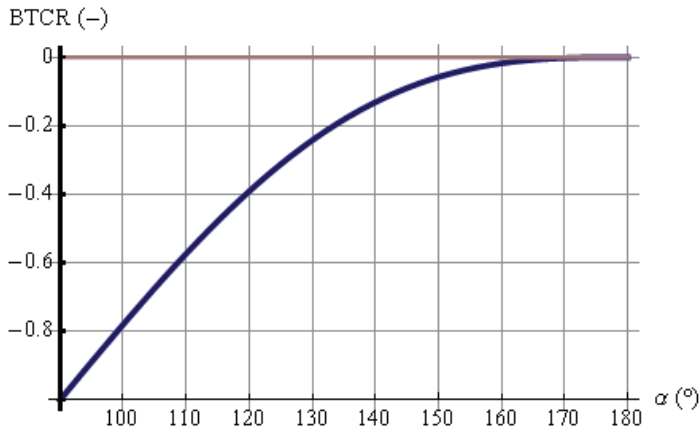
$$\hat{Y}_{\text{TCR}} = jB_{\text{TCR}}$$

Pro limitní hodnoty pak platí

$$B_{\text{TCRmax}} = B_L \text{ pro } \alpha = 90^\circ$$

$$B_{\text{TCRmin}} = 0 \text{ pro } \alpha = 180^\circ$$

Tyto extrémny jsou využívány při spínání TSR, kdy výsledná hodnota připojené admittance je střídavě nulová a maximální.



Obr. 4.12: Závislost  $B_{\text{TCR}}$  na řídicím úhlu

## Model SVC

Z provozního pohledu se SVC chová jako paralelně připojená admittance, která buď dodává, nebo spotřebovává jalový výkon za účelem regulace napětí. Vezmeme-li v úvahu základní obvod SVC dle obr. 3.3 a závěry pro admitanční model  $B_{\text{TCR}}$ , pak velikost řídicího úhlu  $\alpha$  může ovlivňovat celkový charakter obvodu SVC (tj. provoz v induktivním nebo v kapacitním módu), jestliže



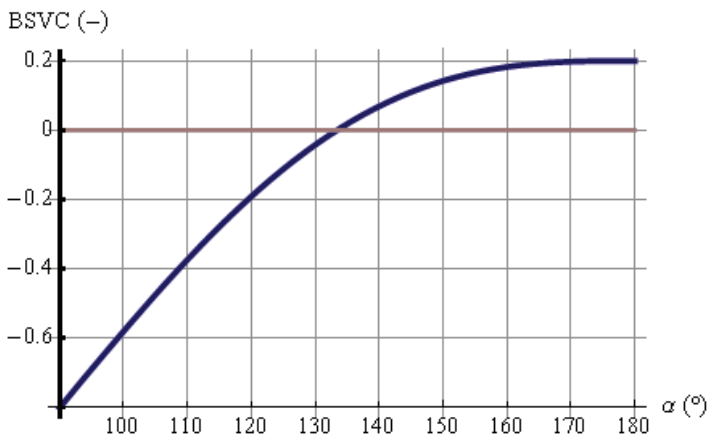
$$\omega L < \frac{1}{\omega C} \approx |B_L| > B_C$$

Protože základní obvod je paralelní spojení fixního kondenzátoru a TCR, dostaneme pro celkovou admitanci a susceptanci SVC

$$\hat{Y}_{SVC} = j\omega C + jB_{TCR} = j(B_{TCR} + B_C) = jB_{SVC}$$

$$B_{SVC}(\alpha) = B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \quad (4.7)$$

Příklad závislosti výsledné susceptance SVC na řídicím úhlu je na obr. 4.13. Uvažovány jsou  $B_L = -1$  (-) a  $B_C = 0,2$  (-).



Obr. 4.13: Závislost  $B_{SVC}$  na řídicím úhlu

### Model TCSC

Uvažujeme-li základní obvod TCSC podle obr. 3.1, tedy topologicky stejný jako pro SVC, pak pro admitanční model TCSC dostaneme stejné závěry jako pro SVC, tedy vztah totožný s (4.7), tedy

$$B_{TCSC}(\alpha) = B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \quad (4.8)$$

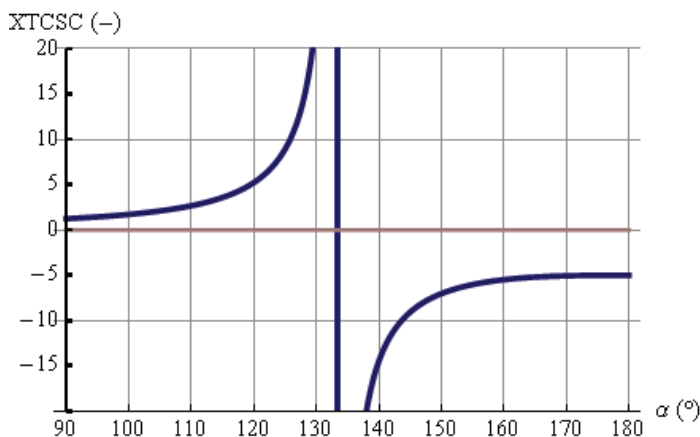
Vzhledem k tomu, že obvody SVC i TCSC obsahují paralelní spojení kapacity a indukčnosti, dojde při určitém řídicím úhlu  $\alpha$  k rezonanci, v tomto případě stavu s nulovou admitancí (resp. její imaginární částí). Toto je znázorněno na obr. 4.14 na závislosti celkové reaktance TCSC na řídicím úhlu. Pro nižší řídicí úhly je dosaženo induktivního módu, pro vyšší úhly kapacitního módu. Je-li vliv indukčnosti a kapacity vyrovnán, dochází při tzv. *rezonančním řídicím úhlu*  $\alpha_{rez}$  k rezonančnímu

jevu doprovázeného nárůstem absolutní hodnoty impedance, který je v tomto případě nežádoucím jevem. Jeho potlačení lze dosáhnout vymezením pásma, v němž nesmí ležet řídicí úhel (a tedy ani nastavitelná susceptance):

$$\alpha_{\text{rez}} - \Delta\alpha < \alpha < \alpha_{\text{rez}} + \Delta\alpha$$

Rezonance není větším problémem pro SVC, které je zapojeno paralelně. Napětí v místě připojení je téměř konstantní a při velkém nárůstu impedance obvodu (teoreticky k nekonečnu) dojde k poklesu proudu k nule. Naopak u sériových obvodů TCSC hrozí nebezpečí zničení součástek. V sériovém zapojení lze předpokládat téměř konstantní proud, který by při rezonančním nárůstu impedance vyvolal obrovský nárůst napětí. Proti tomuto přepětí je třeba obvody chránit, a to softwarově vhodným algoritmem pro řídicí impulsy nebo hardwarově varistorem.

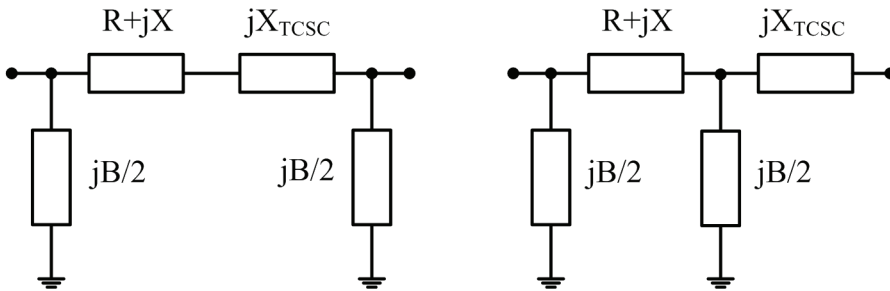
V případě sériového zapojení TCSC, které obvykle slouží ke kompenzaci podélné induktivní reaktance vedení, může být výsledná reaktance TCSC kapacitní v celém rozsahu řídicího úhlu. Pak nedochází k problémům s rezonancí a provozní charakteristiky odpovídají obr. 3.2.



**Obr. 4.14: Závislost  $X_{TCSC}$  na řídicím úhlu**

Při výpočtech v uzlových sítích, kde vedení jsou modelovány jako  $\pi$ -článek, existují dvě základní možnosti, jak zařadit přídavný sériový prvek typu TCSC (viz. obr. 4.15).

Jednodušší varianta je přímé sériové přičtení reaktance  $X_{TCSC}$  k podélné reaktanci vedení (obr. 4.15a), kdy ve výpočtu nepřibude další uzel. Protože TCSC bývá obvykle umístěno v rozvodně, tedy na konci linky, je přesnější zapojit jej ke koncovému uzlu  $\pi$ -čláčku (obr. 4.15b). Obzvláště u kratších vedení však admitance k zemi ovlivňuje vypočtené výkonové toky jen malou měrou, proto lze jednodušší variantu oprávněně použít.



Obr. 4.15: Zapojení TCSC do modelu

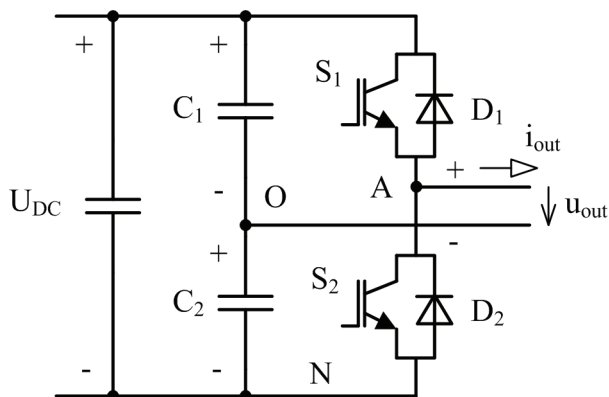
### 4.3. VSC

Některé z uvedených zařízení FACTS (STATCOM, SSSC, UPFC) využívají trojfázový měnič (voltage source converter = VSC) s polovodičovými vypínatelnými součástkami výkonové elektroniky, což je v principu vícefázový můstek s napěťovým stejnosměrným meziobvodem. Stejnosemnný proud může téci oběma směry, což umožňuje oboustranný tok výkonu mezi střídavou a stejnosměrnou stranou. Naopak stejnosměrné napětí nabývá stále jedné polaroty. Tento měnič tak při svém provozu může podle požadavků pracovat jako usměrňovač i jako střídač. Je-li stejnosměrný napěťový meziobvod realizován kapacitou, jsou napětí a proud na střídavé straně fázově posunuty o  $90^\circ$  elektrických, tedy generován, resp. absorbován, může být pouze jalový výkon. Okamžitý činný výkon je střídavě generován a absorbován pouze po dobu jedné periody. (K odchylce dojde pouze pro krytí činných ztrát měniče.) Bude-li na ss straně zdroj, může být fázový posun napětí a proudu libovolný a může docházet k výměně činného i jalového výkonu.

Každá větev měniče je složena z ventilů, které jsou překlenuty antiparalelní diodou (jako další součástka nebo integrovaná do vypínatelné součástky). Jako součástky jsou používány IGBT tranzistory, IGCT nebo GTO tyristory podle požadovaného výkonu a napětí. Jednotlivé ventily pracují v principu jako spínače. Pro pochopení funkce obvyklého trojfázového šestipulzního měniče je vhodné začít od jednodušších topologií. [7]

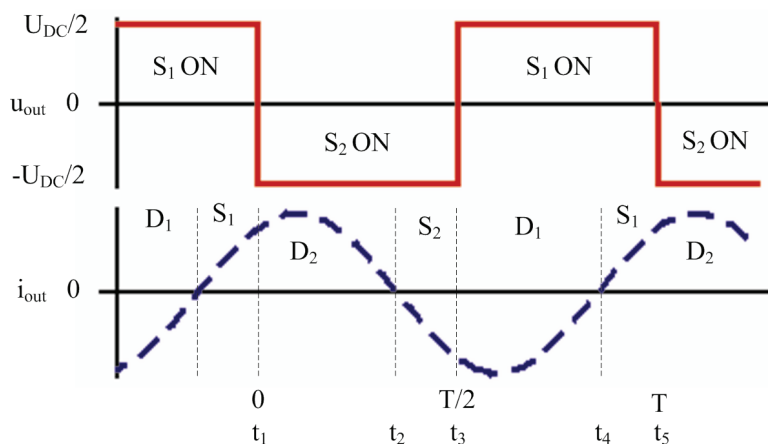
#### 4.3.1. Jednofázový poloviční můstek

Uvažujme nejprve nejjednodušší variantu, tj. jednofázový DC-AC měnič podle obr. 4.16, který se skládá ze dvou spínacích prvků ( $S_1$  a  $S_2$ ) s antiparalelními diodami ( $D_1$  a  $D_2$ ), které slouží jako cesta pro tok proudu zpět ze střídavé do stejnosměrné části, je-li účinník různý od jedné. Pro realizaci středního bodu (0), kam je připojena druhá svorka zátěže, jsou paralelně se stejnosměrným zdrojem zapojeny dvě totožné kapacity ( $C_1$  a  $C_2$ ). Tím je vstupní napětí  $U_{DC}$  rozděleno na dva totožné zdroje. Kapacity jsou uvažovány natolik velké, že napětí DC zdroje i středního bodu vůči svorkám zdroje jsou konstantní.



**Obr. 4.16: Jednofázový VSC s polovičním můstkem**

Princip činnosti je výstižně vyobrazen na *obr. 4.17*. Pro oba spínače existují řídicí signály pro jejich zapnutí a vypnutí. Tyto signály jsou doplňkové, aby v každém okamžiku byl ve větvi sepnut maximálně jeden ze dvou spínačů. V opačném případě by došlo ke zkratování stejnosměrné větve a hrozilo by její zničení. Je-li sepnut spínač  $S_1$  ( $t_3 < t < t_5$ ), výstupní napětí  $u_{out} = u_{A0}$  je rovno  $U_{DC}/2$  na kapacitě  $C_1$ . Pracovní režim spínacího bloku ( $S_1, D_1$ ) je poté určen polaritou výstupního proudu  $i_{out}$ . Je-li výstupní proud kladný, teče spínačem  $S_1$  ( $t_4 < t < t_5$ ), je-li proud záporný, teče diodou  $D_1$  ( $t_3 < t < t_4$ ). Obdobně je tomu pro spínač  $S_2$ . Možné pracovní režimy jsou shrnuty v *tab. 4.1*.



**Obr. 4.17: Výstupní napětí a proud jednofázového VSC s polovičním můstkem**

| Stav spínače |       | Výstupní napětí $u_{out}$ | Výstupní proud $i_{out}$ | Součástka vedoucí proud | Tok výkonu |
|--------------|-------|---------------------------|--------------------------|-------------------------|------------|
| $S_1$        | $S_2$ |                           |                          |                         |            |
| 1            | 0     | $U_{DC}/2$                | kladný                   | $S_1, t_4 < t < t_5$    | DC → AC    |
| 1            | 0     | $U_{DC}/2$                | záporný                  | $D_1, t_3 < t < t_4$    | AC → DC    |
| 0            | 1     | $-U_{DC}/2$               | kladný                   | $D_2, t_1 < t < t_2$    | AC → DC    |
| 0            | 1     | $-U_{DC}/2$               | záporný                  | $S_2, t_2 < t < t_3$    | DC → AC    |

**Tab. 4.1: Pracovní režimy jednofázového VSC s polovičním můstkem**

Díky obdélníkovému tvaru výstupního napětí obsahuje toto vyšší harmonické. Jeho spektrum obsahuje všechny liché harmonické, jejichž amplitudy dostaneme Fourierovým rozvojem. Pro každý řád  $h$  platí:

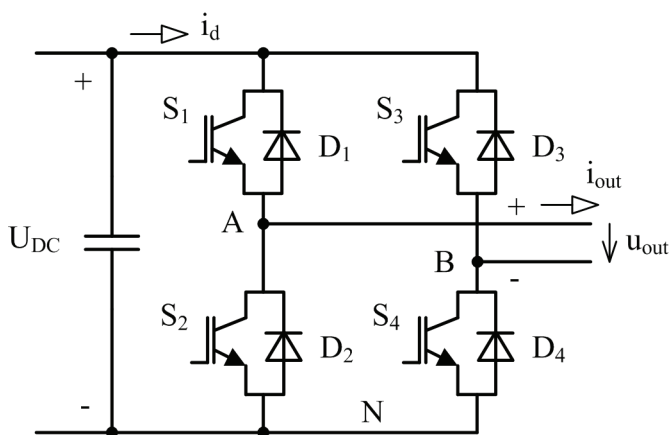
$$U_{outh} = \frac{2U_{DC}}{\pi \cdot h} \cdot \cos(h \cdot \omega t) \quad , \text{ kde } h = 1, 3, 5, 7, 9, \dots \quad (4.9)$$

Limitujícím je rovněž fakt, že při obdélníkovém řízení není možné měnit efektivní hodnotu základní harmonické výstupního napětí  $u_{out}$ . Toho lze dosáhnout pouze změnou vstupního napětí  $U_{DC}$ .

Uvedený měnič pracuje ve všech čtyřech kvadrantech daných polaritou výstupního napětí a proudu. Při střídačovém režimu vedou proud oba spínače  $S_1, S_2$ , při usměrňovačovém režimu pak obě diody  $D_1, D_2$ . Čtyřkvadrantový provoz znamená, že měnič může na střídavé straně přenášet induktivní i kapacitní jalový výkon. Pouze při čistě činné zátěži teče veškerý proud přes oba spínače a diody nejsou využity pro průchod proudu. Při jiném účinníku měnič vždy pracuje střídavě v režimu střídače a usměrňovače. Tento měnič slouží jako základní stavební jednotka pro složitější měniče.

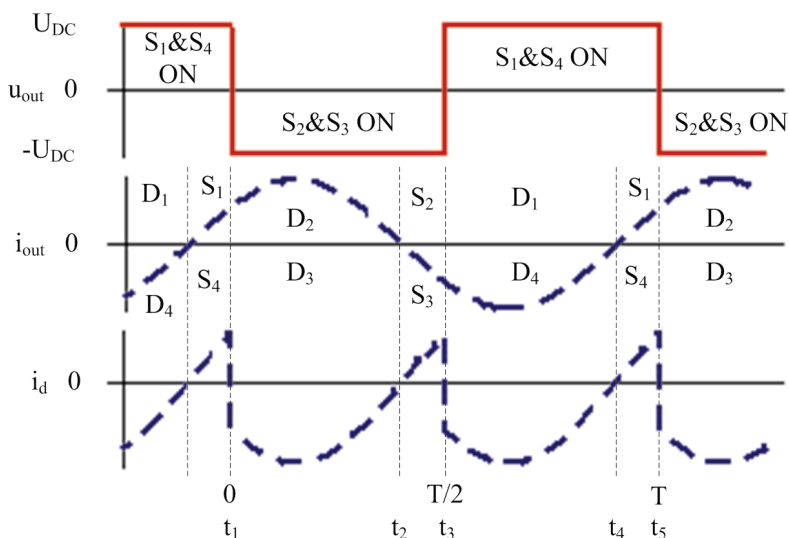
### 4.3.2. Jednofázový úplný můstek

Základní schéma jednofázového VSC s úplným můstkem je na *obr. 4.18*. Skládá se ze dvou identických větví jako u předchozího měniče, které obsahují čtyři spínače  $S_{1-4}$  s antiparalelními diodami  $D_{1-4}$  a jsou připojené ke vstupnímu napětí  $U_{DC}$ . Střed větví jsou připojeny ke svorkám střídavé zátěže A a B a střed stejnosměrné větve tak nemusí být vyveden. Řídicí signály jsou opět doplňkové, tentokrát pro dvojice spínačů ( $S_1, S_2$ ) a ( $S_3, S_4$ ). Při klasickém *obdélníkovém řízení* jsou spínače řízeny po dvojicích ( $S_1, S_4$ ) a ( $S_2, S_3$ ), kdy oba spínače ve dvojici jsou sepnuté ve stejném okamžiku po dobu půlperiody a polarita proudu opět určuje, zda vedou spínače či diody.



**Obr. 4.18: Jednofázový VSC s úplným můstkem**

Měnič opět může pracovat ve všech čtyřech kvadrantech. Výkon je přenášen z DC strany na AC, jestliže výstupní napětí a proud mají stejnou polaritu (proud teče přes spínače), a opačně, jestliže  $u_{out}$  a  $i_{out}$  mají opačnou polaritu (proud teče přes diody). Výstupní napětí tentokrát dosahuje střídavě kladné a záporné hodnoty  $U_{DC}$  napětí kapacity. Princip činnosti je znázorněn na obr. 4.19, tentokrát se však vstupní proud liší od výstupního.



**Obr. 4.19: Průběhy veličin pro jednofázový VSC s úplným můstkem**

Ve výstupním napětí jsou opět přítomny všechny liché harmonické (včetně 3. harmonické vzhledem k jednofázovému systému).

$$U_{\text{outh}} = \frac{4U_{\text{DC}}}{\pi \cdot h} \cdot \cos(h \cdot \omega t) \quad , \text{ kde } h = 1, 3, 5, 7, 9, \dots \quad (4.10)$$

Jejich efektivní hodnota činí

$$U_{\text{rmsh}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{\text{DC}}}{\pi \cdot h} \quad , \text{ kde } h = 1, 3, 5, 7, 9, \dots \quad (4.11)$$

Pro základní harmonickou tak platí

$$U_{\text{rms1}} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_{\text{DC}}}{\pi} \doteq 0,9U_{\text{DC}} \quad (4.12)$$

Vstupní proud naopak obsahuje stejnosměrnou složku a sudé harmonické.

Měnič opět nemůže při standardním obdélníkovém řízení měnit efektivní hodnotu základní harmonické výstupního napětí při konstantním vstupním napětí. Při tzv. *fázovém řízení* je však možné ovlivnit  $U_{\text{out1}}$  stejně jako i harmonické zkreslení výstupního napětí. Při tomto způsobu nejsou spínače řízeny synchronně po dvojicích, ale mezi sepnutými existuje daná fázová prodleva  $\alpha$ , takže výstupní napětí může dosáhnout i nulové hodnoty. Pouze řídicí signály pro dvojice spínačů ( $S_1, S_2$ ) a ( $S_3, S_4$ ) musejí být stále doplňkové. Při účinníku různém od jedné zůstává tok výstupního proudu nepřerušen i při nulovém napětí a uzavírá se přes spínač a diodu druhého sepnutého spínače podle polarity. K toku výkonu v tomto stavu nedochází. Pracovní režimy pro oba způsoby řízení jsou shrnuty v *tab. 4.2*.

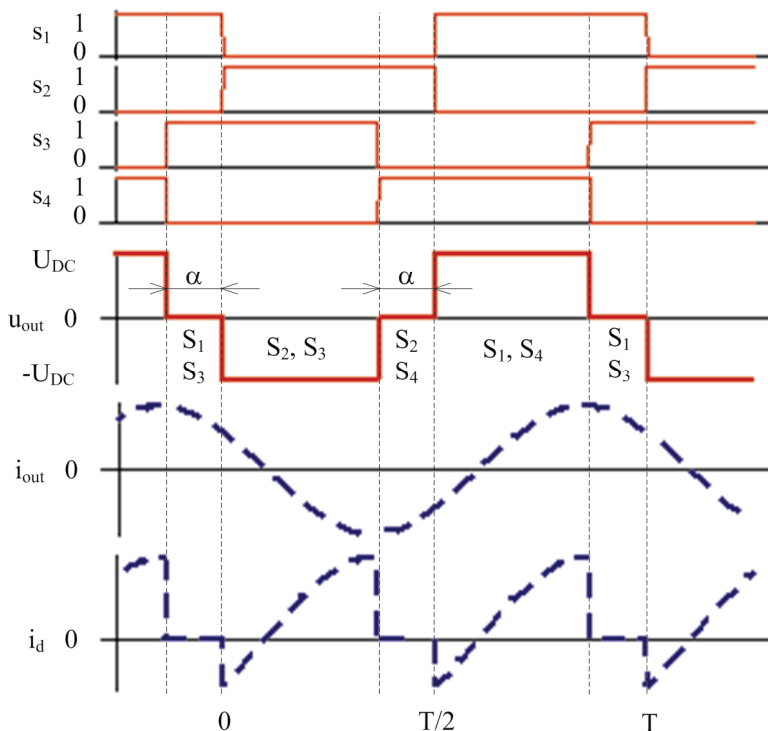
| Stav spínače                       |       |       |       | Výstupní napětí $u_{\text{out}}$ | Výstupní proud $i_{\text{out}}$ | Součástka vedoucí proud        | Tok výkonu |
|------------------------------------|-------|-------|-------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|------------|
| $S_1$                              | $S_2$ | $S_3$ | $S_4$ |                                  |                                 |                                |            |
| Obdélníkové řízení a Fázové řízení |       |       |       |                                  |                                 |                                |            |
| 1                                  | 0     | 0     | 1     | $U_{\text{DC}}$                  | kladný                          | $S_1, S_4,$<br>$t_4 < t < t_5$ | DC → AC    |
| 1                                  | 0     | 0     | 1     | $U_{\text{DC}}$                  | záporný                         | $D_1, D_4,$<br>$t_3 < t < t_4$ | AC → DC    |
| 0                                  | 1     | 1     | 0     | $-U_{\text{DC}}$                 | záporný                         | $S_2, S_3,$<br>$t_2 < t < t_3$ | DC → AC    |
| 0                                  | 1     | 1     | 0     | $-U_{\text{DC}}$                 | kladný                          | $D_2, D_3,$<br>$t_1 < t < t_2$ | AC → DC    |
| Fázové řízení (doplňkové režimy)   |       |       |       |                                  |                                 |                                |            |
| 1                                  | 0     | 1     | 0     | 0                                | kladný                          | $S_1, D_3$                     | nulový     |
| 1                                  | 0     | 1     | 0     | 0                                | záporný                         | $S_3, D_1$                     | nulový     |
| 0                                  | 1     | 0     | 1     | 0                                | kladný                          | $S_4, D_2$                     | nulový     |
| 0                                  | 1     | 0     | 1     | 0                                | záporný                         | $S_2, D_4$                     | nulový     |

**Tab. 4.2: Průběhy veličin pro jednofázový VSC s úplným můstkem**

Řídicí signály spínačů a průběhy napětí a proudů pro daný fázový posun  $\alpha$  jsou na obr. 4.20. Výstupní napětí zde může nabývat třech úrovní, pro  $\alpha = 0$  dostaneme průběhy pro obdélníkové řízení a dvě úrovně napětí.

Změnou fázového posunu  $\alpha$  se rovněž mění amplitudy všech lichých harmonických obsažených ve výstupním napětí včetně základní harmonické.

$$U_{\text{outh}} = \frac{4U_{\text{DC}}}{\pi \cdot h} \sin\left(h \cdot \frac{\pi - \alpha}{2}\right), \text{ kde } h = 1, 3, 5, 7, 9, \dots \quad (4.13)$$



**Obr. 4.20: Průběhy veličin pro fázové řízení**

Funkční principy základních stavebních prvků VSC lze shrnout do následujících bodů:

- Mezi výstupním střídavým napětím a proudem může být libovolný úhel, tj. měnič může pracovat ve všech čtyřech kvadrantech (usměrňovač i střídač, induktivní i kapacitní). Toto však pouze za předpokladu připojení zdrojů z obou stran (DC, AC), aby mohlo dojít k výměně činného výkonu. Pro přenos pouze jalového výkonu stačí mít na stejnosměrné straně instalovaný kondenzátor.
- Činný a jalový výkon mohou být nezávisle řízeny amplitudou a fází generovaného střídavého napětí.

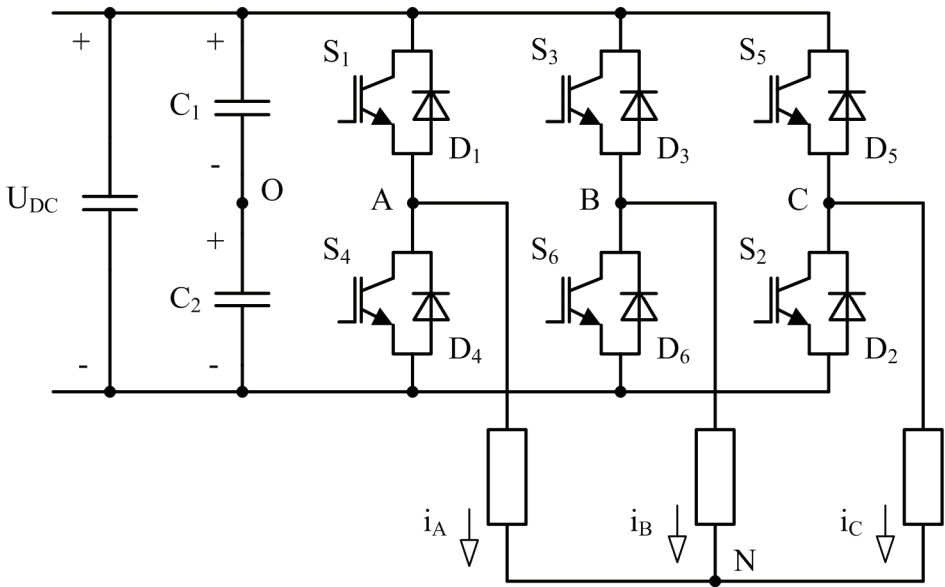


- Z okamžitého pohledu zajišťují diody usměrňovací a vypínatelné součástky střídačovou funkci. Každá perioda je složena z několika úseků usměrňování a střídání podle fázového posuvu a výsledný efekt je dán celkovými průběhy výstupního proudu a napětí.
- Pracuje-li měnič jako usměrňovač s jednotkovým účinníkem, proud je veden pouze diodami. Pracuje-li měnič jako střídač s jednotkovým účinníkem, proud je veden pouze vypínatelnými součástkami.
- Dojde-li k vypnutí některé vypínatelné součástky, střídavý proud není přerušen, ale je poté veden diodou (při nejednotkovém účinníku) nebo jinou vypínatelnou součástkou (při jednotkovém účinníku).
- Vypínatelné součástky ve stejné větvi nesmějí být sepnutý současně, jinak by došlo ke zkratování stejnosměrného obvodu a k rychlému vybití kondenzátoru přes zkratovanou větev, což by vedlo ke zničení součástek. Řídicí mechanismus tak dovoluje vyslat zapínací pulz pouze na jednu součástku ve větvi a to za předpokladu, že proud sousední součástkou je roven nule.
- Každá větev se dvěma ventily může pracovat nezávisle o libovolné frekvenci.
- V principu je možné spojit paralelně jakýkoliv počet větví pracujících nezávisle do jednoho střídavého systému.
- Spínáním vypínatelných součástek je vygenerováno výstupní střídavé napětí měniče ve vztahu ke stejnosměrnému napětí kondenzátoru. Proud však nemusí nutně téci těmito sepnutými součástkami, pokud jeho směr vede k průchodu přes diody.

### 4.3.3. Trojfázový šestipulzní měnič

Klasický šestipulzní měnič se skládá ze 6 spínačů a 6 antiparalelních diod (viz. obr. 4.21). Střední bod (uzel) 0 často není přístupný a je pouze fiktivní. Spínače jsou zde při obdélníkovém řízení spínány postupně dle uvedených čísel, přičemž každý z nich je sepnut po dobu půlperrody a jednotlivé větve jsou řízeny s fázovým posunem  $120^\circ$ .

Princip činnosti je zřejmý z obr. 4.22. Každý spínač je sepnut po dobu  $180^\circ$  (elektrických) a každých  $60^\circ$  je jeden spínač sepnut a jiný vypnut. V každé větvi je tak v každém momentě sepnut právě jeden spínač. Výstupní napětí (fáze – střední bod 0) mají opět dvě úrovně, sdružená napětí mají úrovně tři, s nulovou hodnotou po dobu jedné třetiny perrody. Je-li symetrická zátěž zapojena do hvězdy, její uzel  $n$  bude mít napětí o trojnásobné frekvenci než je frekvence výstupního napětí. Fázové napětí na zátěži pak nabývá čtyř různých úrovní.



**Obr. 4.21: Trojfázový šestipulzní měnič**

Výstupní napětí (fáze – střední bod 0) obsahuje opět pouze liché harmonické (amplitudy):

$$U_{A0h} = U_{B0h} = U_{C0h} = \frac{2U_{DC}}{\pi \cdot h}, \text{ kde } h = 1, 3, 5, 7, 9, \dots \quad (4.14)$$

Sdružené napětí pak kromě základní harmonické obsahuje pouze liché řády typu  $(6h \pm 1)$

$$U_{ABh} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi \cdot h} U_{DC} \cdot \cos(h \cdot \omega t), \text{ kde } h = 1, 5, 7, 11, 13, \dots \quad (4.15)$$

Sdružené napětí má efektivní hodnotu

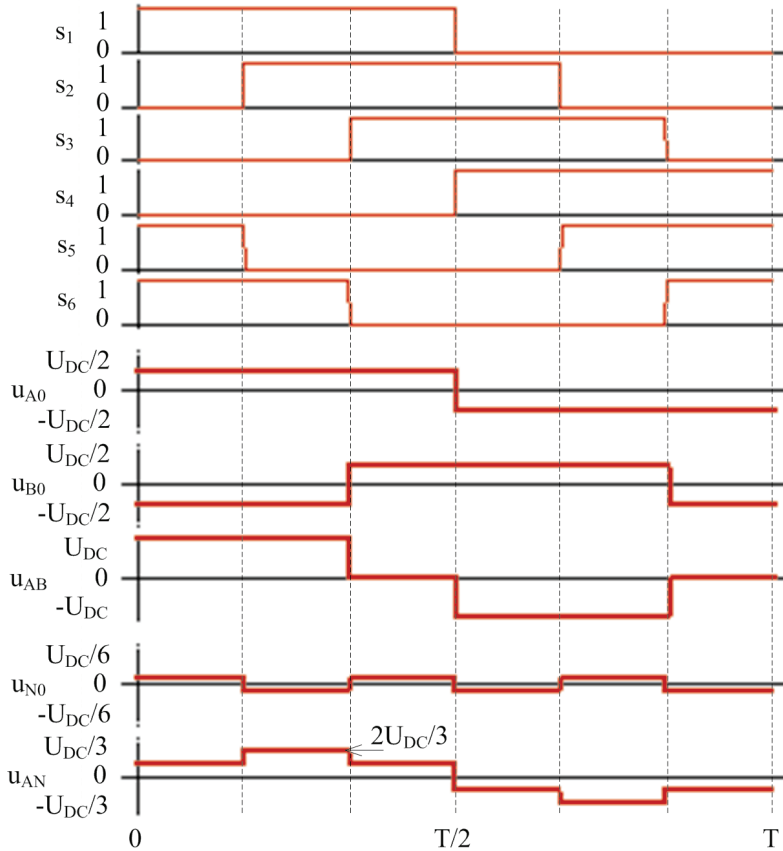
$$U_{ABrms} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{DC} \doteq 0,816U_{DC} \quad (4.16)$$

jeho základní harmonická potom

$$U_{ABrms1} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot U_{DC} \doteq 0,78U_{DC} \quad (4.17)$$

Fázové napětí na zátěži rovněž obsahuje vyšší harmonické řádu ( $6h \pm 1$ )

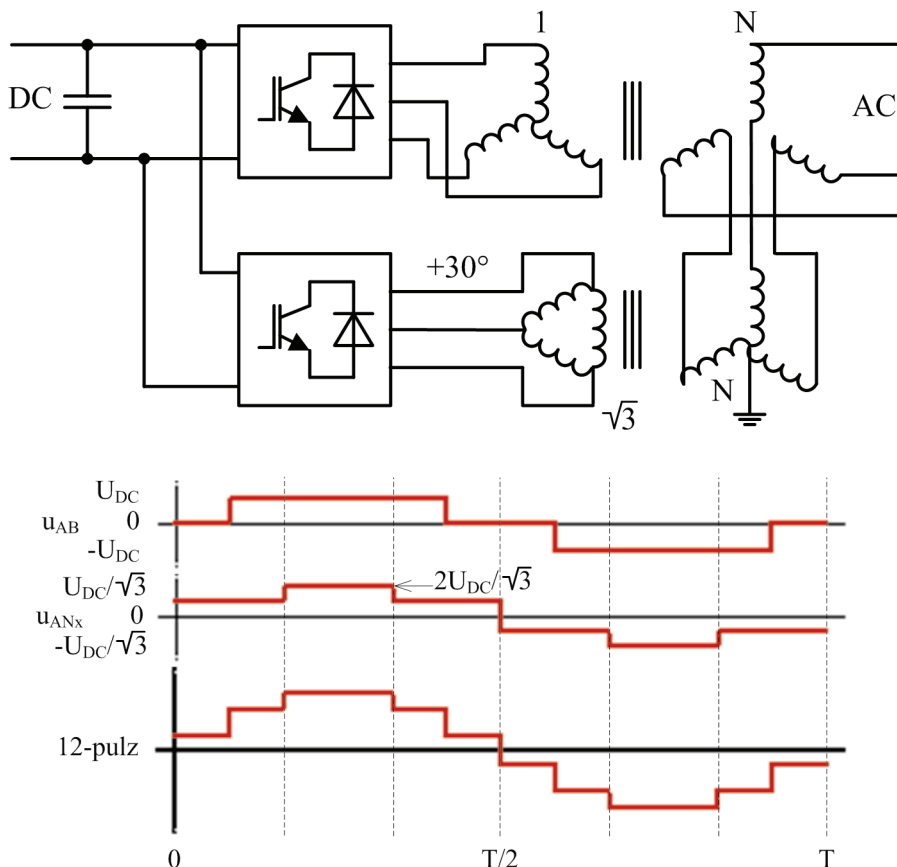
$$U_{ANh} = \frac{2}{\pi \cdot h} U_{DC} \cdot \cos(h \cdot \omega t) \quad , \text{ kde } h = 1, 5, 7, 11, 13, \dots \quad (4.18)$$



**Obr. 4.22: Průběhy veličin pro trojfázový šestipulzní měnič**

Existují možnosti, jak dále eliminovat harmonická napětí určitých řádů. Typickým příkladem je použití tzv. 12pulzního měniče, jehož střídavé výstupní napětí obsahuje pouze harmonické řádu ( $12h \pm 1$ ). Principem je vzájemná eliminace harmonických řádů 5, 7, 17, 19, ... u sdruženého a fázového napětí dvou šestipulzních měničů. Z výše uvedených vztahů plyne, že obsah harmonických je u obou těchto napětí stejný, pouze je zde odchylka v amplitudě a fázovém posuvu. Jedná se tak v podstatě o vzájemné spojení dvou měničů se společným stejnosměrným meziobvodem a rozdílnými výstupními transformátory, jejichž sekundární strany dávají výsledné střídavé výstupní napětí jako součet dvou dílčích výstupů. Požadavkem je pouze úprava fázového posuvu ( $30^\circ$ ) a amplitudy ( $1/\sqrt{3}$ ) mezi sdruženým napětím jednoho měniče a fázovým napětím měniče druhého. Výsledné napětí pak obsahuje šest nenulových úrovní. Schématické zapojení měničů a transformá-

torů včetně výstupních napětí znázorňuje *obr. 4.23*. Podobnou kombinací 4 (8) šestipulzních měničů lze dosáhnout výsledného 24 (48) pulzního zapojení, jehož výstupní napětí obsahuje pouze harmonické řádu  $(24h \pm 1)$ , resp.  $(48h \pm 1)$ .



**Obr. 4.23: Princip a průběhy napětí 12pulzního měniče**

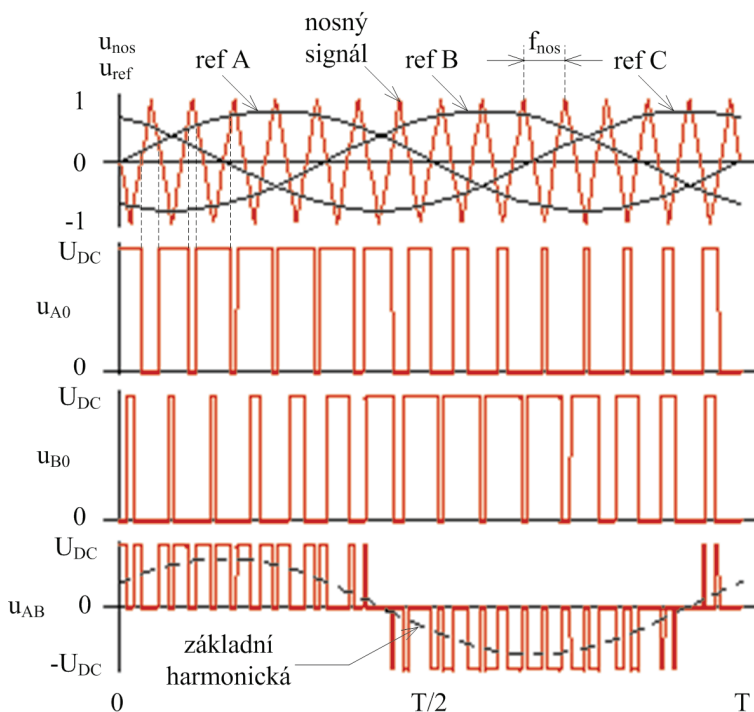
#### 4.3.4. Pulzně šířková modulace

U klasického obdélíkového řízení lze výstupní střídavé napětí řídit šířkou napěťových pulzů a amplitudou stejnosměrného mezinapětí. Jsou-li spínače v měničích realizovány vypínatelnými součástkami schopnými pracovat při vysoké frekvenci (GTO, IGBT), může být řízení provedeno výrazně častějším spínáním ventilů pomocí tzv. pulzně šířkové modulace (Pulse width modulation = PWM), při které může být vhodným způsobem regulována frekvence, amplituda i fáze střídavého napětí. Výhodnost použití PWM vyvažuje i určitou nevýhodu, kterou jsou vyšší spínací ztráty způsobené vyšší spínací frekvencí.

Princip metody PWM je přímo pro trojfázový šestipulzní měnič ilustrován na *obr. 4.24*. Metoda je založena na porovnávání referenčního harmonického signálu o požadované frekvenci  $f_1$  a nosného trojúhelníkového (pilovitého) signálu

s relativně vyšší frekvencí  $f_c$  (FACTS zařízení o výkonu 10x MW pracují s  $f_c$  100x Hz až 1x kHz). Pro trojfázový měnič existují tři nosné signály fázově posunuté o  $120^\circ$ . Porovnáváním je generován modulovaný obdélníkový signál, který řídí spínače v jednotlivých větvích měniče. Pro fázi A se tak jedná o střídavé spínání spínačů S1 a S4 podle porovnání okamžitých úrovní nosného signálu a signálu ref A. Výsledný průběh výstupního napětí je pak také sinusově modulovaný s několika násobně více pulzy s proměnlivou šířkou oproti obdélníkovému řízení a obsahuje požadovanou základní harmonickou. Podle úrovně referenčního sinusového signálu je možné řídit amplitudu výstupního napětí od nuly až do maximální hodnoty, která je dána jedním obdélníkovým pulzem za púlperiodu. Obdobně jako u obdélníkového řízení má výstupní fázové napětí dvě úrovně a sdružené napětí tři úrovně.

Za zmínku rovněž stojí fakt, že při použití PWM dochází ke snížení harmonických napětí nižších řádů. Pulzy výstupního napětí jsou symetrické kolem průchodu nulou sinusového referenčního signálu, protože nosný signál má frekvenci rovnou lichému násobku základní harmonické. To vede k obsahu pouze lichých harmonických. U trojfázových můstků se rovněž nevyskytují násobky třetí harmonické. Lze psát, že u PWM se vyskytují harmonická napětí řádu  $(k_1h \pm k_2)$ , kde  $k_1$  je poměr frekvencí  $f_c/f_1$  a  $h$ ,  $k_2$  jsou přirozená čísla. Obvykle však stačí uvažovat  $k_2$  maximálně rovno 2, neboť další harmonické jsou již velmi malé. Na obr. 4.24 je  $f_c = 15f_1$ , výstupní fázové napětí tedy bude obsahovat významné harmonické 11, 13, 17, 19,...



**Obr. 4.24: Dvojúrovňová PWM pro trojfázový šestipulzní měnič**

### 4.3.5. Dimenzování měničů

Vzhledem k nižším nákladům a snadnosti řízení jsou nejčastěji používané trojfázové měniče šestipulzní s jednou vypínatelnou součástí na ventil. U zařízení FACTS je obvykle potřeba instalovat mezi měnič a soustavu transformátor, což přináší možnost snáze přizpůsobit napětí a proud měniče potřebám sítě pomocí převodu transformátoru. Zmíněný typ šestipulzního měniče může být maximálně dimenzován na cca 10 MVA. Vzhledem k požadavku na nízké harmonické zkreslení je třeba volit mezi variantami harmonických filtrů a použitím pulzně šířkové modulace.

Protože obvykle je potřeba instalovat FACTS zařízení s vyšším instalovaným výkonem než 10 MVA, musí být zvoleno některé z následujících řešení:

- Použitím vícepulzních zapojení (12, 24, 48) pomocí 2, 4, 8 šestipulzních měničů lze jmenovitý výkon zněkolikanásobit a zároveň snížit úroveň harmonického zkreslení.
- Víceúrovňové měniče umožňují pracovat s vyšším napětím na větví (rozdělení na více součástek) a tím i s vyšším výkonem.
- Nejčastějším způsobem je spojování zařízení do série, zde je potřeba zajistit rovnoměrné rozdělení celkového napětí na dílčí zařízení pomocnými obvody.
- Zdvojnásobení počtu větví v měniči, které jsou spojeny paralelně. Dojde tak ke zvýšení proudového dimenzování.
- Spojování skupin měničů paralelně opět navýší celkový jmenovitý proud. U paralelního i sériového spojování je vždy třeba zajistit ochranu všech částí a jejich další chod v případě poruchy jedné části.

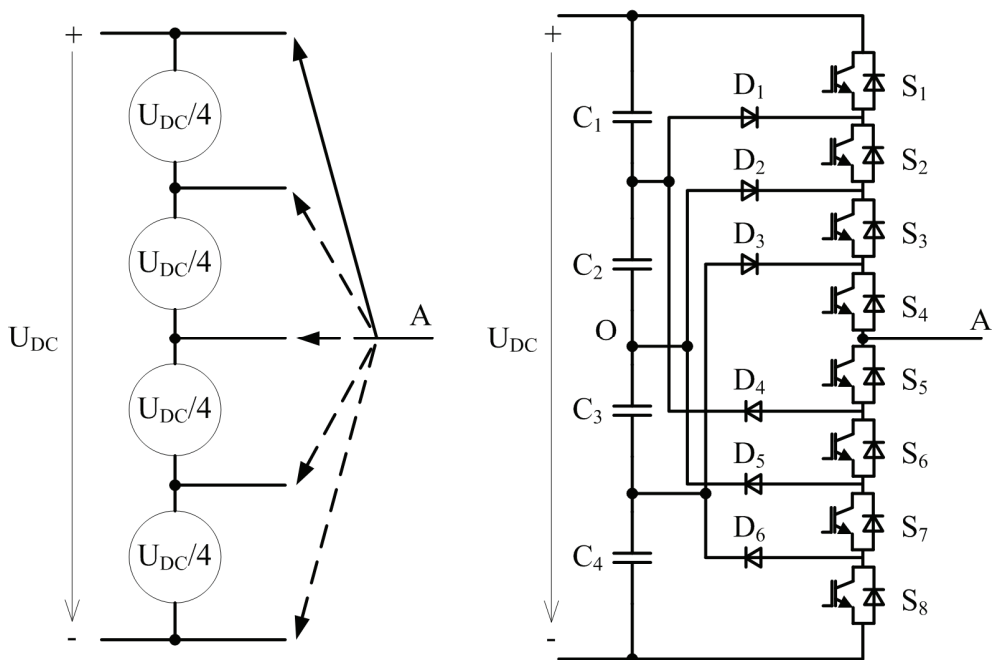
Výkonové měniče pro FACTS zařízení obvykle musejí splňovat vysoké nároky na napěťové, proudové a výkonové nároky na dimenzování, které je limitováno mezními parametry polovodičových součástek. Jejich možné paralelní a sériové řazení je nepříznivě ovlivněno rozptylem jejich parametrů, způsobeným odchylkami materiálu a technologií výroby. Nabízí se možnost používat součástky vytříbené s minimálními rozdíly parametrů, nebo kompenzační odpory, tlumivky a RC členy, aby bylo dosaženo rovnoměrného rozdělení proudů a napětí na jednotlivé součástky. U měničů velkých výkonů mohou být omezeny i spínací kmitočty, proto ne vždy lze použít pulzně šířkovou modulaci, a tak je někdy třeba zůstat u obdélníkového řízení. Pro vyšší efektivnost lze někdy použít víceúrovňové měniče nebo paralelně či sériově řazené základní dvojúrovňové měniče.

### 4.3.6. Víceúrovňové měniče

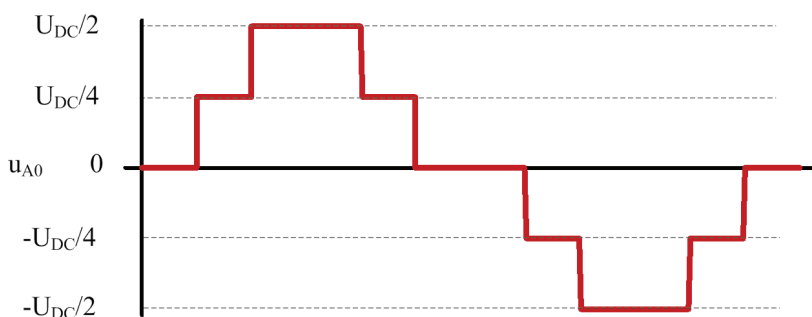
Protože zvyšování napěťového či proudového dimenzování přímým sériovým nebo paralelním spojováním součástek je technologicky velmi náročné a nákladné, bývají často jako alternativa využity právě víceúrovňové měniče, které se vyznačují složitější topologií obvodů. Určitou nevýhodou však při možnosti realizace více úrovní je potřeba většího množství pasivních i aktivních součástek a složitější řízení, které musí zajistit zejména rovnoměrné rozdělení napětí stejnosměrného meziobvodu.

Princip činnosti např. pětiúrovňového měniče plyne z *obr. 4.25* (viz. [8], [9], [10]). Jak bylo vysvětleno v předchozí kapitole, standardní dvojúrovňový měnič generuje výstupní napětí (fáze – střední bod 0) dvou možných stejnosměrných potenciálů  $+U_{DC}/2$  a  $-U_{DC}/2$ . Případné vyvedení středního bodu 0 vede k realizaci tříúrovňového měniče, kde k původním dvěma potenciálům přibude ještě potenciál nulový. U uvedeného pětiúrovňového je stejnosměrné napětí mezi obvodu rozděleno na čtvrtiny, ke kterým ještě přibude nulový potenciál. Celkem tedy máme k dispozici pět úrovní (viz. *obr. 4.26*). Vlastní technická realizace jednoduchého principu je však poněkud složitější, což dokládá schéma jedné fáze měniče na *obr. 4.25*. Napájecí stejnosměrné napětí je rozděleno pomocí kapacitního děliče, který je na výstupní svorku spínán pomocí vypínatelných součástek s antiparalelními diodami. Dílčí potenciály děliče jsou vedeny mezi jednotlivé vypínatelné součástky tzv. vazebními (upínacími) diodami, jejichž úkolem je zajistit rovnoměrné rozdělení napětí mezi jednotlivými součástkami. Toto je jedním z hlavních úkolů řízení celého měniče, neboť napětí dílčích kondenzátorů se může měnit vlivem proměnlivosti proudů příslušné fáze. Hlavní výhodou víceúrovňových měničů však zůstává bezpečné dělení celkového napětí na jednotlivé součástky bez přehnaných nároků na přesnost jejich parametrů. Takto lze dosáhnout použití měničů pro vyšší napěťové hladiny. Další výhodou je pak obecně nižší obsah harmonických ve výstupním napětí než u klasických měničů.

Základní princip řízení pětiúrovňového měniče představuje *tab. 4.3*. Připojení jednotlivých úrovní stejnosměrného napětí k výstupní svorce je realizováno kombinací vedení spínačů a vazebních diod, a to odlišně pro obě polarity výstupního proudu.



**Obr. 4.25: Princip a schéma zapojení pětiúrovňového měniče s upínacími diodami**



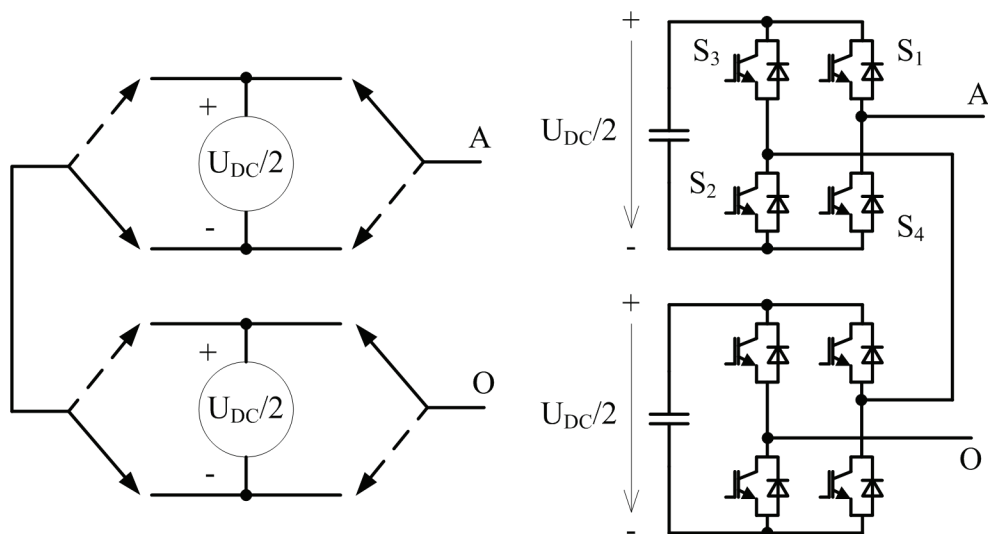
**Obr. 4.26: Průběh výstupního napětí pětiúrovňového měniče**

| Výstupní napětí $U_{A0}$ |               | $U_{DC}/2$                               | $U_{DC}/4$           | 0               | $-U_{DC}/4$          | $-U_{DC}/2$                              |
|--------------------------|---------------|------------------------------------------|----------------------|-----------------|----------------------|------------------------------------------|
| Součástky vedoucí proud  | Kladný proud  | $S_1, S_2, S_3, S_4$                     | $D_1, S_2, S_3, S_4$ | $D_2, S_3, S_4$ | $D_3, S_4$           | $S_5, S_6, S_7, S_8$<br>(antipar. diody) |
|                          | Záporný proud | $S_1, S_2, S_3, S_4$<br>(antipar. diody) | $S_5, D_4$           | $S_5, S_6, D_5$ | $S_5, S_6, S_7, D_6$ | $S_5, S_6, S_7, S_8$                     |

**Tab. 4.3: Spínání prvků pětiúrovňového měniče s upínacími diodami**

Jinou možností realizace víceúrovňových měničů je např. řetězové zapojení jednofázových můstků s vypínatelnými součástkami, kde kondenzátor každého můstku je nabit na shodné napětí. Čtyři vypínatelné součástky každého můstku potom umožňují tři různá zapojení příslušného kondenzátoru do obvodu (kladná polarita – sepnuty  $S_1$  a  $S_2$ , záporná polarita – sepnuty  $S_3$  a  $S_4$ , nulový vliv pomocí bypassu – sepnuty  $S_1$  a  $S_3$  nebo  $S_2$  a  $S_4$ ) – viz. pětiúrovňový měnič obr. 4.27. Zda proud povede vypínatelná součástka či její antiparalelní dioda opět závisí na polaritě výstupního proudu. Pro  $n$  částí řetězce v sérii dostaneme  $2n+1$  úrovňový měnič. Průběh výstupního napětí odpovídá obr. 4.26.



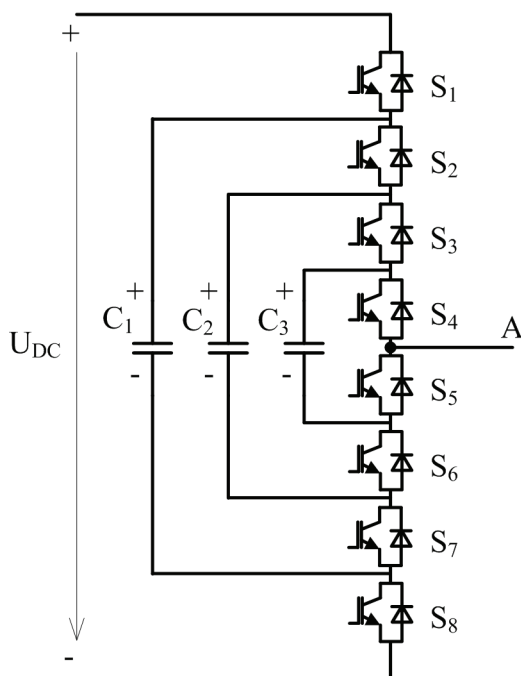


**Obr. 4.27: Princip a schéma zapojení pětiúrovňového měniče s řetěžením můstků**

Další varianta využívá tzv. vazebních kondenzátorů. Pro  $n$ -úrovňový měnič je v jedné fázi zapojeno  $2(n-1)$  vypínatelných součástek sériově a  $(n-2)$  vazebních kondenzátorů, které jsou zapojeny symetricky mezi součástky směrem k oběma stejnosměrným svorkám. Napětí těchto vazebních kondenzátorů jsou různá, např.

$$U_{C1} = \frac{3}{4} U_{DC}, U_{C2} = \frac{1}{2} U_{DC}, U_{C3} = \frac{1}{4} U_{DC} \text{ pro pětiúrovňový měnič dle obr. 4.28.}$$

Princip činnosti tohoto typu měniče je různým spínáním součástek dosáhnout sériového řazení napájecího stejnosměrného napětí a dílčích napětí vazebních kondenzátorů o různých napětích tak, že na výstupu střídavé strany se objevuje proměnlivé napětí. Minimálně tak máme k dispozici nulové napětí, maximálně plné stejnosměrné napětí, celkem  $n$  úrovní.



**Obr. 4.28: Schéma pětiúrovňového měniče s vazebními kondenzátory**

## 4.4. Literatura

- [1] Valouch, V.: Výkonová elektronika a kvalita elektrické energie. ČVUT v Praze, 2007.
- [2] ABB Polovodiče [online]. 2009 [cit. 2009-02-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.abb.com/semiconductors>>.
- [3] Power Modules – Infineon Technologies [online]. 2009 [cit. 2009-02-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.eupec.com>>.
- [4] IGBTs SCRs GTOs Diodes Power Semiconductors - Dynex Semiconductor [online]. 2009 [cit. 2009-02-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.dynexsemi.com>>.
- [5] POLOVODIČE, a.s. - Produkty [online]. 2009 [cit. 2009-02-23]. Dostupný z WWW: <<http://www.plovodice.cz/products.php>>.
- [6] Hingorani, N.G., Gyugyi L.: Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, c2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8.
- [7] Acha, E., Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O., Miller, T.J.E.: Power Electronic Control in Electrical Systems. Oxford: Newnes Press, c2002. 443 s. ISBN 0-7506-5126-1.
- [8] Skvarenina, T.L.: The Power Electronics Handbook. CRC Press, 2002. 664 s. ISBN 0-8493-7336-0.
- [9] Pavelka, J., Čeřovský, Z.: Výkonová elektronika. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. 201 s. ISBN 80-01-02094-0.
- [10] CIGRE Working group B4.19: Static Synchronous Compensator (STATCOM) for Arc Furnace and Flicker Compensation. Paris: CIGRE, 2003. 170 s.

## 5. Vodiče pro venkovní vedení

Vodiče patří mezi nejdůležitější části elektrického vedení, neboť volba vodiče působí nejen na cenu vedení, ale i na provozní bezpečnost, protože přetržení vodiče může způsobit velkou poruchu v dodávce elektrické energie, ale i zhroutení několika kilometrů vedení jednostranným tahem. Na volbě vodiče závisí také ztráty energie, úbytky napětí apod. Proto se na vodiče vyžadují určité požadavky:

- velká pevnost
- odolnost proti chemickým vlivům, povětrí a chvění
- odolnost proti poškození při montáži
- malé ztráty pevnosti při oteplení

Vodiče mohou být realizovány jako prosté kulaté dráty, anebo také jako lana. Použití drátu je velmi omezené, nejvíce se používají v rozvodech NN. V dnešní době je nejčastějším vodičem lano, které je konfigurováno v koncentrické stočené formě. Směr kroucení je obrácen v přilehlých vrstvách, přičemž směr krutu vnější vrstvy je konvenčně pravotočivý. Lana mají tu výhodu, že jsou ohebnější než drát téhož průměru. [2], [7]

Zvyšování přenosových schopností vedení je označováno také jako „uprating“. Jeho základní metody jsou uvedeny v *tab. 5.1*.

| Zvyšování | Metoda                | Nástroj                                                                   |
|-----------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Proudu    | Zvýšení teploty       | zvětšení výšky závěsného bodu vodiče<br>změna mechanického tahu ve vodiči |
|           | Výměna vodičů         | kompaktní / hladké vodiče<br>vysokoteplotní vodiče                        |
|           | Speciální metoda      | statistické metody<br>metody reálného času                                |
| Napětí    | Izolace               | výměna / přídavných izolátorů<br>modifikace uchycení                      |
|           | Vzdálenost vůči zemi  | zvětšení výšky závěsného bodu vodiče<br>změna mechanického tahu ve vodiči |
|           | Mezifázová vzdálenost | změna dvojitého vedení na jednoduché<br>nová hlava stožáru                |

**Tab. 5.1: Metody a nástroje upratingu**

Je zřejmé, že přenášený elektrický výkon vzroste při zvýšení napětí anebo proudu. Z hlediska míry zásahu do konstrukce vedení jsou metody zvyšování napětí určitě náročnější a finančně nákladnější. Při zvyšování proudu, který protéká fázovými vodiči, dochází k nárůstu Joulova tepla generovaného ve vodiči a tím se zvyšuje teplota vodiče. Klasická AIFe lana umožňují ustálení při teplotách do 80 °C a další zvyšování teploty resp. protékaného proudu není možné. Vysokoteplotní vodiče jsou schopny díky své konstrukci pracovat při teplotách 150 °C i více, a tak je možné je dostatečně proudově (a výkonově) zatěžovat. V důsledku lineární tepelné roztažnosti materiálů přímo použitých pro vodiče dochází k prodloužení vodiče

a tedy zvýšení průhybu vodiče v rozpětí. Tím se zkrátí vzdálenost lana od terénu a od křížovaných objektů a může dojít k porušení bezpečnostních izolačních vzdáleností. Tento efekt je nutné kompenzovat buď zvýšením závěsného bodu vodiče (s tím souvisí modifikace uchycení vodiče anebo zásah do konstrukce stožáru), připnutím vodiče na vyšší mechanický tah, nebo použitím tzv. nízko-průhybových vodičů. [8]

## 5.1. Druhy vodičů

Nejvíce rozšířenými vodiči pro přenos elektrické energie jsou tzv. AIFe lana, ale v poslední době se objevují speciální typy nových vodičů s materiály na bázi nejrůznějších slitin, jejichž hlavním úkolem je zvýšit přenosové vlastnosti vodičů, a tedy vedení. Velice používaným materiálem jsou hliníkové slitiny, protože poskytují dostatečnou vodivost při zachování přijatelné mechanické pevnosti a jejich používání neustále roste. Nejčastěji používanou slitinou je hliník – hořčík – křemík. Hlavní legující prvky jsou omezené a pohybují se v rozmezí Mg 0,4 ÷ 0,9 %, Si 0,3 ÷ 0,7 %, Fe < 0,7 % a Cu < 0,5 %. Pečlivá kontrola nad složením a zpracováním slitin musí být zachována už v průběhu výrobního procesu, abychom dosáhli požadované kombinace pevnosti a vodivosti.

### 5.1.1. Materiály používané ve vodičích

Jako materiál pro lana venkovních vedení se používají tyto materiály a toto značení:

- tvrdě tažený hliník podle EN 60889, označený jako AL1
- slitina hliníku podle EN 50183, označená jako AL2 – AL7
- pozinkovaný ocelový drát podle EN 50189, označován jako ST1A, ST2B, ST3D, ST4A, ST5E a ST6C, kde číslice a písmeno vyjadřují jakost a třídu.
- ocelový drát pokrytý hliníkem podle EN 61232 s označením třídy 20SA (stupeň A a B), 27SA, 30SA, a 40SA.

### 5.1.2. Klasické vodiče

Protože neexistuje žádný „jedinečný“ materiál, je drtivá většina lan venkovních vedení nehomogenní, tj. složená z více než jednoho materiálu. Obvykle je tak nosný materiál jádra s velkou pevností obklopen materiálem s vysokou vodivostí. Nejběžnějším typem lana je hliníkový vodič s ocelovým jádrem (**AIFe** lana), mezinárodně označován jako **ACSR** (Aluminium Conductor Steel Reinforced), který je používán již déle než 90 let. Změnou poměru průřezů hliníku a oceli lze dosáhnout vyšší pevnosti vodiče na úkor jeho vodivosti (např. pro oblasti s velkou námrazou), nebo naopak vyšší vodivosti na úkor pevnosti. [9]



Obr. 5.1: Průřez A1Fe lanem

### 5.1.3. Celohliníkové vodiče

Mezi celohliníkové vodiče patří vodič **AAC** (All Aluminium Conductor) a **AAAC** (All Aluminium Alloy Conductor). Tyto vodiče jsou vyrobeny z homogenní hliníkové konstrukce. Slitinou je tepelně ošetřený hořčík – křemík – hliník. Vodiče AAAC mohou nabídnout výrazné zlepšení tepelných vlastností oproti klasickým lanům. Celohliníkové vodiče mají vyšší pevnost, neboť pokud bychom je naplnili na podobné procento jmenovité pevnosti jako A1Fe lana, mohou být nastavena na vyšší teplotu, aniž by způsobily výrazný průhyb. Je však třeba poznamenat, že napínání na podobné procento jmenovité pevnosti by mělo za následek problémy pro vedení citlivé na vibrace.

Celohliníkové vodiče mají obecně dobrou antikorozi ochranu, neboť nepřítomnost ocelového jádra odstraňuje možnost vzniku galvanické koroze, k níž může docházet u klasických A1Fe lan. Nicméně vzniku koroze není ve všech případech zamezeno, a to zejména v pobřežních oblastech, kde je běžnou praxí u vodičů AAAC používat mazivo, aby se zabránilo korozi způsobené mořskou solí.

### 5.1.4. Vodiče ze zesílené hliníkové slitiny

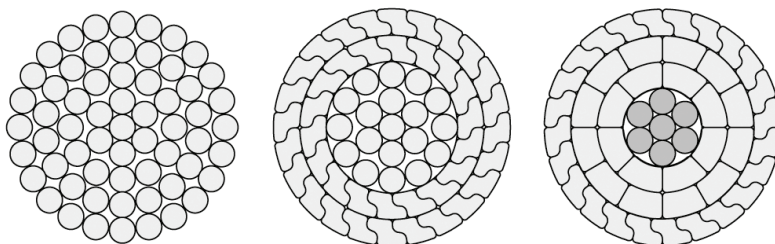
Mezi tyto vodiče patří také vodič označovaný **ACAR** (Aluminium Conductor Alloy Reinforced). Tento vodič kombinuje prvky vyrobené z hliníkové slitiny, obvykle stejné jako pro AAAC, a elektrovedného hliníku. To umožňuje získat vlastnosti vodiče, které mají být optimalizovány pro konkrétní aplikace. Zvýšením množství použitého elektrovedného hliníku se zvýší vodivost vodiče, na úkor pevnosti. Stejně tak, pokud se zvyšuje počet drátů ze slitiny, zvyšuje se i mechanická pevnost vodiče na úkor vodivosti. [9]

## 5.2. Tvar vodičů

Vodiče venkovního vedení jsou zkonstruované ze spirálovitých točivých drátů s kruhovým příčným řezem. To má za následek průřez vodiče obsahující poměrně velké oblasti dutin. Pomocí drátů lichoběžníkového tvaru může být zkonstruován vodič se zvětšeným poměrem kovu vůči vzduchu. Zhutněné vodiče mohou být celohliníkové **AAAC/TW** (trapezoidal wire) nebo vodiče ze zesílené hliníkové slitiny **ACAR/TW**, kde obal vodiče tvoří lichoběžníkové hliníkové dráty.

Design vodiče může být tvořen mozaikou ve tvaru písmene „Z“, při kterém se zformované vodiče efektivně tisknou. Tvarované vodiče mají větší hliníkovou část a tak nižší odpor než normální vodič kruhového průřezu se stejným vnějším průmě-

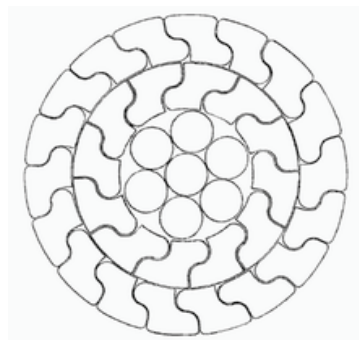
rem. U vedení s vodiči z tvarovaných drátů, bude váha vodičů větší a tím i mírně vyšší zatížení stožáru. Nebo je naopak možné dosáhnout menšího průřezu a tím i větrného namáhání při zachování stejných hodnot činného odporu vodiče. [9], [10], [14]



**Obr. 5.2: Tvary vodičů**

### 5.2.1. Lana Z-Formed

Tato lana získala svůj název dle průřezu drátu vrchních vrstev. Dráty jsou tvaru písmene Z, jak je vidět na obr. 5.3. Díky zvýšené hustotě lana je vnější i vnitřní teplota velice podobná. Díky tomu je dosaženo o 11÷16 % vyšší přenosové schopnosti. [6]



**Obr. 5.3: Průřez lana s vrstvami Z**

Výrobce uvádí, že kompaktnost vrstvy má také za následek až dvakrát rychlejší tlumení vibrací. Kompaktnost lana by ovšem mohla mít i zcela opačné následky. K samotnému tlumení vibrací totiž dochází jednak ztrátou energie ohýbáním lana a hlavně vzájemným posunem jednotlivých vrstev. Oboje je kompaktností velmi zhoršeno.

Tlak větru vysokých rychlostí na lano je oproti klasickému ACSR lanu až o 40 % nižší. Díky tomu a díky rychlému tlumení vibrací se objevuje tzv. efekt tančení vodičů až u značně vyšších rychlostí větru. Pokud už tančení vodičů nastává, děje se ve značně menším rozsahu.

Do sebe zapadající dráty ve vrchní vrstvě zabraňují korozi uvnitř lana a celkově je zpomaleno stárnutí vodiče. Testy prováděné po 18 letech na klasických vodičích a na těchto vodičích typu Z-Formed s vnitřním mazivem prokázaly, že u kla-

sických vodičů dojde ke ztrátě asi 28 % maziva zatímco u Z-Formed lan pozorujeme téměř výchozí stav.

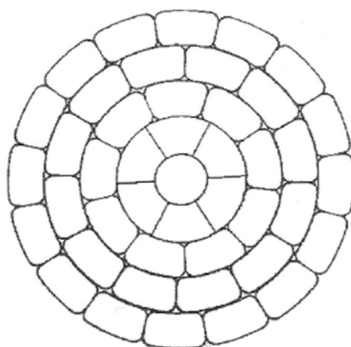
Další výhodou těchto lan je také menší produkce koróny díky hladkému povrchu a absenci prachových částic, které mohou být smyty deštěm. U klasických lan zůstávají nečistoty v prohlubních mezi dráty vrchní vrstvy, povrch lana se tak stává drsnější a efekt koróny se tím ještě zvyšuje. Z-Formed má tak pochopitelně i menší ztráty na vedení.

I co se týče tvorby sněhových vrstev a námrazku, dochází u těchto vodičů ke zlepšení. Klasické lano se po zachycení malé vrstvičky sněhu na povrchu pootočí, čímž dochází postupně ke vzniku sněhové vrstvy na celém povrchu a následně i k jejímu růstu. Zatímco Z-Formed se díky kompaktnosti nenatáčí, takže vrstva vzniká stále na jedné straně a po dosažení určité tloušťky sama opadá. Testy také prokázaly, že námrazek se tvoří 1,5 až 3 krát méně než na klasických lanech. Instalace nevyžaduje žádné speciální armatury ani nářadí, protože se tyto vodiče vyrábí ve standardních průměrech AIFe lan.

Pokud srovnáme klasický vodič a Z-Formed stejného průřezu, vychází Z-Formed menšího průměru. Vzhledem k tomu, že rozhodující zátěž při dimenzování vedení bývá zatížení větrem na omrzlý vodič, lze použít stožáry na menší zatížení. Netvoří se tak velké námrazky a plocha pro působení větru je menší. V případě vodiče o stejném průměru lze dosáhnout vyšší proudové zatížitelnosti.

### 5.2.2. Segmentová lana

Segmentová lana se vyrábí z drátů lichoběžníkových průřezů. Jejich vlastnosti jsou obdobné jako u Z-Formed lan popsanych v předchozím odstavci. Ve srovnání s klasickými lany výrobce lan udává nárůst proudové zatížitelnosti o 15 ÷ 25 %, menší průhyby, menší tlak větru, menší zatížení námrazkem, zlepšené parametry koróny, omezení efektu tančení vodičů. Pro instalaci opět není třeba speciálního nářadí a armatur. Oproti Z-Formed má segmentové lano o něco menší tuhost a dráty nedrží tak dobře v sobě.



**Obr. 5.4: Průřez segmentového vodiče**

### 5.2.3. Válcovaná lana

V podstatě se jedná o mezistupeň mezi klasickými vodiči a vodiči z profilovaných drátů. Tato lana se po slanění válcují nebo protáhnou průvlakem, takže se jejich povrch blíží lanům z profilovaných drátů. Hlavním přínosem je snížení gradientu elektrického pole a z toho plynoucí snížení korózy. Díky výrobě z normálních, běžně dostupných drátů a slanění standardními stroji výroba vychází mnohem levněji.

## 5.3. Speciální vodiče

### 5.3.1. Vysokoteplotní vodiče

Vysokoteplotní vodiče tvoří specifickou skupinu vodičů, které umožňují svými materiálovými vlastnostmi a vhodnou konstrukcí ustálený provoz i při vysokých teplotách a zachovávají si při tom svoje mechanické vlastnosti. Patří sem čtyři nejrozšířenější typy vodičů: **TACSR** (nebo ZTACSR), **GTACSR** (nebo GZTACSR), **TACIR** (nebo ZTACIR) a **ACSS**. Všechny tyto vodiče jsou stvořeny kombinací ocelového jádra (duše) kvůli mechanickým vlastnostem a slitinou hliníku tvořícího plášť kvůli vodivosti. Ocelové dráty jsou obalené mazivem, aby se předešlo korózi mezi ocelí a hliníkem. Mazání sice zabraňuje korózi lana, má ovšem nepříznivý vliv na samotlumicí schopnosti lan, takže ta pak více trpí vibracemi. Vlastnosti rozličných slitin hliníku a oceli používaných pro vysokoteplotní vodiče jsou porovnané v *tab. 5.2* a *tab. 5.3*.

| Slitina hliníku       |          | Vodivost (%) | Minimální únosnost v tahu (MPa) | Povolená provozní teplota (°C) |              |
|-----------------------|----------|--------------|---------------------------------|--------------------------------|--------------|
|                       |          |              |                                 | Ustálená                       | Pohotovostní |
| Tvrký                 | 1350-H19 | 61,2         | 159 ÷ 200                       | 90                             | 120          |
| Tepelně odolný        | TAL      | 60           | 159 ÷ 176                       | 150                            | 180          |
| Zvlášť tepelně odolný | ZTAL     | 60           | 159 ÷ 176                       | 210                            | 240          |
| Plně žíhaný           | 1350-0   | 63           | 59 ÷ 97                         | 200 ÷ 250                      | 250          |

**Tab. 5.2: Porovnání vlastností nejpoužívanějších slitin hliníku**

Slitiny TAL a ZTAL, společně označované jako (Z)TAL jsou tzv. teplotně odolné slitiny, u kterých jsou vodivostní a mechanické vlastnosti podobné klasické slitině 1350H19, avšak jsou schopné při provozu za výrazně vyšších teplot. Plně žíhaná slitina 1350-0 je schopna vysokých teplot při provozu, ale její mechanické vlastnosti zaostávají oproti ostatním typům.



|                                      | Minimální únosnost v tahu (MPa) | Modul pružnosti (GPa)            | Koeficient lineární roztlačnosti ( $\times 10^{-6}$ ) |
|--------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Galvanizovaná ocel HS                | 1230 – 1320                     | 206                              | 11,5                                                  |
| Galvanizovaná ocel EHS               | 1765                            |                                  |                                                       |
| AC ocel plátovaná Al 20,3 % I.A.C.S  | 1103 ÷ 1344                     | 162                              | 13,0                                                  |
| Zinc – 5 % Al Mischmetal Standart HS | 1380 ÷ 1450<br>1520 ÷ 1620      | 206 (počáteční)<br>186 (konečný) | 11,5                                                  |
| Galv. Invar                          | 1030 ÷ 1080                     | 162                              | 2,8 ÷ 3,6                                             |

**Tab. 5.3: Porovnání vlastností nepoužívanějších ocelí**

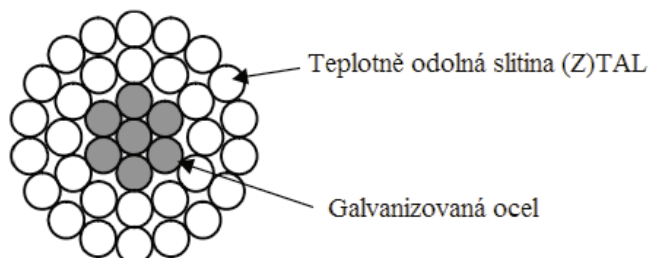
Jak je vidět z *tab. 5.3*, slitina Invaru (slitina železa a niklu) vykazuje velmi nízký koeficient lineární roztlačnosti, který je způsobený jejím speciálním složením (36 % Ni), avšak její únosnost je nižší než u ostatních typů ocelí.

Vodiče TACSR a (Z)TACIR jsou slaňované jako klasické ACSR vodiče. Jejich elektrické a mechanické vlastnosti jsou výsledkem vlastností hliníku a oceli, ze kterých jsou vyráběné. ACSS vodiče mohou být klasického kruhového průřezu vyráběné z kompaktních hliníkových vodičů. V obou případech záleží vlastnosti vodiče především na vlastnostech ocelových drátů z hlediska mechanických poměrů.

Unikátní vlastnosti vodičů G(Z)TACSR jsou důsledkem jak vlastností drátů, tak také konstrukce. Vnitřní vrstva (Z)TAL drátů je kompaktní a malá mezera mezi ocelovým jádrem je ponechána kvůli možnosti instalace vodiče tak, aby bylo namáhané tahem jen ocelové jádro.

### Vodiče (Z)TACSR

Vodiče (Z)TACSR svojí konstrukcí připomínají klasické ACSR vodiče s galvanizovanými ocelovými dráty v jádře a (Z)TAL dráty v plášti. Tento typ vodiče je skoro ve všech ohledech stejný jako ACSR. Slitina hliníku použitá v těchto vodičích má o něco větší vodivost než běžný hliník.

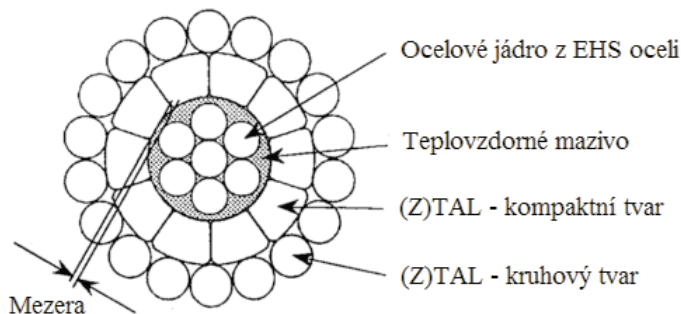


**Obr. 5.5: Průřez vodičem (Z)TACSR**

Na rozdíl od ostatních vysokoteplotních vodičů, (Z)TACSR není navržený jako nízkoprůhybový, neboť má stejné vlastnosti v oblasti teplotní roztažnosti jako ACSR vodič. Hlavní výhodou tohoto vodiče je, že hliníková slitina TAL se nežihá do teploty 150 °C, a slitina ZTAL do teploty 210 °C, protože povolená provozní teplota pro ACSR lana je jen 80 °C. (Z)TACSR vodiče je možné použít na zvýšení přenosové schopnosti existujících vedení v případě, kde je dostupná bezpečná vzdálenost od terénu, kdy u vedení při vyšší teplotě po poklesu vodičů nebudou porušeny provozní předpisy pro vedení. Vodiče na bázi ocelového jádra jsou charakteristické tzv. zlomovým bodem, který představuje teplotu, při jejímž překročení se změní vlastnosti vodiče. Při překročení této teploty se kvůli vyšší teplotní roztažnosti hliníku stane to, že celý tah je přenesený na ocelové jádro. Protože koeficient lineární roztažnosti oceli je mnohem nižší než pro hliník a jeho slitiny, bude se za tímto zlomovým bodem vodič prodlužovat o mnoho méně a to zabezpečí nižší průhyb při vysoké provozní teplotě než v případě, kdyby se koeficient lineární tepelné roztažnosti s rostoucí teplotou neměnil. Také klasická AlFe lana mají tuto pozitivní vlastnost, avšak zlomový bod je zpravidla za dovolenými limity lana. V současnosti se TACSR vodič používá jako náhrada ACSR.

### Vodiče G(Z)TACSR

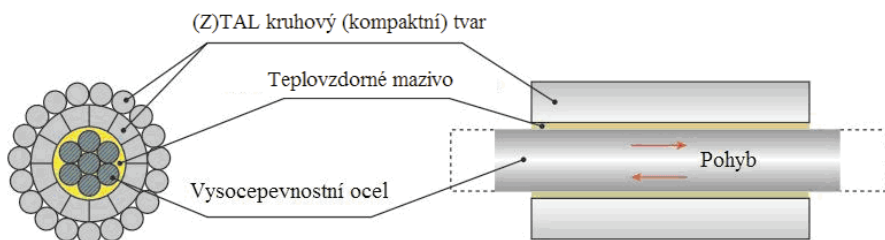
Vodiče G(Z)TACSR se svojí konstrukcí liší od klasických vodičů. G = gap – mezera, to znamená, že ve vodiči existuje mezera mezi jádrem a vnitřní vrstvou pláště. Důvodem takovéto konstrukce je fakt, že tato mezera umožňuje zvlášť napínat ocelové jádro a zvlášť napínat plášť vodiče. Při vhodně zvolených tazích se stanoví zlomový bod tak, že nižší tepelná lineární roztažnost oceli se projeví při větším rozsahu teplot. Mezera je vyplněna tepluvzdorným mazivem za účelem snížení tření mezi ocelovým jádrem a hliníkovou vrstvou. Potom se hliníková vrstva a ocelové jádro pohybují nezávisle.



**Obr. 5.6: Průřez vodičem GTACSR**

Hlavní nevýhodou GZTACSR vodičů je jejich složitá instalace, která vyžaduje v místě instalace rozpletení hliníkové vrstvy tak, aby bylo odkryté ocelové jádro, které se uchytí a napne na požadovaný tah. Poté se hliníkové dráty opět navijí na jádro a vodič je úspěšně nainstalovaný. Některé armatury potřebné pro uchycení takového vodiče se liší od běžných, některé části jsou ale stejné. Mimo toto je potřeba zhruba každé třetí rozpětí instalovat speciální typ nosné svorky, abychom

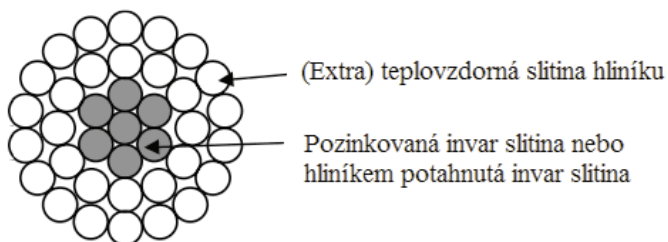
předešli případným problémům způsobeným třením, které vznikne mezi ocelovým jádrem a hliníkovými vrstvami. [8], [10], [11], [12]



**Obr. 5.7: Uspořádání vodiče GTACSR**

### Vodiče (Z)TACIR

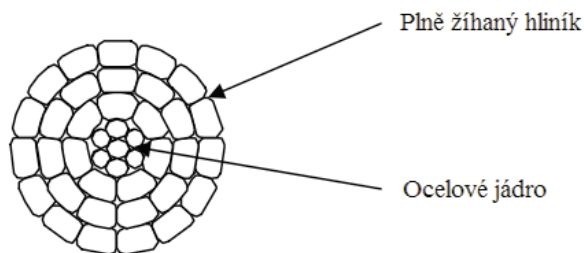
Podobně jako (Z)TACSR jsou tyto vodiče slaňované konvečně jako ACSR lana. Výhody (Z)TACIR vodičů jsou v materiálových vlastnostech použitých slitin. Namísto klasické oceli je tu použita galvanizovaná Invar ocel. Invar je slitina s 36 % niklu a toto složení ji zajišťuje minimální koeficient roztažnosti (přibližně třetinová hodnota oproti ostatním ocelím). (Z)TAL slitina tvořící hliníkový plášť umožňuje provoz až do teplot 210 °C.



**Obr. 5.8: Průřez vodičem TACIR**

### Vodiče ACSS a ACSS/TW

Tyto vodiče jsou charakteristické plně žháným hliníkem (1350-0) tvořícího plášť vodiče okolo ocelového jádra. Ve vodičích s jedním ocelovým drátem tvořícím jádro není možné aplikovat ACSS (Aluminium Conductor Steel Supported) konfiguraci. Kolem ocelového jádra je hliník ve stabilizovaném stavu, přičemž nese žádné napětí, a tudíž nehrozí jeho tečení. Ocel tak nese celé namáhání vodiče a pevnost neklesá ani při teplotách do 200 °C. Tepelná roztažnost celého vodiče je podobná roztažnosti samotné oceli. ACSS vodiče jsou standardně dostupné ve třech různých vyhotoveních: klasické kruhové vodiče, kompaktní hliníkový obal nebo se zesílenou ocelí. Ve všech případech vykazují ACSS vodiče mnohem lepší tlumící vlastnosti než klasické ACSR vodiče.

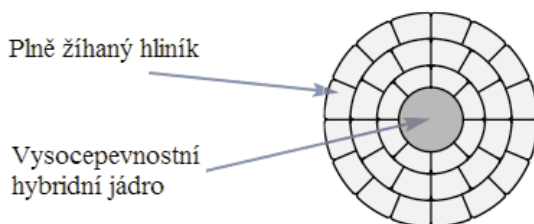


**Obr. 5.9: Průřez vodičem ACSS/TW**

Protože pevnost hliníku 1350-0 je nižší než 1350-H19, zaručená únosnost ACSS vodiče je snížena v závislosti na konstrukci. Kompenzovat tuto negativní vlastnost můžeme buď použitím extra pevných ocelí v jádře, zvýšením průřezu jádra vodiče nebo kombinací. Mechanické napětí plně žíhaných hliníkových drátů je nízké, teplenou roztlačnost ACSS lana přebírá v celém rozsahu ocelové jádro. [8], [10], [11]

### Vodiče ACCC

Hliníkové vodiče s kompozitním jádrem (ACCC – Aluminium Conductor Composite Core) využívají vysoké pevnosti hybridního kompozitního jádra, které odolává tepelnému průhybu díky svému nízkému koeficientu tepelné roztlačnosti. Jádro těchto vodičů umožňuje začlenit další hliníkové vrstvy v daném průřezu, aniž by se tím nějak výrazně zvýšila hmotnost. Tím se sníží ztráty ve vedení při rostoucí přenosové schopnosti. ACCC vodič je složen z plně žíhaných zformovaných hliníkových drátů lichoběžníkového tvaru spirálovitě točených kolem hybridního jádra z uhlíkových vláken. Tento vodič je navržen tak, aby spojil energetickou účinnost s vysokou teplotou, a bude provozuschopný i při nižších teplotách při stejném přenašeném výkonu ve srovnání s jinými vodiči podobného průměru a hmotnosti.



**Obr. 5.10: Průřez vodičem ACCC**

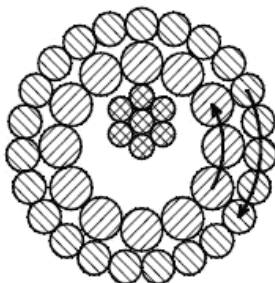
### 5.3.2. Vodiče s optickými vlákny

Kombinované zemnicí lano označované jako OPGW (Optical Ground Wire) je vodič ve kterém jsou umístěny optická vlákna. Tento vodič se používá v přenosové soustavě, kde slouží jako ochrana proti atmosférickým vlivům a plní funkci uzemnění, ale také slouží jako prostředek pro možnou komunikaci po vedení. Vodič OPGW v sobě zahrnuje trubkovou konstrukci z hliníku obsahující jedno nebo více



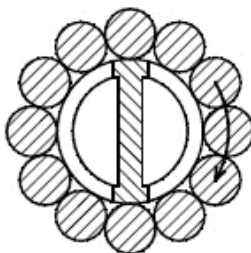
### 5.3.3. Další vodiče

Anti-vibrační lana se skládají z dutého obalového lana, které je opletené hliníkovými dráty. Uvnitř dutého lana je ocelové lano, které je volně uložené. Obě lana jsou napnuté různým tahem (ocelové běžně vyšším), takže jejich kmitočty jsou rozdílné a lana se nemohou navzájem rozkmitat. Použití takových vodičů je sice výhodné, ale také velmi drahé. Na obr. 5.12 je znázorněn řez anti-vibračním vodičem.



Obr. 5.12: Konstrukce anti-vibračního vodiče

Dutá lana se používají především v případech, kdy je nutné zvětšením průměru lana snížit ztráty korónou. Protože jsou lehčí než plná lana (při zachování stejného povrchu), mohou se zatížit více. Uvnitř dutého lana je spirálovitě navinutá pružina s T nebo I profilem. Tato pružina má zabránit zploštění vodiče. Pro upevnění se používají speciální svorky, které zachycují vnitřní pružinu i vnější obal. Řez dutým vodičem je znázorněn na obr. 5.13.



Obr. 5.13: Konstrukce dutého vodiče

## 5.4. Systém značení vodičů

Systém značení vodičů se provádí podle pravidel zavedených v ČSN EN 50 182 *Vodiče venkovního elektrického vedení – Lanované vodiče vinuté z koncentrických kruhových drátů*. K identifikaci slané hliníkových vodičů s ocelovými dráty nebo bez nich a k označování homogenních vodičů z ocelových pozinkovaných drátů a z ocelových drátů, pokrytých hliníkem, se používá následující systém značení:

- a) Homogenní hliníkové vodiče se označují **ALx**, kde x udává druh hliníku (*AL1* přitom značí čistý hliník podle ČSN IEC 889 *Tvrde tažené hliníkové dráty pro vodiče nadzemního vedení*, *AL2* až *AL7* slitiny hliníku podle ČSN EN 50 183 *Dráty ze slitiny Al – Mg – Si pro vodiče venkovních vedení*).
- b) Homogenní vodiče z ocelových drátů, pokrytých hliníkem podle ČSN EN 61 232 *Ocelohliníkové dráty pro elektroenergetiku*, se označují **yzSA**, kde y představuje typ oceli (stupeň *A* nebo *B*, platí pouze pro třídu *20SA*) a z představuje třídu hliníkového plátování (*20*, *27*, *30* nebo *40*).
- c) Kombinované vodiče, složené z hliníkových a pozinkovaných ocelových drátů, se označují **ALx / STyz**, kde *ALx* určuje vnější hliníkové dráty (v obálce) a *STyz* určuje ocelovou duši. V označení pozinkovaných ocelových drátů y představuje typ oceli (stupeň *1* až *6*) a z představuje třídu zinkového povlaku (*A* až *E*).
- d) Kombinované vodiče, složené z hliníkových drátů a z ocelových drátů, pokrytých hliníkem se označují **ALx / yzSA**, kde *ALx* určuje vnější hliníkové dráty (v obálce) a *yzSA* určuje ocelovou duši.
- e) Homogenní vodiče z ocelových pozinkovaných drátů podle ČSN EN 50 189 *Pozinkované ocelové dráty pro vodiče venkovních vedení* se označují **STyz**, kde y představuje typ oceli (stupeň *1* až *6*) a z představuje třídu zinkového povlaku (*A* až *E*).

#### Vodiče jsou určeny takto:

Kódovým číslem, udávající jmenovitý průřez hliníku nebo oceli, zaokrouhlený na celé číslo. Označením, určujícím typ drátu, tvořících vodič. U kombinovaných vodičů první část označení platí pro vnější obálku a druhá část pro duši vodiče.

#### Příklady:

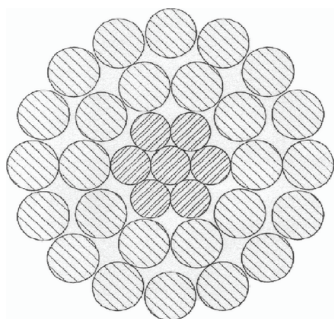
- **587 – AL2**: vodič z hliníku *AL2* o průřezu  $586,9 \text{ mm}^2$ , zaokrouhleném na  $587 \text{ mm}^2$ .
- **401 – AL1/28 – ST1A**: vodič tvořený dráty z hliníku *AL1* okolo duše z ocelových pozinkovaných drátů *ST1A* s pozinkováním třídy *A*. Průřez drátů *AL1*, zaokrouhlený na celé číslo, je  $401 \text{ mm}^2$  a průřez pozinkovaných ocelových drátů, zaokrouhlený na celé číslo, je  $28 \text{ mm}^2$ .
- **66 – A20SA**: vodič z ocelových drátů, pokrytých hliníkem stupně *A*, třídy *20* o průřezu  $65,8 \text{ mm}^2$ , zaokrouhleném na  $66 \text{ mm}^2$ .
- **66 – ST4A**: vodič z ocelových pozinkovaných drátů *ST4A* (s pozinkováním třídy *A*), o průřezu  $65,8 \text{ mm}^2$  zaokrouhleném na  $66 \text{ mm}^2$ .

#### 5.4.1. Specifikace a schéma konstrukce lana

Zkroucením drátu má lano větší váhu i elektrický odpor, menší pevnost a modul pružnosti než plný drát stejného průřezu a délky. Pevnost lana je menší než součet pevností jednotlivých drátů, a to asi o 10 %, neboť již vlastní pevnost drátů v laně je menší než před sláněním. Soustředná lana mají v ose drát jako duši, a

počet drátů stejného průřezu je v lanu v několika vrstvách, ty tvoří tzv. obal. Kombinovaná lana se skládají z drátů různých kovů, aby se dosáhlo větší pevnosti, nebo většího průměru pro zmenšení koróny. Dutá lana se dříve vyráběla hlavně proto, aby se průměr měděného lana zvětšil při požadované zatížitelnosti tak, aby nevznikaly ztráty korónou. V dnešní době je nejobvyklejší kombinace pro výrobu lan hliník s ocelí. V poslední době se začínají objevovat nové materiály na bázi slitin pro výrobu samotných lan.

Dále je uveden příklad specifikace AIFe lana včetně jeho konstrukce a základních elektrických a mechanických parametrů.



**Obr. 5.14: Konstrukce lana**

|             |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Označení    | 362-AL1/59-ST1A                                                          |
| Duše vodiče | 1+6 pozinkovaných ocelových drátů ST1A, průměr 3,28 mm (EN 50189)        |
|             | celkový průřez ocelových drátů 59,1 mm <sup>2</sup>                      |
|             | ocelová duše vodiče mazaná (podle EN 50182, příloha B, případ 1)         |
| Obal        | 1. vrstva: 10 hliníkových drátů AL1 průměr 4,21 mm (EN 60889)            |
|             | 2. vrstva: 16 hliníkových drátů AL1 průměr 4,21 mm (EN 60889)            |
|             | celkový průřez hliníkových drátů 361,9 mm <sup>2</sup>                   |
|             | hliníkové vrstvy nemazané                                                |
| Vodič       | jmenovitý průměr vodiče 26,68 mm                                         |
|             | celkový průřez vodiče 421,1 mm <sup>2</sup>                              |
|             | hmotnost vodiče na jednotku délky 1462,2 kg/km (1473,9 kg/km vč. maziva) |
|             | jmenovitý elektrický stejnosměrný odpor při +20°C 0,0798 Ω/km            |
|             | jmenovitá pevnost v tahu 122,97 kN                                       |
|             | směr vinutí vnější vrstvy pravotočivý (Z)                                |

**Tab. 5.4: Specifikace AIFe lana**

## 5.5. Literatura

- [1] LIST, Vladimír; POCHOP, Karel. Mechanika venkovních vedení. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955. 464 s.
- [2] FECKO, Š.; ŽIARAN, J.; VARGA, L. Elektrické siete, Vonkajšie silové vedenia. Bratislava: ES STU, 1990.



- [3] PINHO, João T. A, Modified OPGW Cable to Account for Higher Temperature Capacity During Short Circuit and Lightning Events. 2008 [cit. 2010-03-22]. Dostupné z WWW: <<http://www.ufpa.br>>
- [4] TLUSTÝ, Josef; KYNCL, Jan. Klimaticky závislá ampacita přenosových linek. Elektroenergetika. 2003, č. 2, s. 61-63
- [5] TOMČÍK, Jaroslav. Proudové dimenzování AIFe lan. Elektrotechnický obzor. 1988, č. 11, s. 650-654.
- [6] Alcatel Cable Benelux: The Revital Of High Voltage Overhead Lines
- [7] MATĚNA, Štěpán. Výroba a rozvod elektrické energie 2. Praha: SNTL/ALFA, 1978. 662 s.
- [8] BINDZÁR, M.; REVÁKOVÁ, D.; SAMÁŠ, J.j. Vysokoteplotné vodiče pre vonkajšie elektrické vedenia. Časopis EE. 2009, č. 5, s. 32-36.
- [9] Conductors of Overhead Transmission lines, [cit. 2010-02-12]. Composite Overhead Conductors, Dostupné z WWW: <<http://www.scribd.com/doc/6653753/4075050>>.
- [10] Working Group B2.12. Conductors for the Uprating of Overhead Lines. CIGRE. 2003, 11, s. 2-46.
- [11] ART, J.; PETERSON, Jr.; HOFFMANN, Sven. Transmission Line Conductor Design Comes of Age. In. U.S. : 2003 [cit. 2010-03-04]. Dostupné z WWW: <[http://tdworld.com/mag/power\\_transmission\\_line\\_conductor/index1.html](http://tdworld.com/mag/power_transmission_line_conductor/index1.html)>.
- [12] J-POWER SYSTEMS CORP. [online]. Japan: 2005 [cit. 2010-03-04]. Gap type thermal-resistant aluminum alloy conductor steel reinforced. Dostupné z WWW: <[http://www.jpowers.co.jp/english/product/pdf/gap\\_c1.pdf](http://www.jpowers.co.jp/english/product/pdf/gap_c1.pdf)>.
- [13] Optical ground wire In Wikipedia : the free encyclopedia [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 8 December 2006, 13 March 2010 [cit. 2010-04-06]. Dostupné z WWW: <[http://en.wikipedia.org/wiki/Optical\\_ground\\_wire](http://en.wikipedia.org/wiki/Optical_ground_wire)>.
- [14] LAMIFIL [online]. 2009 [cit. 2010-03-19]. Overhead Conductors Efficiency Power Reliability. Dostupné z WWW: <[lamifil.be](http://lamifil.be)>.

## 6. Ampacita linek venkovních vedení

Proudová zatížitelnost (ampacita) vodičů venkovního vedení není v čase konstantní, ale mění se s klimatickými podmínkami (teplota okolí, rychlost větru, intenzita slunečního záření), teplotou vodiče a pracovními podmínkami. Obecně je proudová zatížitelnost omezena maximální dovolenou provozní teplotou vodiče, která je dána typem vodiče, a závisí na režimu zatížení (ustálený stav, dynamický stav, přechodný děj).

Provozní teplota AIFe lana může v jednotlivých pracovních režimech nabývat různých maximálně přípustných hodnot dle normy ČSN EN 50341-3-19:

$T_d$ ..... *dovolená provozní teplota*, tj. maximální teplota při normálním provozu

$T_o$ ..... časově omezená nouzová provozní teplota

$T_z$ ..... teplota při zkratu

Maximální teploty AIFe lan v různých pracovních režimech ukazuje *tab. 6.1*.

| $T_d$ (°C) | $T_o$ (°C) | $T_z$ (°C) |
|------------|------------|------------|
| 80         | 150        | 200        |

**Tab. 6.1: Maximální teploty AIFe lan**

Důležitost sledování teploty vodiče plyne z jejích důsledků. Velikost dosažené provozní teploty výrazně ovlivňuje zejména tah v laně, průhyb lana a kvalitativní změny materiálu (tečení za studena, vyžhání a rekrystalizace hliníku).

### 6.1. Tepelné modely venkovního vedení

Pro lana venkovního vedení lze použít tepelný model se soustředěnými parametry, protože u běžně používaných AIFe lan platí i při extrémních povětrnostních podmínkách pro Biotovo podobnostní kritérium:

$$Bi = \frac{\alpha_{\Sigma} \cdot d_{\text{char}}}{\lambda} < 0,02 \ll 0,1 \quad (6.1)$$

kde

$\alpha_{\Sigma}$ ..... úhrnný součinitel přestupu tepla zahrnující konvekci i sálání  
( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ )

$d_{\text{char}}$ ..... charakteristický rozměr tělesa (u kruhového průřezu jeho průměr)  
(m)

$\lambda$ ..... tepelná vodivost tělesa ( $\lambda_{Al} = 205 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ,  
 $\lambda_{Fe} = 47 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )

I pro případ extrémních povětrnostních podmínek (velký součinitel přestupu tepla konvekcí při vysoké rychlosti větru) platí pro vedení nerovnost:

$$Bi < 0,02 \ll 0,1 \quad (6.2)$$

kde hodnota 0,1 je limitní pro použití modelu se soustředěnými parametry. Pak platí, že tepelný odpor mezi povrchem vodiče a okolním prostředím je o řád větší než tepelný odpor mezi středem vodiče a jeho povrchem. V tom případě je téměř veškerý teplotní spád lokalizován vně vodiče a teplotu uvnitř vodiče lze při výpočtech považovat po průřezu konstantní až k povrchu vodiče, tedy jako soustředěný parametr – průměrná teplota vodiče  $T_{AV}$  (°C).

### 6.1.1. Diferenciální rovnice pro teplotu vodiče

Pro teplotu vodiče pak můžeme napsat bilanční diferenciální rovnici tepelných výkonů [1]:

$$M \cdot c_p \frac{dT_{AV}}{dt} = P_Z + P_S - P_R - P_C \quad (W/m) \quad (6.3)$$

kde

$M$  ..... poměrná hmotnost vodiče (kg/m)

( $M = \rho \cdot S = \text{hustota} \cdot \text{průřez}$  (kg·m<sup>-3</sup>, m<sup>2</sup>))

$c_p$  ..... měrná tepelná kapacita (J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)

$P_Z$  ..... Joulový ztráty způsobené průchodem proudu – *Joule heating* (W/m)

$P_S$  ..... výkon dodávaný slunečním zářením – *solar heating* (W/m)

$P_R$  ..... výkon odvedený sáláním – *radiative cooling* (W/m)

$P_C$  ..... výkon odvedený konvekcí – *convective cooling* (W/m)

Součtem všech výkonů (levá strana rovnice) je tedy výkon akumulující tepelnou energii v hmotě vodiče (lana vedení).

Uvažujeme-li AlFe lano s průřezem hliníku  $S_{Al}$  a průřezem oceli  $S_{Fe}$ , pak poměrnou hmotnost celého lana můžeme vyjádřit jako

$$M = \rho_{Al} \cdot S_{Al} + \rho_{Fe} \cdot S_{Fe} \quad (kg/m ; kg/m^3, m^2) \quad (6.4)$$

a měrnou tepelnou kapacitu lana

$$c_p = \frac{c_{Al} \cdot \rho_{Al} \cdot S_{Al} + c_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot S_{Fe}}{\rho_{Al} \cdot S_{Al} + \rho_{Fe} \cdot S_{Fe}} \quad (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}) \quad (6.5)$$

kde

$S_{Al}, S_{Fe}$ .. celkový průřez hliníkových a ocelových lan vodiče ( $m^2$ )

$\rho_{Al}, \rho_{Fe}$ .. hustota hliníku a oceli ( $kg \cdot m^{-3}$ )

$$\rho_{Al} = 2703 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ a } \rho_{Fe} = 7780 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

$c_{Al}, c_{Fe}$ .. měrná tepelná kapacita hliníku a oceli ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )

$$c_{Al} = 897 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ a } c_{Fe} = 477 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

### 6.1.2. Ustálený stav

Za ustálený stav uvažujeme případ, kdy teplota vodiče, elektrický proud, okolní teplota, sluneční záření, rychlost větru a směr větru jsou konstantní.

Protože platí  $\frac{dT_{AV}}{dt} = 0$ , nedochází k akumulaci tepelné energie ve vodiči, bilanční rovnice se zjednoduší a dostaneme:

$$P_Z + P_S - P_R - P_C = 0 \quad (\text{W/m}) \quad (6.6)$$

#### Joulové ztráty

Joulové ztráty vyvolané průchodem střídavého proudu jsou závislé na střídavém odporu vedení  $R_{ac}$  ( $\Omega/m$ ), který je obecně závislý na teplotě i procházejícím proudu, a kvadrátu protékajícího proudu. Provozní proud  $I_p$  (A) (efektivní hodnota) pak vyhřívá lano výkonem

$$P_Z = I_p^2 \cdot R_{ac} = I_p^2 \cdot R_{dc0} \cdot k_{ac} [1 + b(T_{AV} - T_0)] \quad (\text{W/m}) \quad (6.7)$$

kde

$R_{dc0}$ ..... měrný stejnosměrný odpor ( $\Omega/m$ ) při teplotě  $T_0$

$T_0$ ..... referenční teplota, obvykle  $20^\circ\text{C}$

$b$ ..... teplotní součinitel odporu ( $K^{-1}$ ). Protože výsledná hodnota součinitele  $b$  bývá výrazně bližší hodnotě pro hliník, lze ve zjednodušeném modelu uvažovat  $b = b_{Al}$ .

$$b_{Al} = 4,03 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \text{ a } b_{Fe} = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$k_{ac}$ ..... poměr mezi střídavým a stejnosměrným odporem (-). Závisí zejména na skinefektu, hysterezních ztrátách, vířivých prouděch a proudovém zatížení.

$$k_{ac} = R_{ac}/R_{dc} > 1$$

## Výkon dodaný slunečním zářením

Celkové sluneční záření, dopadající na obecnou rovinu, je součtem záření přímého  $I_{př}$ , difúzního  $I_d$  a odraženého  $I_r$ . S dostatečnou přesností lze uvažovat pouze tepelné účinky přímého slunečního záření  $I_{př}$  ( $W/m^2$ ), protože zbývající dvě složky se na celkovém vyhřívání lana podílejí v kritických případech maximálně 2 až 4 %.

Pro výkon  $P_S$  můžeme napsat:

$$P_S = aDI_{př} \sin \omega \quad (W/m) \quad (6.8)$$

kde

$a$  ..... koeficient pohltivosti slunečního záření (-)

$D$  ..... průměr vodiče (m)

$I_{př}$  ..... intenzita přímého slunečního záření dopadajícího na rovinu kolmou na směr slunečních paprsků

$\omega$  ..... úhel, který svírají sluneční paprsky s osou vodiče (válce) ( $^\circ$ )

S ohledem na oblačnost lze celkový sluneční výkon  $P_S$  dále korigovat např. koeficientem, který nabývá hodnot od 0 (noc) do 1 (jasno) podle pokrytí oblohy mraky, které snižují celkový průměrný výkon dodaný slunečním zářením.

## Výkon odvedený sáláním

Tento výkon je určen známým vztahem:

$$P_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot \pi \cdot D \cdot \left[ (T_{AV} + 273,15)^4 - (T_a + 273,15)^4 \right] \quad (W/m) \quad (6.9)$$

kde

$T_a$  ..... teplota okolí ( $^\circ C$ )

$\sigma$  ..... Stefanova-Boltzmannova konstanta  
( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ )

$\varepsilon$  ..... emisivita tepelného záření

## Výkon odvedený konvekcí

Při tomto typu ochlazování je třeba rozlišovat konvekci volnou (za bezvětří je proudění chladicího média - vzduchu - způsobené rozdílem teplot lana a vzduchu, a tedy změnou hustoty vzduchu během jeho ohřívání) a konvekci vynucenou (pohyb vzduchu je vyvolán větrem). Na ochlazování vodiče mají vliv parametry větru:

a) průměrná rychlost větru  $\overline{w_s}$  (m/s)

- b) nárazovost (turbulence) větru  $\bar{u}$
- c) úhel  $\psi$  mezi směrem větru a normálou k ose vodiče
- d) výška vodiče nad zemí a členitost terénu

Tyto vlivy lze pro naše potřeby zjednodušeně respektovat tím, že je nahradíme ekvivalentní rychlostí větru  $w_S$  (při  $\bar{u} = 0$  a  $\psi = 0^\circ$ ), která má stejný ochlazovací účinek.

Dále budou použity tyto fyzikální konstanty:

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad \text{normální tíhové zrychlení}$$

$$\beta = \frac{1}{T + 273,15} \text{ K}^{-1} \quad \text{teplotní součinitel rozpínivosti vzduchu}$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a} = 0,71 \quad \text{Prandtlovo číslo pro vzduch}$$

$\nu$  ..... kinematická viskozita ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$a$  ..... teplotní vodivost ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Definiční teplotou pro výpočty bude teplota mezní stykové vrstvy chladicího média:

$$T = \frac{T_{AV} + T_a}{2} \quad (^\circ\text{C}) \quad (6.10)$$

Kinematická viskozita vzduchu  $\nu$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) mírně závisí na teplotě  $T$  a na nadmořské výšce  $v_H$  (m). V oboru  $0^\circ\text{C} < T < 100^\circ\text{C}$  a  $v_H < 2000$  m lze pro vzduch aproximovat:

$$\nu = 10^{-7} (133 + 0,96 T + 0,019 v_H + 0,000113 v_H \cdot T) \quad (\text{m}^2 / \text{s}) \quad (6.11)$$

Tepelná vodivost vzduchu  $\lambda$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) závisí pouze na teplotě  $T$ . Ve stejném oboru jako u  $\nu$  lze aproximovat:

$$\lambda = 6,68 \cdot 10^{-5} T + 0,0244 \quad (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) \quad (6.12)$$

Grashoffovo číslo je

$$\text{Gr} = \frac{\beta \cdot g \cdot D^3 (T_{AV} - T_a)}{\nu^2} \quad (6.13)$$

pozn. Pro případ obtékání lana vzduchem je jeho průměr  $D$  zároveň definičním rozměrem používaným pro výpočet podobnostních čísel.

Nusseltovo číslo  $Nu_V$  pro volnou konvekci je

$$Nu_V = c_V (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (6.14)$$

kde konstanta  $c_V$  nabývá hodnot 0,436 až 0,54, uvažujeme průměrně  $c_V = 0,5$ .

Nusseltovo číslo  $Nu_N$  pro nucenou konvekci závisí na Reynoldsově čísle:

$$Re = \frac{w_s \cdot D}{\nu} \quad (6.15)$$

$$Nu_N = c_N \cdot Re^n \quad (6.16)$$

Konstanty  $c_N$  a  $n$  jsou závislé na Reynoldsově čísle podle *tab. 6.2*.

| <b>Re</b>                    | <b><math>c_N</math></b> | <b><math>n</math></b> |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| $1 \leq Re < 4$              | 0,891                   | 0,33                  |
| $4 \leq Re < 40$             | 0,821                   | 0,385                 |
| $40 \leq Re < 4000$          | 0,615                   | 0,466                 |
| $4000 \leq Re < 40\,000$     | 0,174                   | 0,618                 |
| $40\,000 \leq Re < 400\,000$ | 0,0239                  | 0,805                 |

**Tab. 6.2: Reynoldsovo číslo**

Aby byl zajištěn spojitý průběh Nusseltova čísla v oblasti smíšené konvekce (přechod volné konvekce na nucenou), doporučuje se zavedení výsledného Nusseltova čísla  $Nu$ :

$$Nu = \sqrt[4]{Nu_V^4 + Nu_N^4} \quad (6.17)$$

Vztah (6.17) přechází při volné konvekci ( $Nu_V \gg Nu_N$ ) na  $Nu = Nu_V$  a při nucené konvekci ( $Nu_V \ll Nu_N$ ) na  $Nu = Nu_N$ .

V případě, že budeme respektovat vliv úhlu  $\psi$ , který svírá směr větru s normálou k ose vodiče, lze Nusseltovo číslo korigovat koeficientem  $k_w$ :

$$k_w = 1,194 - \sin \psi - 0,194 \cos 2\psi + 0,364 \sin 2\psi \quad (6.18)$$

Pokud nepřevládá žádný směr větru (např. u malých rychlostí  $w_s$ ), bývá uvažován úhel  $\psi = 45^\circ$ .

Pro součinitele přestupu tepla  $\alpha$  ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ) pak platí

$$\alpha = k_w \cdot \frac{Nu \cdot \lambda}{D} \quad (W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}) \quad (6.19)$$

A konečně tepelný výkon odváděný z lana konvekcí je roven:

$$P_C = \alpha \cdot \pi \cdot D \cdot (T_{AV} - T_a) \quad (W/m) \quad (6.20)$$

*pozn.* Ve vztahu je použit průměr  $D$  vnější vrstvy vodiče, i když povrch slano- vaného vodiče může být až o 40 ÷ 45 % větší než povrch hladkého vodiče stejného průměru. V mezerách mezi dílčími vodiči se totiž vytvoří stagnující vrstva a ke sdílení tepla konvekcí dochází až v oblasti kolem vnějšího průměru lana.

### Výpočet ampacity

Při výpočtu ampacity v ustáleném stavu pro danou teplotu vodiče je třeba nejprve znát tepelné výkony  $P_S$ ,  $P_R$  a  $P_C$ . Ustálený proud se pak spočte

$$I = \sqrt{\frac{P_R + P_C - P_S}{R_{ac}}} \quad (A) \quad (6.21)$$

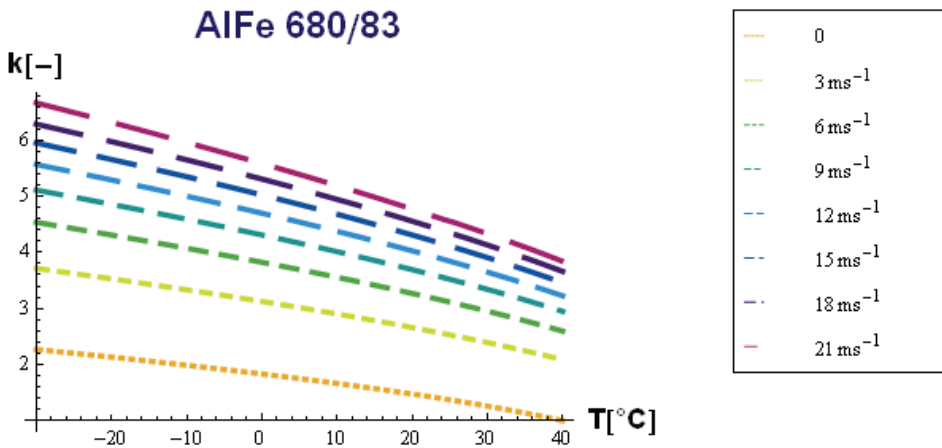
Tímto způsobem se provádí proudové dimenzování lan, kdy je počítána proudová zatížitelnost pro danou množinu vstupních údajů, tzv. hraničních klimatických podmínek (teplota okolí, rychlost větru, intenzita slunečního záření) a pro provozní teplotu vodiče.

### Výpočet ustálené teploty

Při výpočtu vycházíme z bilanční rovnice (6.6). Po dosazení všech známých veličin kromě teploty vodiče obdržíme polynomiální rovnici 4.řádu, kterou lze vyřešit numericky.

Na obr. 6.1 můžeme pozorovat typický vliv rychlosti větru a okolní teploty na možnost zatížení lana AIFe 680/83. Hodnota  $k$  na svislé ose udává činitel popisující, kolikrát více je možné lano zatížit oproti kritickému stavu za bezvětří a okolní teploty  $40^\circ C$ , tedy oproti podmínkám, kdy je odvod tepla do okolí minimální a kdy je nutné lano zatěžovat co nejnižším proudem.





**Obr. 6.1: Vliv větru a okolní teploty na zatížitelnost vodiče**

Z obr. 6.1 je zřejmý výrazný vliv rychlosti větru na ochlazování lana a tím na možnost lano zatěžovat vyšším proudem. Do uvedených 21 m/s se proudová zatížitelnost lana může až zněkolikanásobit. Menší, ale nezanedbatelný vliv má i teplota okolí. V rozsahu desítek  $^{\circ}\text{C}$  se proudová zatížitelnost mění řádově o desítky %.

### 6.1.3. Dynamické stavy

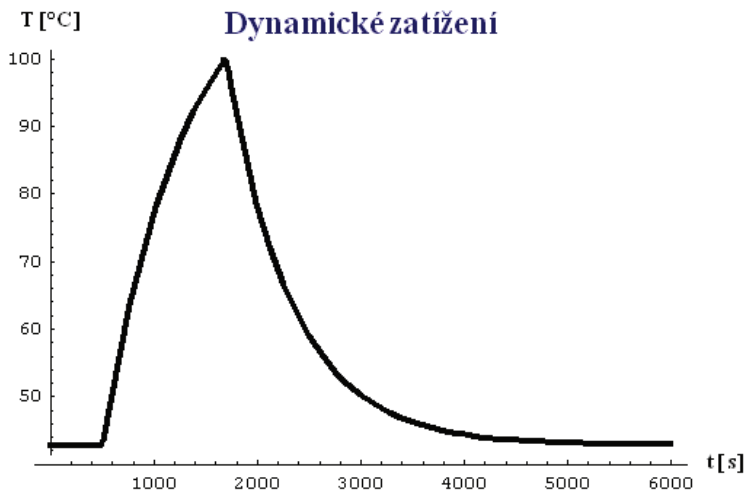
Vodič venkovního vedení prochází dynamickým stavem, když např. dojde ke krátkodobému přetížení linky díky připnutí či odepnutí vedení nebo ke skokové změně zatížení. Doba trvání takovýchto provozních podmínek bývá obvykle méně než 30 minut. Během dynamického stavu se projevuje schopnost vodiče akumulovat tepelnou energii, takže po krátkou dobu je možné nechat vodičem protékat vyšší proud než v ustáleném stavu, aniž by došlo k jeho přehřátí. Časovou závislost teploty vodiče v dynamickém stavu získáme jako řešení diferenciální rovnice (6.3).

V průběhu dynamického stavu, kdy dochází ke změnám teploty se mohou významně měnit parametry ovlivňující sdílení tepla, zejména činný odpor vodiče a součinitel přestupu tepla konvekcí. Při stanovení maximální dovolené teploty  $T_{\max}$  vodiče lze vypočítat proud  $I_{\max}$ , při jehož průchodu vodičem je tato maximální teplota dosažena právě za požadovaný čas  $t$ . Tento proud nazýváme **dynamická ampacita**.

Celková časová závislost teploty při krátkodobém přetížení vedení odpovídá modelové situaci na obr. 6.2, kdy bylo lano AIFe 680/83 při počátečním zatížení 1200 A přetěžováno po dobu 20 minut (1200s) tak, aby nebyla překročena teplota vodiče  $100^{\circ}\text{C}$ . Tomu odpovídala dynamická ampacita 2292 A. Modelový případ byl počítán pro jasný březnový den s teplotou okolí  $10^{\circ}\text{C}$ , rychlost větru 2 m/s kolmo na vodič.

Zde jsou vybrané parametry lana AIFe 680/83:

- průměr  $D = 35,8 \text{ mm}$
- průřez vodiče  $S = 761,69 \text{ mm}^2$
- ss odpor při  $20^\circ\text{C}$   $R_{dc0} = 0,0425 \Omega/\text{km}$
- poměrná hmotnost  $M = 2,48 \text{ kg/m}$
- měrná tepelná kapacita  $c_p = 787,5 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- dovolená teplota  $T_d = 80 \text{ }^\circ\text{C}$
- nouzová teplota  $T_n = 100 \text{ }^\circ\text{C}$



**Obr. 6.2: Průběh teploty při dynamickém stavu**

Z příkladu na *obr. 6.2* je zřejmé, že při přetěžování vodiče akumulují tepelnou energii postupně a teplota stoupá pozvolna po dobu několika minut až desítek minut. Pro běžné AIFe vodiče s průřezy používanými na přenosové soustavě probíhají dynamické děje s tepelnou časovou konstantou řádově 10 až 30 minut. To je obvykle dostatečná doba na to, aby operátoři svými zásahy do přenosové soustavy situaci stabilizovali a přerozdělením tekoucích proudů zabránili přehřátí přetěžované linky. Doba do dosažení maximální dovolené teploty pochopitelně závisí na předchozím ustáleném zatížení, které se v souvislosti s denním diagramem zatížení a nasazováním zdrojů mění, a tak se rovněž mění i potřeba rychle reagovat na uvedené dynamické změny v soustavě.

Rovněž lze vypočítat, že doba, za níž se vodič oteplí na mezní teplotu, je zřetelně kratší než doba, za níž se během postupného ochlazování vodič dostane zpět na původní ustálenou teplotu.

### 6.1.4. Přechodné děje

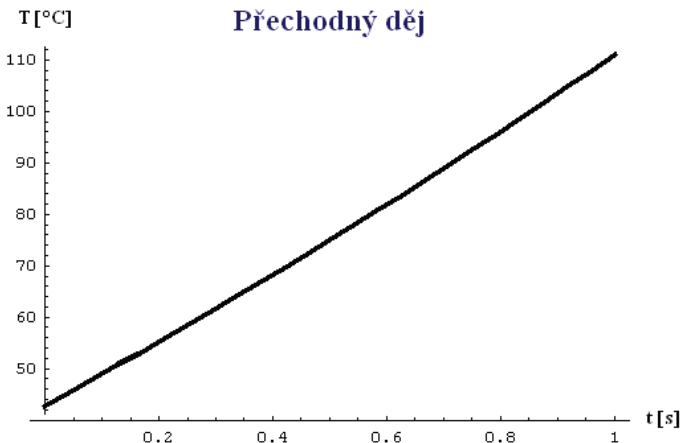
Za přechodné považujeme zkratové nebo bleskové proudy. Doba trvání těchto přechodných proudů bývá v rozsahu milisekund až desetin sekund, neboť většina poruch v obvodu bývá odstraněna během několika period síťové frekvence. Během této doby předpokládáme adiabatické podmínky, tedy žádnou výměnu tepla mezi vodičem a okolím, tj.  $P_S = 0, P_R = 0, P_C = 0$ . Rovněž uvažujeme konstantní měrnou tepelnou kapacitu  $c_p$  i poměr střídavého a stejnosměrného odporu  $k_{ac}$ .

Odezvu teploty vodiče na průchod zkratového či bleskového proudu  $I_Z$  získáme jako řešení následující diferenciální rovnice:

$$M \cdot c_p \frac{dT_{AV}}{dt} = P_Z = I_Z^2 \cdot R_{ac0} [1 + b(T_{AV} - T_0)] \quad (\text{W/m}) \quad (6.22)$$

Časová závislost teploty během *ochlazování* po vypnutí zkratového proudu je stejná jako v případě dynamických stavů, tedy již s uvažováním tepelné výměny s okolím a se zahrnutím všech tepelných výkonů.

Na *obr. 6.3* můžeme pozorovat vliv průchodu zkratového proudu vedením. Lanem AlFe 680/83 s počátečním zatížením 1200 A (viz předchozí příklad) procházel po dobu 1 sekundy zkratový proud o velikosti 50 kA.



**Obr. 6.3: Vliv zkratového proudu na teplotu vodiče**

Z *obr. 6.3* je vidět nebezpečí průchodu krátkodobých, ale velkých proudů. Během 1 sekundy se teplota vodiče zvýšila z cca 43 °C na cca 110 °C. Takovýto nárůst může vyvolat určité nepříjemnosti zvláště u lan s vyšším počátečním zatížením a nižší tepelnou kapacitou. Odtud je zřejmá důležitost odstranění poruch vysokorychlostními ochrannými systémy, které jsou schopné detekovat a odstranit poruchu během několika period proudu.

Spíše pro úplnost je uveden *obr. 6.4*, který znázorňuje ochlazovací průběh po vypnutí zkratu. Na první pohled je zřejmý podstatný rozdíl v časových konstantách obou průběhů. Na původní teplotu se lano ochladí téměř za 1 hodinu.



**Obr. 6.4: Ochlazení po zkratu**

## 6.2. Vliv parametrů na změnu ampacity

Proudová zatížitelnost vedení není stálá, ale mění se s klimatickými podmínkami a dalšími parametry. Tato kapitola se zabývá rozborem změny zatížitelnosti a teploty vodiče v ustálených stavech vlivem měnících se hodnot jednotlivých klimatických parametrů. Výpočet byl modelově proveden pro vodič 212-AL1/49-ST1A, jehož parametry jsou v *tab. 6.3*.

| Označení        | Průřez          |                 |                 | Průměr drátů |     | Průměr |         | DC odpor |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------|-----|--------|---------|----------|
|                 | AL              | ST              | celkový         | AL           | ST  | duše   | celkový |          |
|                 | mm <sup>2</sup> | mm <sup>2</sup> | mm <sup>2</sup> | mm           | mm  | mm     | mm      | Ω/km     |
| 212-AL1/49-ST1A | 212,1           | 49,5            | 261,5           | 3,0          | 3,0 | 9,0    | 21,0    | 0,1363   |

**Tab. 6.3: Parametry AIFe lana**

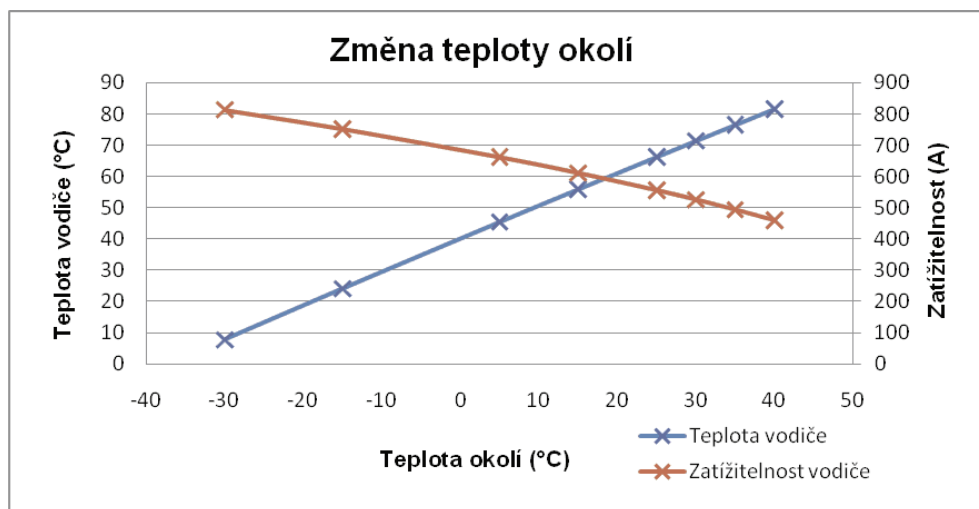
Pro analýzu vlastností vodičů venkovního vedení se vychází z podmínek vyplvajících z normy ČSN EN 50341-3-19:

- teplota okolí + 35 °C
- rychlost větru 0,5 m/s pod úhlem náběhu 45° na vodič
- intenzita slunečního záření 1 000 W/m<sup>2</sup>
- součinitel absorpce 0,5
- součinitel emisivity 0,5
- nadmožská výška 400 m n. m

V grafech jsou uvedeny charakteristické vlastnosti vodiče: jeho teplota a zatížitelnost. **Teplota** vodiče odpovídá velikosti proudu, který prochází lanem za normálního provozu při klimatických podmínkách uvedených v normě ČSN EN 50341-3-19. Velikost proudu je 500 A. **Zatížitelnost** vodiče je omezena dovolenou provozní teplotou  $T_d = 80\text{ °C}$ .

### 6.2.1. Změna teploty okolí

Výpočet byl prováděn ze stávajících klimatických podmínek vyplývajících z normy ČSN EN 50341-3-19 a to tak, že se měnil parametr teploty okolí a ostatní klimatické parametry byly považovány za neměnné. Změna teploty okolí byla provedena v rozsahu  $-30\text{ °C}$  až  $+40\text{ °C}$ .

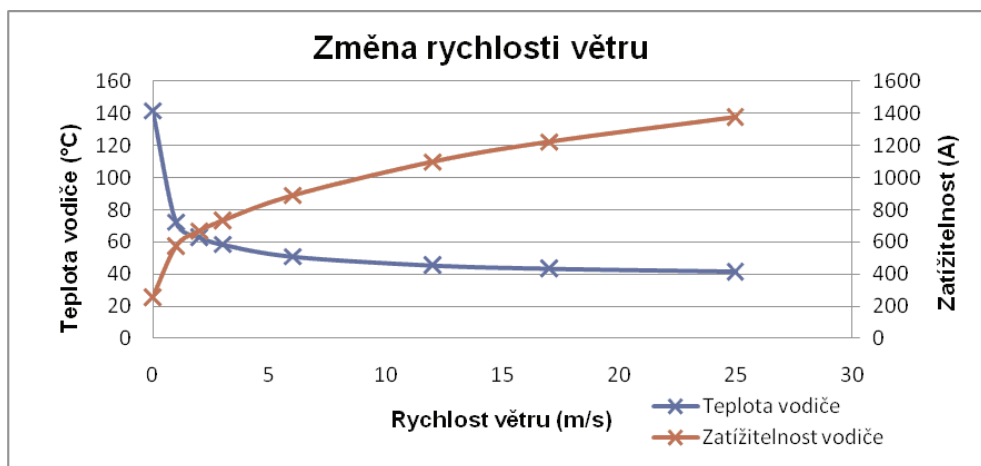


**Obr. 6.5: Citlivost na změnu teploty okolí**

Z obr. 6.5 je patrný významný vliv teploty okolí na zatížitelnost přenosového vedení, neboť při zvýšení teploty okolí o  $15\text{ °C}$  se nám zvýší teplota vodiče úměrně tedy také o zhruba  $15\text{ °C}$ . Teplota okolí je velice důležitá, neboť patří mezi základní klimatické podmínky, podle kterých se dimenzují vodiče, a je jedinou veličinou, o které máme dlouhodobé záznamy. Z grafu je vidět, že provozní změna zatížitelnosti vodiče vzhledem k jeho teplotě se pohybuje řádově v desítkách procent.

### 6.2.2. Změna rychlosti větru

Výpočet byl prováděn ze stávajících klimatických podmínek vyplývajících z normy ČSN EN 50341-3-19 a to tak, že se měnil parametr rychlosti větru a ostatní klimatické parametry byly považovány za neměnné. Změna rychlosti větru byla prováděna v rozsahu  $0 \div 25\text{ m/s}$ . Rychlost větru je zvláště důležitá pro ochlazování lana tzv. nucenou konvekcí, kdy pohyb ochlazujícího vzduchu je vyvolán větrem, který proudí kolem vodiče. Na ochlazování vodiče má rozhodující a zásadní vliv právě průměrná rychlost větru, proto tedy patří mezi základní klimatické parametry, který ovlivňuje zatížitelnost venkovního vedení.

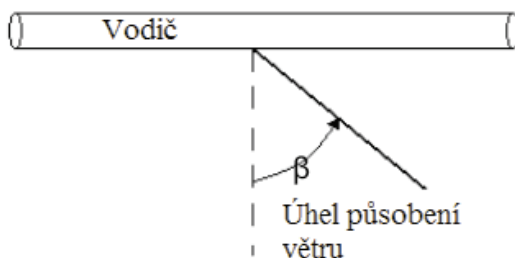


**Obr. 6.6: Citlivost na změnu rychlosti větru**

Z obr. 6.6 je vidět rozhodující účinek větru, neboť už při rychlosti větru 1 m/s nám teplota vodičů klesla téměř o polovinu oproti předchozímu stavu, což ve vodiči vytváří velký teplotní skok a příznivé podmínky pro následné účinnější využití vodiče. Jistým problematickým faktem může být špatná předpověditelnost a měřitelnost větru pod 1 m/s. V rozmezí rychlosti větru od nulové hodnoty do běžně měřitelných hodnot zhruba do 12 m/s je vidět velký skok zatížitelnosti vodiče, který tvoří desítky až stovky procent.

### 6.2.3. Změna úhlu větru

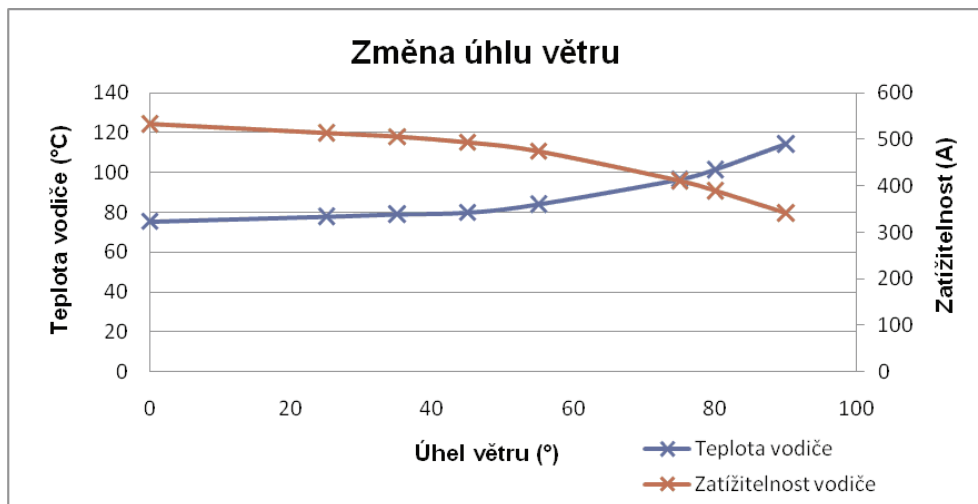
Výpočet byl prováděn ze stávajících klimatických podmínek vyplývajících z normy ČSN EN 50341-3-19 a to tak, že se měnil parametr úhlu větru a ostatní klimatické parametry byly považovány za neměnné. Změna úhlu větru byla prováděna v rozsahu  $0 \div 90^\circ$ . Na obr. 6.7 je znázorněné možné působení větru pod určitým úhlem na vodič.



**Obr. 6.7: Působení větru na vodič**

Z obr. 6.7 je vidět, že vodič a působící vítr svírají mezi sebou úhel. Pokud bude úhel  $\beta = 0^\circ$ , tak vítr bude působit kolmo na vodič. Jestliže bude úhel  $\beta = 90^\circ$ , tak vítr bude působit paralelně s vodičem. Jak můžeme vidět z obr. 6.8, zatížitelnost a teplota vodiče se mění s úhlem působícího větru. Nejnižší teploty a nejvyššího

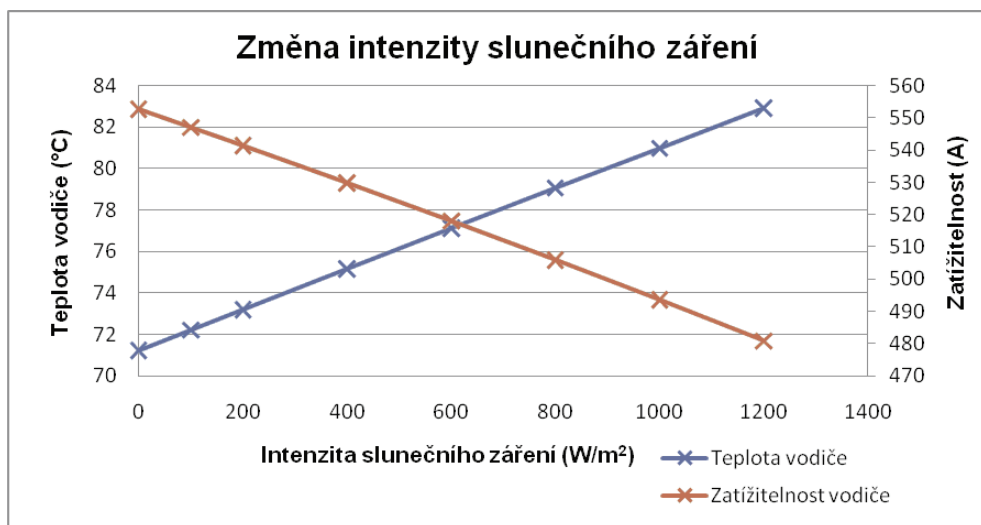
zatížení lze dosáhnout při úhlu  $\beta = 0^\circ$ , tedy když je vítr kolmý na vodič. Z hlediska tepelných vlastností vedení je toto příznivý stav. Naopak z hlediska mechanických vlastností vedení je namáhání vodičů maximální a tento stav může vést mechanickému poškození vodičů či stožárů vodiče a následnému přerušení dodávky elektrické energie. Z obr. 6.8 je dále vidět, že v rozmezí úhlů  $0 \div 45^\circ$  nedochází k tak velkým teplotním změnám a změnám v zatížení vodiče. Naopak v rozmezí úhlu  $45 \div 90^\circ$  je vidět výraznější podíl větru na změně teploty (zatížení) ve vodiči.



Obr. 6.8: Citlivost na změnu úhlu větru

#### 6.2.4. Změna intenzity slunečního záření

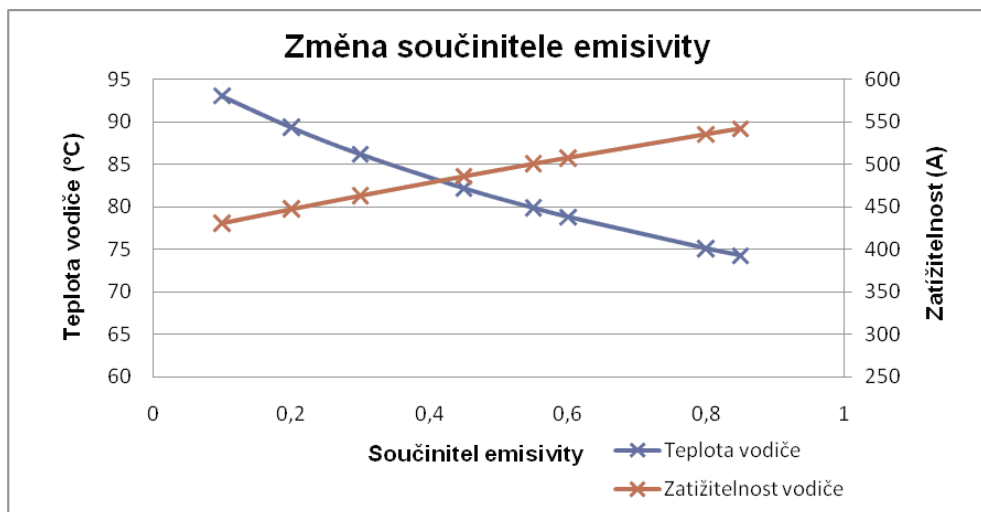
Výpočet byl prováděn ze stávajících klimatických podmínek vyplývajících z normy ČSN EN 50341-3-19 a to tak, že se měnil parametr intenzity slunečního záření a ostatní klimatické parametry byly považovány za neměnné. Změna intenzity slunečního záření byla prováděna v rozsahu  $0 \div 1200 \text{ W/m}^2$ . Nejvyšší změny jsou pozorovány v krajních bodech grafů. Za nulovou intenzitu slunečního záření lze považovat provoz přenosového vedení v noci a naopak při provozu vedení během dne může intenzita slunečního záření dosáhnout svého maxima. Z obr. 6.9 je vidět, že vliv intenzity slunečního záření se pohybuje v teplotním rozmezí  $14^\circ\text{C}$ . Proudová zatížitelnost venkovních vedením je ovlivněna slunečním zářením méně než například větrem. Hodnota teplotního rozmezí a zatížitelnosti vodiče se změnou slunečního záření se v porovnání se změnou parametru rychlosti větru pohybuje v řádu jednotek procent. Proto lze tuto klimatickou veličinu považovat za méně významnou, nicméně stále je nutné ji uvažovat při výpočtech.



Obr. 6.9: Citlivost na změnu intenzity slunečního záření

### 6.2.5. Změna součinitele emisivity

Výpočet byl prováděn ze stávajících klimatických podmínek vyplývajících z normy ČSN EN 50341-3-19 a to tak, že se měnil parametr součinitele emisivity a ostatní klimatické parametry byly považovány za neměnné. Změna součinitele emisivity byla prováděna v rozsahu 0,1 ÷ 0,85. Hodnota koeficientu emisivity výrazně ovlivňuje teplotu vodiče, jak lze vidět z obr. 6.10. Jestliže se bude koeficient emisivity snižovat, tak míra tepla vyzařovaného z vodiče bude také klesat a teplota ve vodiči se bude zvyšovat.

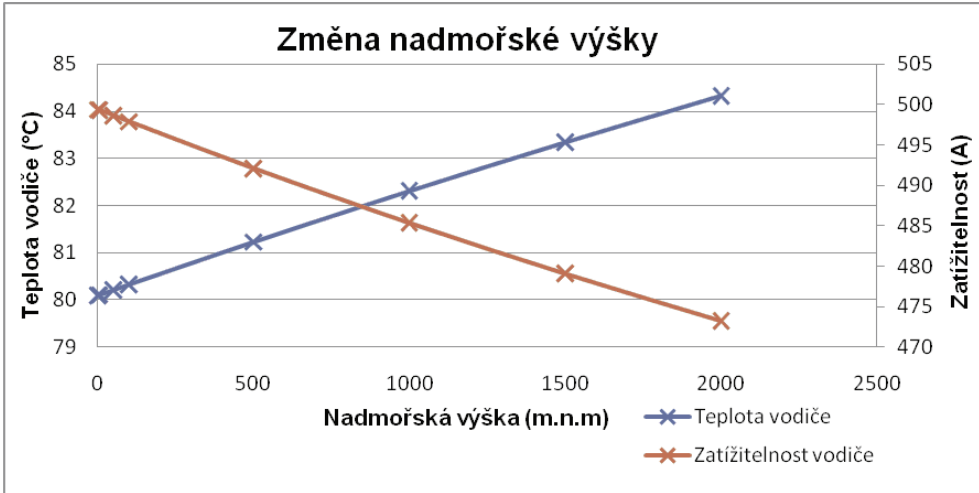


Obr. 6.10: Citlivost na změnu součinitele emisivity



## 6.2.6. Změna nadmořské výšky

Výpočet byl prováděn ze stávajících klimatických podmínek vyplývajících z normy ČSN EN 50341-3-19 a to tak, že se měnil parametr nadmořské výšky a ostatní klimatické parametry byly považovány za neměnné. Změna nadmořské výšky byla prováděna v rozsahu 0 ÷ 2000 m n. m. Z obr. 6.11 je vidět, že v oblasti teploty vodičů se pohybujeme v řádech několika jednotek °C i při velkém rozsahu nadmořské výšky. Nadmořská výška se uplatňuje především při výpočtu kinematické viskozity vzduchu pro stanovení výkonu odvedeného konvekci.



Obr. 6.11 Citlivost na změnu nadmořské výšky

## 6.3. Proudové zatížení venkovních vedení

### Reálné zatěžování vodičů

V klasickém pojetí je proudová zatížitelnost vedení považována za konstantní. Její výpočty jsou založeny na předpokladu stálé kombinace klimatických vlivů a teploty vodiče. Meteorologické podmínky se však mění. Proto je při vhodných podmínkách možné dosáhnout vyšší proudové zatížitelnosti, aniž by byla překročena dovolená maximální teplota vodiče venkovního vedení, a tak více využívat materiál vodičů. Z těchto důvodů se v některých zemích začalo vedení zatěžovat podle aktuálních podmínek, což vede ke zvýšení momentální přenosové kapacity. Tak je možné v určitých situacích linky zatěžovat více, než jak byly dimenzovány. Nelze však jednoduše konstatovat, že tímto přístupem se zabrání předčasné výstavbě nových vedení či nutnému zvyšování přenosových schopností linek, neboť uvedená „přetěžování“ je prakticky použitelné zejména v mimořádných stavech, kdy fungující trasy dočasně mohou převzít výkon, který by měl být přenášen po trase postižené poruchou. V ustáleném bezporuchovém stavu sítě není příliš vhodné využívat přenosové schopnosti vedení na maximum, popř. blízko jeho mezní zatížitelnosti, protože v případě výpadku některé trasy dojde k vyššímu přetížení zdravých linek. Pak by měl dispečink kratší čas na vyřešení vzniklé situace, neboť fungující linky by bylo možné takto přetěžovat po kratší dobu.

## Statické a dynamické zatěžování

Ve světě se metody zatěžování podle okamžitých klimatických podmínek rozvíjí již řadu let a v některých zemích jsou v provozu celé klimaticky závislé systémy zatěžování vedení.

Statický režim zatěžování je často využíván pro svou jednoduchost, protože nevyžaduje monitorování meteorologické situace a instalaci senzorů na lana vedení. Statické zatěžování se provádí na základě analýzy historických statistik o počasí v daném regionu. Bývají stanovena různá typová zatížení pro určité roční období, např. letní a zimní. Také v ČR je takto stanovena maximální zatížitelnost pro letní a zimní období, kdy hlavní roli hraje samozřejmě historická statistika venkovních teplot. Při této změně limitů je však nutné přenastavit ochrany reagující na velikost proudového zatížení, což lze u moderních digitálních ochranných poměrně snadno provést změnou sady vstupních parametrů.

Dynamické zatěžování se provádí online nebo offline metodami. Online metody zahrnují monitorování teploty vodiče, nebo mechanického napětí přímo na vodiči a meteorologických podmínek podél trasy vedení. Teplota vodiče je snímána instalovanými teplotními senzory v určitých částech přenosové linky. Mechanické napětí je kontrolováno snímači umístěnými na izolátorech výztužných stožárů a z něj se vypočítává provozní teplota vodiče. Snímaná data se předávají do počítače v dispečinku pomocí zařízení pro rádiovou komunikaci umístěného na senzoru. Z těchto dat je pak počítána zatížitelnost vedení. Jinou možností předávání dat, které neruší elektromagnetické pole, je využití kombinovaných zemnicích (příp. i silových) lan na linkách v přenosové soustavě se zabudovanými optickými kabely.

U systému offline se zatěžování určuje pomocí monitorování počasí podél trasy linky. Systém může být doplněn snímači průhybu lan využívajícími laserový paprsek, pomocí nichž lze opět určit teplotu vodičů.

Objevují se rovněž systémy zatěžování linek (USA), které nevyžadují žádné monitorování teploty vodiče a aktuálního počasí. Tyto systémy se snaží vycházet z co nejpřesnější předpovědi počasí na následující hodiny a dny, k čemuž využívají stávající síť meteorologických stanic, běžně rozmístěnou na území státu. Na základě předpovědi z těchto stanic predikují stav počasí podél přenosových linek v danou dobu a empiricky určují dovolené proudové zatížení konkrétních linek. Není tak nutné instalovat a používat nákladné a složité systémy pro měření a předávání dat. [1]

### Mimořádné stavy

V důsledku živelných událostí, nouzového stavu nebo havárie na zařízení může dojít k vyhlášení tzv. stavu nouze v elektroenergetice, při němž je provozovatel přenosové soustavy, příp. provozovatel distribuční soustavy, oprávněn omezit nebo přerušit dodávky elektrické energie na celém území České republiky, příp. její části, a to podle tzv. regulačního a vypínacího plánu. Všichni odběratelé a subjekty podnikající v elektroenergetice jsou v takovémto případě povinni se příslušným omezením podřídit. Naopak provozovatel přenosové, resp. distribuční soustavy může využívat zařízení v rozsahu jejich technických možností.

Při tradičním přístupu je dovolená proudová zatížitelnost vedení stanovena jako pevná hodnota, která nesmí být překročena ani v mimořádných stavech.

V případě poruchy části přenosového systému pak nepoškozená funkční část může přenášet pouze omezený elektrický výkon a je třeba přistoupit k omezování či přerušení dodávek elektrické energie odběrateli, aby zůstal přenosový systém v chodu jako celek a nedošlo k dalším výpadkům, které by měly za následek celoplošné přerušení dodávek v některých regionech. Pravomoci provozovatelů soustav při stavu nouze tak omezují vliv obchodníků s elektřinou a uzavřených obchodních smluv, neboť vyšší prioritou než ekonomika se stává bezpečnost a spolehlivost celého systému.

Pokud bude ampacita linek venkovního vedení uvažována proměnná podle momentální meteorologické situace, jak je popsáno v tepelných modelech, lze předejít omezování dodávek elektrické energie ve zbytečně velkém rozsahu. Protože ke stavu nouze dochází za různých podmínek, je také dovolené zatížení vodičů proměnné a maximální přenositelný výkon bude nabývat různých hodnot. V příznivém případě pak lze více uspokojit poptávku odběratelů i během mimořádného stavu, než jak by tomu bylo při tradičním přístupu.

Monitorovat nebezpečné přetížení linek z hlediska nárůstu teploty vodičů je důležité zejména v případech, kdy vzniklá porucha části přenosového systému vyvolá významný nárůst výkonu přenášeného nepoškozenými linkami. Jedná se hlavně o konfigurace s dlouhými přímými úseky vedení, po nichž je elektrická energie přenášena z míst výroby do míst spotřeby na vzdálenosti i stovek kilometrů. Zde může nastat velké skokové přetížení, takže ochranné systémy začnou odstavovat další linky, což může vést k rozpadu celé soustavy, zvláště když není zásahem provozovatele přenosové soustavy včas omezena dodávka spotřebitelům. Přenosová soustava ČR je dostatečně rozvětvená, takže zde nehrozí tak velké přetížení dílčích linek a dispečink mívá k dispozici delší čas k vyřešení vzniklé situace po poruše. Existují však dílčí konfigurace, u nichž se výhoda rozvětvenosti soustavy neprojeví a kde by případný výpadek trasy přinesl další závažné důsledky. Jedná se o několikanásobné trasy, které nemají v síti žádnou jinou náhradu, a kde při výpadku jedné části její výkon převezmou zbylé paralelní linky. Konkrétním případem mohou být vývody z elektrárny do rozvodny přenosové soustavy. V případě vynuceného snížení přenášeného výkonu v důsledku poruchy vývodní linky by totiž bylo nutné snížit výkon elektrárny a tedy zvýšit výkon jiných zdrojů v elektrizační soustavě.

Jiným příkladem jsou přeshraniční propojení elektrizačních soustav dvou států. Obvykle se jedná o jednoduché či zdvojené linky, jejichž celkový počet je malý. Proto při výpadku některé z nich (příp. části některé z nich) nastane stav, kdy by zbylé měly přenášet vyšší výkon, což podle situace může být akceptovatelné pouze několik minut nebo desítek minut. Obdobný stav může nastat při mezistátní pomoci v rámci mezinárodního propojení soustav, kdy se soustava jednoho státu dočasně potýká s nedostatkem výkonu. Pak začne přeshraničními linkami téci dočasně vyšší výkon a rovněž může dojít k přetížení těchto linek. Tyto stavy jsou přijatelné, neboť vznikají v důsledku řešení mimořádných situací v některé národní elektrizační soustavě. Nelze však připustit, aby přeshraniční linky byly přetěžovány trvale kvůli velkému exportu elektřiny z jedné země do druhé nebo kvůli kontinentálním tranzitům.

### 6.3.1. Dimenzování a normativní požadavky

Mezi zásadní klimatické veličiny, které ovlivňují dimenzování i provozní zatěžování vodičů venkovního vedení, patří teplota okolí, rychlost větru a intenzita slunečního záření.

Obecně lze říci, že dimenzování může být provedeno pro nejnepříznivější klimatické podmínky (max.  $T_a$ , min.  $w_s$ , max.  $I_g$ ) v dané oblasti, popř. se používá tzv. pravděpodobnostní analýza. Takto dostaneme maximální dovolený provozní proud a na ten by mělo být AIFe lano dimenzováno. Při návrhu vycházejícího z hraničních klimatických podmínek není možné určit ampacitu vedení pro okamžité podmínky s dostatečnou přesností a přenosová kapacita nebývá plně využita po celou dobu provozu. Proto existují uvedené snahy rozvíjet nové způsoby zatěžování vedení s ohledem na okamžité klimatické podmínky a dynamiku probíhajících dějů.

Předpisy a doporučení pro dimenzování venkovních vedení vvn a podmínky jejich provozování plynou zejména z normy ČSN EN 50341-1 a odpovídajícího českého dodatku ČSN EN 50341-3-19. Jsou zde definovány klimatické podmínky, které se v ČR běžně využívají pro výpočty při dimenzování, a nejvyšší dovolené teploty daných typů vodičů, které by neměly být překročeny v provozních stavech. Zároveň je však konstatováno, že s ohledem na údaje výrobce vodičů a příslušné projektové specifikace mohou být tyto hodnoty upraveny pro potřeby konkrétního projektu.

Tato norma stanovuje všeobecné požadavky, které se musejí dodržet při navrhování a stavbě nových venkovních vedení s cílem zajistit, aby vedení vyhovovalo svému účelu se zřetelem na bezpečnost osob, údržbu, provoz a prostředí. Nejkratší vnitřní vzdálenosti slouží výhradně k navrhování na přijatelnou schopnost odolávat přepětí. Účelem nejkratších vnějších vzdáleností je zamezit nebezpečí přeskoků vůči veřejnosti, na osoby pracující v blízkosti silových vedení a na osoby provádějící údržbu elektrické sítě.

Evropská norma EN 50341-1 stanovuje všeobecné požadavky a EN 50341-3 jsou pak jednotlivé národní dodatky (*NNA = National Normative Aspects*), které upřesňují pravidla pro jednotlivé země.

Následují upravené výňatky z uvedených norem:

Normální proud závisí na velikosti přenášené energie a na provozním napětí. Průřez fázových vodičů musí být vybrán tak, aby za definovaných podmínek nebyla překročena maximální návrhová teplota materiálu vodiče.

Všechny svislé vzdálenosti musejí být založeny na nejvyšší trvalé provozní teplotě vodičů, uvedené v *NNA* nebo v projektové specifikaci. Nejvyšší návrhová teplota fázových vodičů pro kontrolu nejkratších vzdáleností musí být uvedena v projektové specifikaci. Při určování nejvyšší návrhové teploty vodičů je třeba uvažovat s možným rozvojem využití vedení alespoň v průběhu návrhové doby života vedení. U těch vedení, kde je průřez fázových vodičů určen především nejvyšším přenášeným proudem (t.j. tepelnými hledisky), se proto nedoporučuje volit nejvyšší návrhovou teplotu vodičů menší než 70 °C.

Alternativně se připouští, aby místo nejvyšší návrhové teploty vodičů byl v projektové specifikaci uveden nejvyšší fázový proud v letním období a případně

těž nejvyšší fázový proud v jiném než letním období spolu s požadovanými podmínkami výpočtu teploty vodiče.

V tomto případě stanoví nejvyšší návrhovou teplotu vodičů projektant z údajů, uvedených v projektové specifikaci. Nejvyšší návrhová teplota vodičů musí být uvedena v projektové dokumentaci a jmenovitě v podélném profilu vedení.

Při stanovení nejvyšší návrhové teploty se obvykle uvažují tyto podmínky:

- proud ve fázi nebo dílčím vodiči svazku, odpovídající nejvyššímu zatížení v letním období
- teplota okolí 35 °C
- rychlost větru 0,5 m/s pod úhlem náběhu 45° na vodič
- globální intenzita slunečního záření 1000 W/m<sup>2</sup>
- součinitel absorpce 0,5
- součinitel emisivity 0,5

Při výpočtu nejvyšší návrhové teploty vodiče nebo při výpočtu maximálního přenášeného proudu lze uvažovat, je-li to požadováno, podmínky přísnější nebo alternativně uvažovat i jiné hodnoty součinitelů absorpce a emisivity.

V projektové specifikaci může být též stanovena nejvyšší krátkodobá teplota vodičů nebo nejvyšší krátkodobé zvláštní zatížení vedení nad běžnou úroveň, např. při poruše na jiném místě sítě. Vnější vzdálenosti a vnitřní vzdálenosti mezi systémy musejí být dodrženy i za těchto podmínek, pokud nejsou v projektové specifikaci stanoveny nižší vnitřní nebo i vnější vzdálenosti s ohledem na krátkou předpokládanou dobu takového využití a na pravděpodobnostní zhodnocení rizik, vyplývajících z takového snížení vzdáleností, zvláště s ohledem na bezpečnost osob.

Nedoporučuje se snižovat nejkratší vnější vzdálenosti pro nejvyšší krátkodobou teplotu vodičů, pokud se předpokládá, že odpovídající zvláštní zatížení může trvat déle než 0,1 % doby během jednoho roku (tj. 8,76 hod).

Nejvyšší návrhová teplota vodičů na bázi hliníku (sem spadají i AlFe lana) při normálním zatížení nesmí být vyšší než **80 °C**. Projektová specifikace může předepsat nejvyšší krátkodobou teplotu vodičů na bázi hliníku při zvláštním zatížení vedení nad běžnou úroveň. Tato teplota však nesmí být vyšší než **150 °C**, přičemž je nutné brát v úvahu údaje výrobce vodiče ohledně zhoršování mechanických vlastností vodiče za provozu při vyšších teplotách. Nejvyšší teplota vodičů na bázi hliníku při stanovené poruše sítě (při zkratu) je **200 °C**. Pro návrhové účely se uvažuje typická doba trvání zkratu 0,5 s, je však třeba vzít v úvahu, že skutečná doba trvání zkratu závisí na vypínacím čase ochranných systémů. Projektová specifikace může předepsat teplotu nižší a/nebo může předepsat další požadavky. Při stanovení nejvyšší teploty vodičů při stanovené poruše sítě je nutné brát v úvahu údaje výrobce vodiče. Při výpočtu teploty vodiče při stanovené poruše sítě (při zkratu) se za výchozí teplotu vodiče považuje 40 °C, nestanoví-li projektová specifikace teplotu vyšší.

## 6.4. Literatura

- [1] Deb, A.K.: Powerline Ampacity System – Theory, Modelling and Applications. CRC Press, c2000. 251 s. ISBN 0-8493-1306-6.
- [2] ČSN EN 50341-1: Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45kV AC, Část 1: Všeobecné požadavky – Společné specifikace, 2002.
- [3] ČSN EN 50341-3-19: Elektrická venkovní vedení s napětím nad 45kV AC, Část 3: Národní normativní aspekty, Oddíl 19: Národní normativní aspekty pro Českou republiku, 2003.
- [4] Tlustý, J., Kyncl, J.: Klimaticky závislá ampacita přenosových linek. Energetika. 2003, roč. 53, č. 2, s. 61-63.
- [5] Tomčík, J.; Šebelík, Č.: Vliv klimatických podmínek na zatížitelnost ocelohliníkových lan. Elektrotechnický obzor. 1988, č. 6, s. 335-342.
- [6] Tomčík, J.: Proudové dimenzování AlFe lan. Elektrotechnický obzor. 1988, č. 11, s. 650-654.

## 7. Mechanika vodiče venkovního vedení

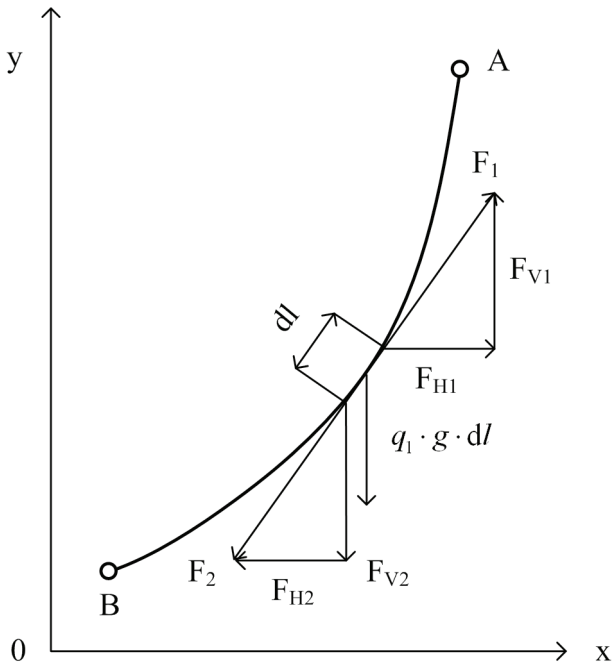
Z technických a hlavně ekonomických důvodů je elektrická energie většinou přenášena na větší vzdálenosti holými vodiči, které jsou připevněny pomocí izolátorů ke stožárům nebo jiným konstrukcím venkovního vedení. Základní mechanické vlastnosti potřebné při řešení mechaniky zavěšeného vodiče neboli „řetězovky“ budou ukázány blíže.

Nejprve uveďme popis, který charakterizuje význam termínu řetězovka. „Řetězovkou nazýváme křivku, kterou zaujme osa dokonale ohebného vlákna zavěšeného ve dvou bodech, je-li vlákno spojitě zatíženo“. Řetězovka je obecná prostorová křivka. Pro další odvození budeme předpokládat zvláštní případ a to řetězovku rovinnou.

U řetězovky nejčastěji počítáme délku oblouku, průhyb a osovou sílu, z které potom určujeme mechanické napětí řetězovky. Řetězovka může být v ustáleném stavu u ohebného vlákna namáhána jen tahem. Namáhání tlakem je možné například u mostních konstrukcí, ale toto nespadá do sledované problematiky.

### 7.1. Vodorovné pole

Předpokládejme, že oba konce lana řetězovky jsou upevněny ve stejné výši. Závěsný vodič se zdeformuje do pružné řetězovky. V praxi se však počítá s nepružnou řetězovkou.



Obr. 7.1: Průhyb vodorovného pole

Na obr. 7.1 je vyznačen schématický model řetězovky. Význam jednotlivých proměnných je následující:

$q_1$ ..... hmotnost 1 m vodiče ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ),

$g$ ..... tíhová konstanta ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\gamma$ .....měrná tíha ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ ),

$F_1, F_2$ ..... síla (tah) ve vodiči ( $N$ ),

$F_H$ ..... vodorovná složka síly ( $N$ ),

$F_V$ ..... svislá složka síly ( $N$ ),

$l$ ..... délka vodiče ( $m$ ),

$\sigma_H$  ..... mechanické napětí ( $Pa$ ),

$z$ ..... přetížení vodiče (-)

$c$  ..... parametr řetězovky ( $m$ )

Při odvození nepružné řetězovky se podle obr. 7.1 postupuje následovně: Na element délky vodiče  $dl$  působí síly  $F_1$  a  $F_2$  a vlastní tíha vodiče. Podmínkou pro rovnováhu je, aby se vektorový součet všech sil působících na element délky rovnal nule.

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_2 + q_1 \cdot g \cdot dl = 0 \quad (7.1)$$

Tato podmínka je splněna za předpokladu, že se rovnají horizontální složky  $F_H$

$$F_{H_1} = F_{H_2}$$

a vertikální složka  $F_V$  je

$$dF_V = q_1 \cdot g \cdot dl \quad (7.2)$$

Vertikální složka síly je nulová ve vrcholu paraboly a maximální v bodě závěsu. Element délky  $dl$  vyjádříme pomocí přírůstků  $dx$  a  $dy$

$$dl = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

Další postup je vydělení rovnice (7.2) diferencíálem  $dx$



$$\frac{dF_V}{dx} = q_1 \cdot g \cdot \frac{dl}{dx} = q_1 \cdot g \cdot \sqrt{\frac{dx^2 + dy^2}{dx^2}} = q_1 \cdot g \cdot \sqrt{1 + y'^2}$$

Užitím momentové podmínky rovnováhy získáme z obr. 7.1 vztah

$$F_V = F_H \cdot \frac{dy}{dx}$$

potom

$$\frac{dF_V}{dx} = F_H \cdot \frac{d^2y}{dx^2} = q_1 \cdot g \cdot \sqrt{1 + y'^2}$$

z toho

$$\sqrt{1 + y'^2} = \frac{F_H}{q_1 \cdot g} \cdot \frac{d^2y}{dx^2}$$

kde

$$\frac{F_H}{q_1 \cdot g} = \frac{F_H}{S} \cdot \frac{S}{q_1 \cdot g} = \frac{\sigma_H}{\gamma}$$

Když zavedeme

$$\frac{F_H}{q_1 \cdot g} = \frac{\sigma_H}{\gamma}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{dy'}{dx}$$

po dosazení dostaneme rovnici

$$\frac{\sigma_H}{\gamma} \cdot \frac{dy'}{dx} = \sqrt{1 + y'^2}$$

$$\frac{dy'}{\sqrt{1 + y'^2}} = \frac{\gamma}{\sigma_H} dx$$

zintegrováním získáme tvar

$$\int \frac{dy'}{\sqrt{1+y'^2}} = \int \frac{\gamma}{\sigma_H} dx$$

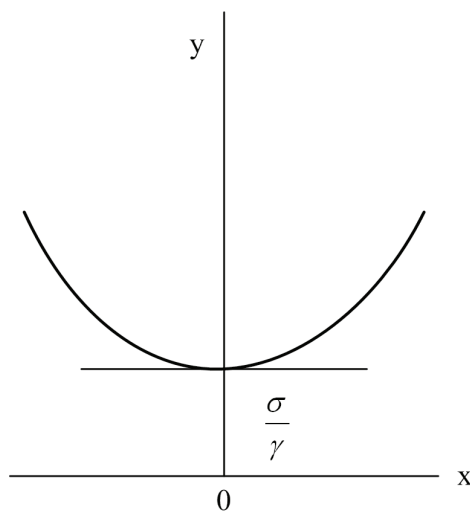
$$\operatorname{argsinh} y' = \frac{\gamma}{\sigma_H} x + k$$

z toho

$$y' = \sinh \frac{\gamma}{\sigma_H} (x + k_1)$$

Po integraci této rovnice dostaneme

$$y = \frac{\sigma_H}{\gamma} \cosh \frac{\gamma}{\sigma_H} (x + k_1) + k_2$$



**Obr. 7.2.**

Konstanty  $k_1$  a  $k_2$  určíme z počátečních podmínek podle *obr. 7.2.* Pro  $x = 0$  se  $y' = 0$ .

$$0 = \sinh \frac{\gamma}{\sigma_H} k_1 \Rightarrow k_1 = 0$$

Pro konstantu  $k_2$  platí v bodě  $x = 0$  a  $y = \frac{\sigma_H}{\gamma}$

$$\frac{\sigma_H}{\gamma} = \frac{\sigma_H}{\gamma} + k_2 \Rightarrow k_2 = 0$$

Rovnice řetězovky bude mít tedy tvar

$$y = \frac{\sigma_H}{\gamma} \cdot \cosh \frac{x}{\frac{\sigma_H}{\gamma}} \quad (\text{m}) \quad (7.3)$$

označme

$$\frac{\sigma_H}{\gamma} = c$$

po zpětném dosazení dostaneme

$$y = c \cdot \cosh \frac{x}{c} \quad (\text{m}) \quad (7.4)$$

poté rozepíšeme rovnici do řady

$$y = c \left[ 1 + \frac{1}{2!} \left( \frac{x}{c} \right)^2 + \frac{1}{4!} \left( \frac{x}{c} \right)^4 + \frac{1}{6!} \left( \frac{x}{c} \right)^6 + \dots \right]$$

Pokud uvažujeme i přídatná zatížení  $z$ , získáme vztah:

$$c = \frac{F_H}{g \cdot (q_1 + q_2)} = \frac{F_H \cdot q_1}{q_1 \cdot g \cdot (q_1 + q_2)} = \frac{F_H}{g \cdot q_1 \cdot z} \cdot \frac{S}{S} = \frac{\sigma_H}{\gamma z} \quad (\text{m}) \quad (7.5)$$

Uvažujeme-li jen první dva členy rozepsané řady, dostaneme rovnici paraboly, jejíž vrchol je vzdálený od počátku o hodnotu parametru  $c$

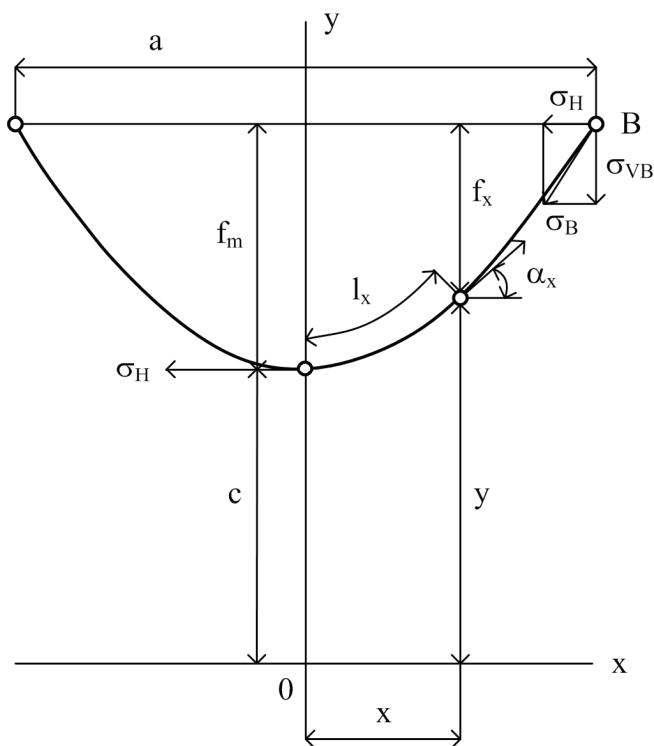
$$y_0 = y - c \frac{x^2 \gamma z}{2\sigma_H} \quad (\text{m}) \quad (7.6)$$

### 7.1.1. Průhyb řetězovky

Zaveďme parametr  $a$  jako celkovou délku pole řetězovky. Délkou pole je myšlena vzdálenost mezi závěsnými body řetězovky.

Z obr. 7.3 je zřejmé, že maximální průhyb dostaneme, když do vztahu (7.4) za  $x$  dosadíme poloviční rozpětí  $x = \frac{a}{2}$  a odečteme funkční hodnotu v bodě vrcholu paraboly  $x = 0$ .

$$f_m = c \cosh \frac{a}{2c} - c = c \left( \cosh \frac{a}{2c} - 1 \right) \quad (7.7)$$



Obr. 7.3: Souměrná řetězovka

Průhyb v libovolném bodě

$$f_k = c \cosh \frac{a}{2c} - c \cosh \frac{x}{c} = c \left( \cosh \frac{a}{2c} - \cosh \frac{x}{c} \right) \quad (7.8)$$

$$\text{kde } x \in \left\langle -\frac{a}{2}, \frac{a}{2} \right\rangle \quad (\text{m})$$

### 7.1.2. Délka vodorovného pole

Délka lana souměrně zavěšené řetězovky se určí jako délka křivky pomocí integrálu

$$l_s = 2 \int_0^{\frac{a}{2}} \sqrt{1 + y'^2} \, dx$$

Kde  $y'$  se získá derivací rovnice (7.4) nebo z předešlých výpočtů aplikací podmínek.

$$1 + y'^2 = \cosh^2 \frac{x}{c}$$

Výsledný vztah potom bude

$$l_s = 2 \int_0^{\frac{a}{2}} \cosh \frac{x}{c} \, dx = 2c \left[ \sinh \frac{x}{c} \right]_0^{\frac{a}{2}} = 2c \cdot \sinh \frac{a}{2c} \quad (7.9)$$

## 7.2. Šikmé pole

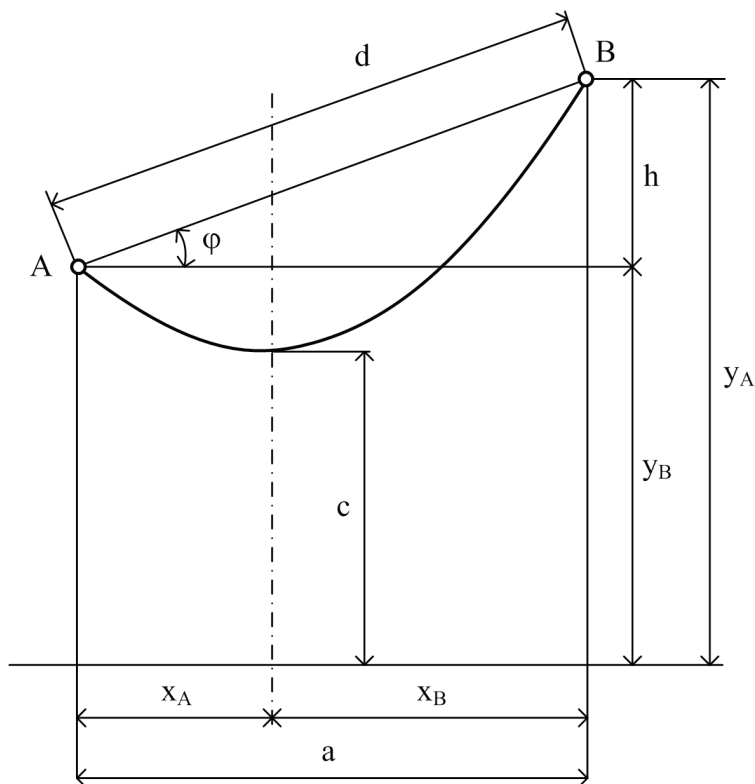
Pro nesouměrně zavěšenou řetězovku platí, že závěsné body nejsou ve stejné výšce.

$$x_A \neq x_B$$

$$y_A \neq y_B$$

Při výpočtech se bude vycházet z předchozích odvození pro souměrnou řetězovku. Schéma nesouměrně řetězovky ukazuje *obr. 7.4*. Postup odvození nesouměrně řetězovky je založený na představě, že jde o souměrnou řetězovku, ale jeden závěsný bod je na řetězovce posunut níže a myšlená řetězovka jakoby pokračovala. Zjednodušeně řečeno jde o stejnou křivku, ale na jedné straně ukonče-

nou dříve. Problém řešení nesouměrné řetězovky se tak transformuje na řešení dvou částí parabol rozdělených vrcholem. Pro vrchol platí, že na malý element řetězovky působí jen vodorovná síla  $F_H$ , proto řetězovku můžeme jednoduše rozdělit. Pro výpočet nesouměrné řetězovky se udává délka pole  $a$ , výškové převýšení  $h$  a parametr  $c$ .



**Obr. 7.4: Souřadnice počátku šikmého pole**

Podle obr. 7.4 platí

$$h = c \cosh \frac{x_B}{c} - c \cosh \frac{x_A}{c} \quad (7.10)$$

z toho

$$\frac{h}{c} = \cosh \frac{x_B}{c} - \cosh \frac{x_A}{c}$$

Z obr. 7.4 také vyplývá

$$x_A = a - x_B$$

$$\frac{h}{c} = \cosh \frac{x_B}{c} - \cosh \frac{a - x_B}{c}$$

Člen  $\cosh \frac{a - x_B}{c}$  rozepíšeme a dostaneme

$$\frac{h}{c} = \cosh \frac{x_B}{c} - \cosh \frac{a}{c} \cdot \cosh \frac{x_B}{c} + \sinh \frac{a}{c} \cdot \sinh \frac{x_B}{c}$$

$$\frac{h}{c} = -\cosh \frac{x_B}{c} \left( -1 + \cosh \frac{a}{c} \right) + \sinh \frac{a}{c} \cdot \sinh \frac{x_B}{c} \quad (7.11)$$

Dalšími úpravami hyperbolických funkcí vypočítáme hodnotu  $x_B$

$$y_B = c \cosh \frac{x_B}{c}$$

Nyní máme určenu polohu počátku a tím je daná řetězovka s průhybem  $f_m$

$$f_m = y_B - c$$

Vrchol řetězovky nemusí být mezi závěsnými body A a B. Jestliže je její vrchol mezi body A a B, platí

$$h < -c + c \cosh \frac{a}{c}$$

Pokud

$$h = -c + c \cosh \frac{a}{c},$$

je vrchol právě bod A (nižší závěs). Jestliže je

$$h > -c + c \cosh \frac{a}{c},$$

vrchol řetězovky neleží mezi závěsnými body, ale za závěsným bodem A. Pro tento případ nastává stav, že níže umístěný závěs (izolátor) je namáhán silou působící směrem nahoru a musí se při projektování s tím počítat.

Obvykle však neznáme hodnotu parametru. Na začátku při řešení nesouměrné řetězovky předpokládáme, že tečna v polovině rozpětí je rovnoběžná se spojnicí bodů A a B.

To znamená, že

$$k = \varphi$$

$$\begin{aligned} y_A + y_B &= c \left( \cosh \frac{x_A}{c} + \cosh \frac{x_B}{c} \right) = c \left( \cosh \frac{a - x_B}{c} + \cosh \frac{x_B}{c} \right) = \\ &= c \left[ \cosh \frac{x_B}{c} \left( 1 + \cosh \frac{a}{c} \right) - \sinh \frac{a}{c} \cdot \sinh \frac{x_B}{c} \right] \end{aligned}$$

(7.12)

úpravou dostaneme

$$\begin{aligned} y_A + y_B &= c \cdot 2 \cosh \frac{a}{c} \left( \cosh \frac{x_B}{c} \cdot \cosh \frac{a}{2c} - \sinh \frac{x_B}{c} \cdot \sinh \frac{a}{2c} \right) = \\ &= c \cdot 2 \cosh \frac{a}{2c} \cdot \cosh \left( \frac{x_B}{c} - \frac{a}{2c} \right) = c \cdot 2 \cosh \frac{a}{c} \cdot \cosh \frac{x_k}{c} \end{aligned}$$

kde  $x_k$  je úsečka uprostřed rozpětí. Hodnota funkce v bodě s úsečkou  $x_k$

$$y_k = c \cosh \frac{x_k}{c}$$

### 7.2.1. Určení délky vodiče při šikmém poli

Délka řetězovky mezi závěsnými body A a B se spočítá stejným způsobem jako pro vodorovné pole s tím rozdílem, že jsou jiné meze integrace.

$$l_{AB} = \int_{-x_A}^0 \sqrt{1 + y'^2} dx + \int_0^{x_B} \sqrt{1 + y'^2} dx$$

dosadíme za

$$y = c \cosh \frac{x}{c}$$



$$y' = \sinh \frac{x}{c}$$

a dostaneme

$$l_{AB} = \int_{-x_A}^0 \cosh \frac{x}{c} dx + \int_0^{x_B} \cosh \frac{x}{c} dx = c \left( \sinh \frac{x_B}{c} + \sinh \frac{x_A}{2c} \right) \quad (7.13)$$

Použitím rovnic (7.10) a (7.11) dostaneme

$$\begin{aligned} \left( \frac{l_{AB}}{c} \right)^2 - \left( \frac{h}{c} \right)^2 &= \left( \sinh \frac{x_B}{c} + \sinh \frac{x_A}{c} \right)^2 - \left( \cosh \frac{x_B}{c} - \cosh \frac{x_A}{c} \right)^2 = \\ &= -2 + 2 \left( \cosh \frac{x_B}{c} \cdot \cosh \frac{x_A}{c} + \sinh \frac{x_B}{c} \cdot \sinh \frac{x_A}{c} \right) = \\ &= 2 \cosh \left( \frac{x_B + x_A}{c} \right) - 2 = 4 \sinh^2 \left( \frac{x_B + x_A}{2c} \right) = 4 \sinh^2 \frac{a}{2c} \end{aligned}$$

Délka nesouměrné řetězovky je tedy

$$l_{AB}^2 = h^2 + \left( 2c \cdot \sinh \frac{a}{2c} \right)^2$$

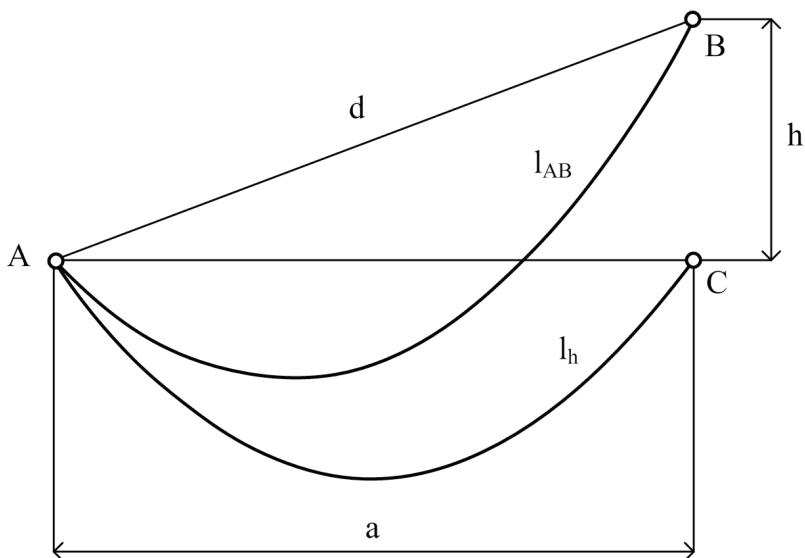
protože výraz v závorce je délka souměrné řetězovky (7.9), pro nesouměrnou řetězovku platí

$$l_{AB}^2 = h^2 + l_h^2 \quad (7.14)$$

z toho

$$l_{AB}^2 - l_h^2 = h^2$$

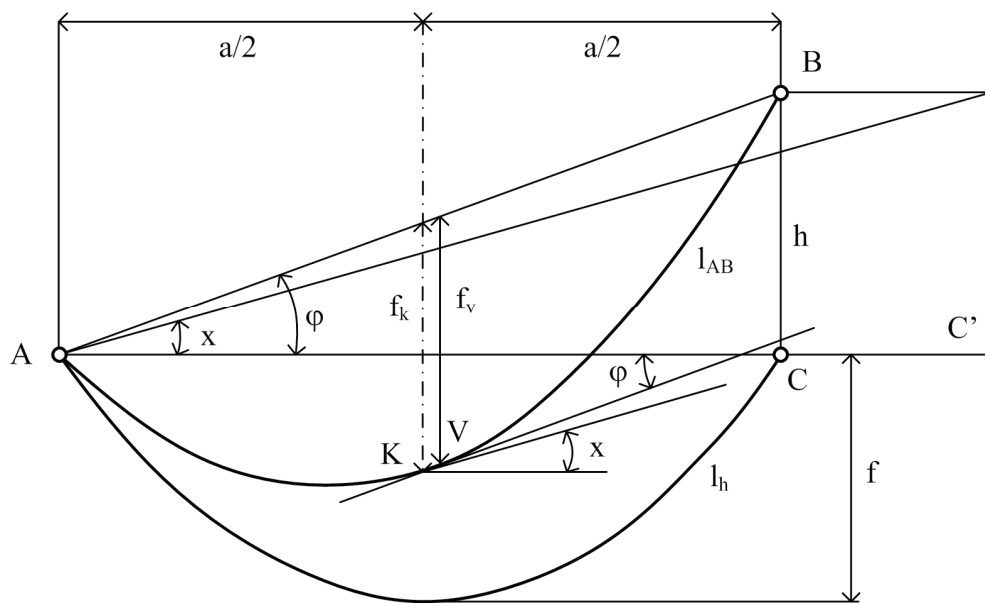
Vzorec (7.14) je rozšířená Pythagorova věta, která platí pro řetězovky a říká (viz. obr. 7.5): rozdíl čtverců délek souměrné a nesouměrné řetězovky ve stejném rozpětí a se stejným parametrem se rovná čtverci vzdálenosti vyšší podpory od nižší.



Obr. 7.5: Délka souměrné a nesouměrné řetězovky

### 7.2.2. Průhyby šikmého pole

Pro nesouměrnou řetězovku musíme ještě definovat a vypočítat následující průhyby:



Obr. 7.6.

*Charakteristický průhyb* je délka svislice spuštěné v polovině rozpětí mezi spojnici závěsných bodů a křivkou a můžeme ho určit podle rozšířené Pythagorovy věty

$$f_k = f_h \frac{l_{AB}}{l_h} = f_h \cdot \cosh \frac{x_k}{c} \quad (7.15)$$

$$x_k = \frac{x_B + x_A}{2}$$

*Viditelný průhyb* je svislá vzdálenost mezi spojnici závěsů A a B a tečnou k řetězovce. Tangenta

$$y' = \operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{a} = \sinh \frac{x_v}{c} \quad (7.16)$$

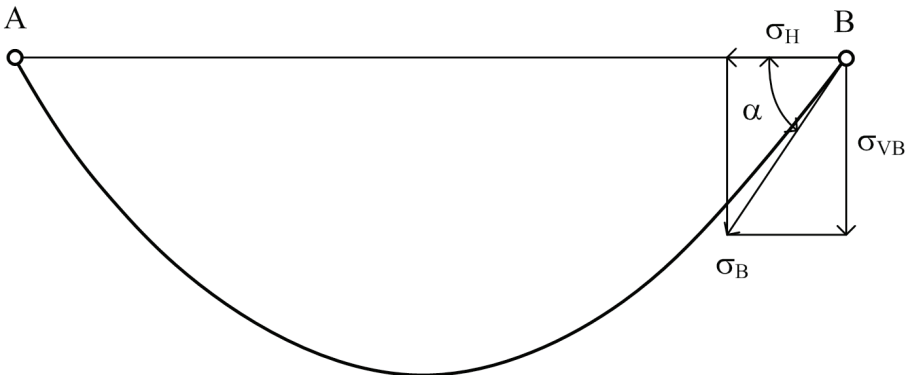
Když předpokládáme rovnici řetězovky v tomto bodě

$$y_v = c \cdot \cosh \frac{x_v}{c} \quad (7.17)$$

kde  $x_v$  je úsečka bodu dotyku a k ní určíme příslušnou souřadnici na spojnici AB na řetězovce (obr. 7.6), rozdíl obou je *viditelný průhyb*  $f_v$ .

### 7.3. Namáhání vodiče

Při výpočtu průhybu je vodorovná složka namáhání  $\sigma_H$  v každém bodě, tedy i v závěsném, stejná. Výsledné namáhání  $\sigma_B$  v závěsném bodě B leží ve směru tečny k řetězovce v tomto bodě (obr. 7.7).



Obr. 7.7: Namáhání v závěsném bodě

Směr tečny svírá v závěsném bodě s osou x úhel  $\alpha$ . Platí tedy

$$\sigma_B = \frac{\sigma_H}{\cos \alpha} \quad (\text{MPa}) \quad (7.18)$$

a pro tečnu v libovolném bodě řetězovky platí

$$y' = \operatorname{tg} \alpha = \sinh \frac{x}{c}$$

a v závěsném bodě  $x = \frac{a}{2}$  můžeme psát

$$\operatorname{tg} \alpha = \sinh \frac{a}{2c}$$

úpravou dostaneme

$$\frac{1}{\cos \alpha} = \cosh \frac{a}{2c}$$

Po dosazení do rovnice (7.18) dostaneme

$$\sigma_B = \sigma_H \cdot \cosh \frac{a}{2c} = \sigma_H \frac{y_B}{\alpha} \quad (\text{MPa}) \quad (7.19)$$

z rovnice průhybu dostaneme

$$\cosh \frac{a}{2c} = \frac{f_m}{c} + 1$$

po dosazení

$$\sigma_B = \sigma_H \left( \frac{f_m}{c} + 1 \right) = \sigma_H + f_m \gamma Z \quad (7.20)$$

Tím jsme dostali vztah pro namáhání v závěsném bodě řetězovky, který závisí pro daný vodič jen na průhybu  $f_m$ .

Když vezmeme v úvahu parabolu

$$f_m = \frac{a^2 \gamma z}{8\sigma_H}$$

a namáhání

$$\sigma_B = \sigma_H + \frac{a^2 (\gamma z)^2}{8\sigma_H} \quad (7.21)$$

bude tah v závěsném bodě

$$\begin{aligned} F_B = \sigma_B S &= \sigma_H \cdot \cosh \frac{a}{2c} \cdot S = \sigma_H S + f_m S \gamma z = \sigma_H \frac{y_B}{c} S \Rightarrow \\ &\Rightarrow F_B = y_B \cdot g \cdot (q_1 + q_2) \end{aligned} \quad (7.22)$$

Z této rovnice je zřejmé, že tah v závěsném bodě se rovná tíze vodiče délky  $y_B$  nebo tahu ve vrcholu  $F_H$  a tíze vodiče délky rovnající se průhybu  $f_m$ . Svislou složku namáhání  $\sigma_{vB}$  určíme z *obr. 7.7*. Platí

$$\sigma_{vB} = \sigma_H \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (7.23)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \sinh \frac{x}{c}$$

a v závěsném bodě

$$\operatorname{tg} \alpha = \sinh \frac{a}{2c}$$

tedy

$$\sigma_{vB} = \sigma_H \cdot \sinh \frac{a}{2c} \quad (7.24)$$

kde je podle (7.9) délka řetězovky

$$l_s = 2c \cdot \sinh \frac{a}{2c}$$

Dosazením

$$\sigma_{vB} = \sigma_H \frac{l_s}{2c} = \sigma_H \frac{l_s \gamma z}{2\sigma_H} = \frac{l_s \gamma z}{2} \quad (7.25)$$

Svislou složku tahu určíme z namáhání

$$F_B = S \sigma_{vB} = S \sigma_H \cdot \sinh \frac{a}{2c} \quad (7.26)$$

$$F_{vB} = \frac{S l_s \gamma z}{2} = \frac{l_s \cdot g \cdot (q_1 + q_2)}{2} = \frac{a \cdot g \cdot (q_1 + q_2)}{2} \quad (7.27)$$

Svislý tah v závěsném bodě se rovná tíze poloviční délky vodiče, zvětšené o přídatné zatížení. Všechny tyto vztahy platí pro řetězovku i parabolou.

Jen tehdy, je-li v závěsném bodě vodiče mechanické napětí alespoň o 4 % větší než v bodě průhybové křivky, je nutné uvažovat mechanické napětí v závěsném bodě. Toto nastává u velkých rozpětí či při velkém převýšení závěsů.

## 7.4. Odvození stavové rovnice

Předchozí výpočty vznikly za předpokladu, že namáhání napnutého vodiče je konstantní. Ve skutečnosti se však namáhání mění vlivem teploty, námrazku a větru. Jsme v oblasti konstantního průřezu, tzn., platí Hookův zákon.

Nyní uvažujeme dva stavy vedení. Počáteční stav označíme indexem 0 a nový stav označíme indexem 1. Změna délky vodiče  $\Delta l_\vartheta$  (m) vlivem změny teploty se určí ze vztahu

$$\Delta l_\vartheta = \alpha l_0 (\vartheta_1 + \vartheta_0) \quad \Delta l_\vartheta > 0 \text{ pro } \vartheta_1 > \vartheta_0 \quad (7.28)$$

kde

$\alpha$  ..... činitel délkové tepelné roztažnosti lana ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),

$l_0$  ..... původní délka zavěšeného vodiče (m),

$\vartheta_0$  ..... původní teplota vodiče ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),

$\vartheta_1$  ..... nová teplota vodiče ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Změna délky vodiče  $\Delta l_\sigma$  (m) vlivem změny namáhání

$$\Delta l_\sigma = \frac{l_0}{E} (\sigma_{H1} + \sigma_{H0}) \quad \Delta l_\sigma < 0 \text{ pro } \sigma_{H1} < \sigma_{H0} \quad (7.29)$$

kde

$E$  ..... modul pružnosti vodiče (MPa),

$\sigma_{H0}$  ..... horizontální složka namáhání vodiče v původním stavu (MPa),

$\sigma_{H1}$  ..... horizontální složka namáhání vodiče v novém stavu (MPa).

Celková změna z  $l_0$  na  $l_1$  se určí podle vzorce

$$\Delta l = l_1 - l_0 = \Delta l_{\vartheta} + \Delta l_{\sigma} = l_0 \left[ \alpha(\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{1}{E}(\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \right] \quad (7.30)$$

Délka lana zavěšeného mezi dvěma stožáry při stavu  $k$  se vypočte podle vzorce

$$l_k = a + \frac{a^3 \gamma_k^2}{24\sigma_{Hk}^2} \quad (7.31)$$

kde

$a$  ..... rozpětí (m).

$\gamma$  ..... měrná tíha 1 m vodiče ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{mm}^{-2}$ ).

Změna délky vlivem změny namáhání se vypočte podle vzorce

$$\Delta l = l_1 - l_0 = \frac{a^3}{24} \left( \frac{\gamma_1^2}{\sigma_{H1}^2} - \frac{\gamma_0^2}{\sigma_{H0}^2} \right) \quad (7.32)$$

Porovnáním rovnic (7. 30) a (7. 32) dostaneme stavovou rovnici

$$l_0 \left[ \alpha(\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{1}{E}(\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) \right] = \frac{a^3}{24} \left( \frac{\gamma_1^2}{\sigma_{H1}^2} - \frac{\gamma_0^2}{\sigma_{H0}^2} \right) \quad (7.33)$$

Protože lze přibližně uvažovat

$$l_0 \approx a \quad (7.34)$$

potom lze psát stavovou rovnici ve tvaru

$$\alpha(\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{1}{E}(\sigma_{H1} - \sigma_{H0}) = \frac{a^3}{24} \left( \frac{\gamma_1^2}{\sigma_{H1}^2} - \frac{\gamma_0^2}{\sigma_{H0}^2} \right) \quad (7.35)$$

a po úpravě do tvaru kubické rovnice pro výpočet namáhání nového stavu 1

$$\sigma_{HI}^3 + \sigma_{HI}^2 \left[ \frac{E a^2 \gamma_0^2}{24 \sigma_{H0}^2} + \alpha E (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \sigma_{H0} \right] - \frac{a^2 \gamma_1^2 E}{24} = 0 \quad (7.36)$$

Pro praxi se  $\gamma_0$  a  $\gamma_1$  nahradí pomocí měrné tíhy vodiče  $\gamma_v$  a přetížení vodiče s pomocí následujících rovnic

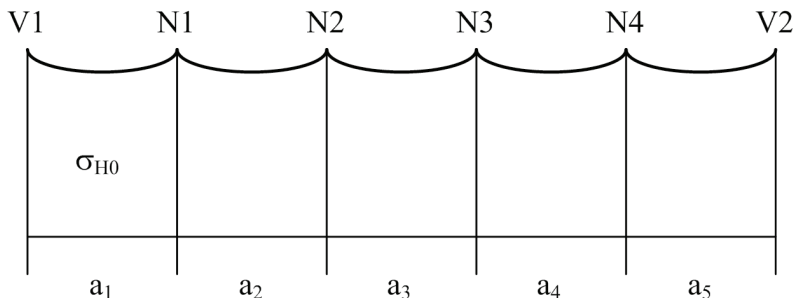
$$\gamma_1 = \gamma_v Z_1 \quad \gamma_2 = \gamma_v Z_2 \quad (7.37)$$

Potom stavová rovnice přejde na tvar

$$\sigma_{HI}^3 + \sigma_{HI}^2 \left[ \frac{E \gamma_v^2 \left( \frac{a z_0}{\sigma_{H0}} \right)^2}{24} + \alpha E (\vartheta_1 - \vartheta_0) - \sigma_{H0} \right] - \frac{E \gamma_v^2 (a z_1)^2}{24} = 0 \quad (7.38)$$

## 7.5. Nesymetrické stavy venkovních vedení

V předešlých částech bylo odvození řetězovky pro jedno pole. Přenosové linky bývají tvořeny mnoha stožáry, mezi kterými prochází vodivá lana. Z mechanického pohledu je nutné tento systém mezi dvěma kotevními stožáry řešit jako celek, protože jednotlivá sousední pole se silově ovlivňují a nebývají zcela stejná jak do velikosti, tak ostatních parametrů a jsou tedy nesymetricky zatíženy.

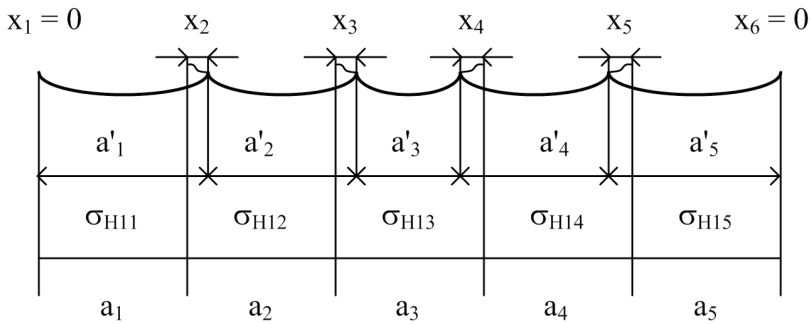


**Obr 7.8: Symetrický stav v kotevním poli**

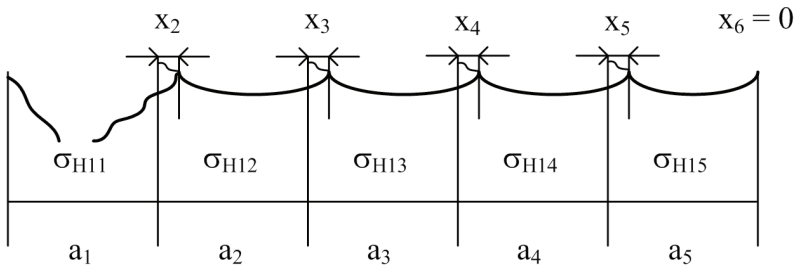
*Obr. 7.8* ukazuje jednoduchý příklad vedení se stejným rozpětím pole  $a$ . Pro další odvození jsou jednotlivá pole doplněna indexem. Napívací napětí je ve všech polích stejné  $\sigma_{H0}$ . Písmeno  $V$  označuje kotevní stožár, který snese větší namáhání, písmeno  $N$  pak označuje nosný stožár.

Model nesymetrických stavů umožňuje řešit případy nesymetrických zatížení jednotlivých polí (*obr 7.9*) nebo stav přetržení vodiče (*obr. 7.10*).





**Obr 7.9: Kotevní úsek s námrazkem v jednom rozpětí**



**Obr 7.10: Přetrhnutí vodiče v prvním rozpětí kotevního pole**

Postupů při výpočtu zatížení jednotlivých polí je více. Uvedeme jeden základní. Vychází se ze stavové rovnice (7.35), která popisuje změny rozpětí následkem nerovnoměrného zatížení pro  $i$ -té rozpětí.

$$\frac{a_i^3 (\gamma \cdot z_{li})^2}{24 \cdot \sigma_{Hii}^2} - \frac{a_i^3 (\gamma \cdot z_0)^2}{24 \cdot \sigma_{H0}^2} = \alpha l_{0i} (\vartheta_1 - \vartheta_0) + \frac{l_{0i}}{E} (\sigma_{Hii} - \sigma_{H0}) \quad (7.39)$$

Stav s indexem „1“ je stav s přídatným zatížením. Stav „0“ je stav počáteční – symetrický. Pokud do rovnice (7.39) dosadíme za  $l_{0i} = a_i$  a  $\vartheta_1 = \vartheta_0$ , získáme vztah pro změnu  $i$ -tého rozpětí pole.

$$\Delta a_i = (\sigma_{Hii} - \sigma_{H0}) \cdot \frac{a_i}{E} + \frac{a_i^3 \gamma^2}{24} \cdot \left( \frac{z_0^2}{\sigma_{H0}^2} - \frac{z_{li}^2}{\sigma_{Hii}^2} \right) \quad (7.40)$$

Při výpočtu změny rozpětí je nutné uvažovat, že pro  $\Delta a_i$ , v kterém není námraza, platí  $z_{li} = 1$  a pro  $\Delta a_i$ , v kterém je námraza, pak  $z_{li} = z_0$ .

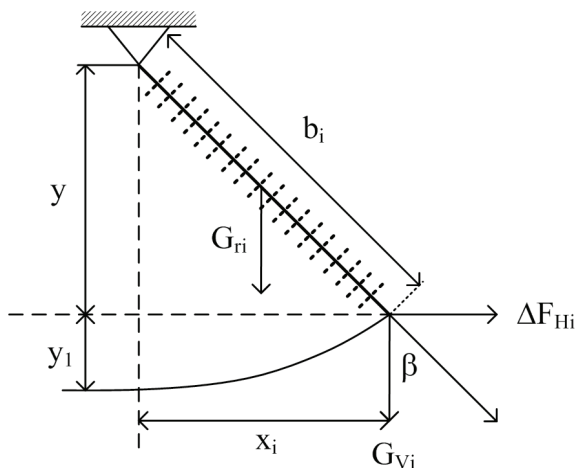
Prodloužení nebo zkrácení rozpětí  $\Delta a_i$  je závislé na vychýlení izolátorového řetězce  $x_i$ , resp. od rozdílu horizontálních tahů  $\Delta F_{Hi}$ . Pro  $i$ -tý závěsný bod mezi

rozpětím  $a_{i-1}$  a  $a_i$  platí podle obr. 7.11 podobnost s trojúhelníkem a vyplývá z toho:

$$\frac{\Delta F_{Hi}}{F_{Vi}} = \frac{x_i}{y} \quad (7.41)$$

A po úpravě pak:

$$\Delta F_{Hi} = F_{Vi} \cdot \frac{x_i}{\sqrt{b_i^2 - x_i^2}} \quad (7.42)$$



**Obr 7.11: Síly působící na izolátorový řetězec**

Vertikální složka síly  $F_{Vi}$  je pak dána tíhovou silou vodiče  $G_{Vi}$  příslušné délky (od vrcholu průhybové křivky z jedné strany zavěšeného bodu po vrchol průhybové křivky z druhé strany) a poloviční tíhové síly od izolátorového řetězce  $G_{ri}$ .

$$F_{Vi} = G_{Vi} + \frac{G_{ri}}{2} \quad (7.43)$$

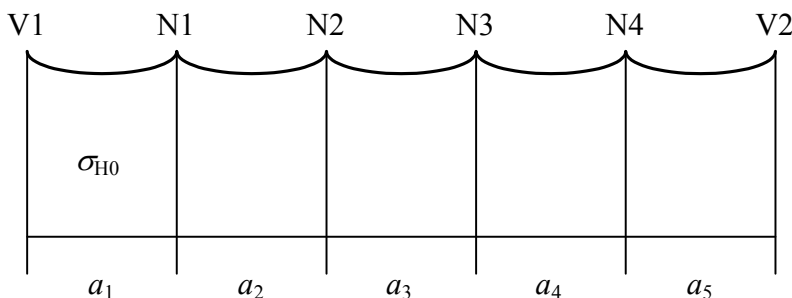
Použitím upraveného vztahu (7.27) získáváme výraz pro rozdíl horizontálních tahů

$$\Delta F_{Hi} = \left[ \frac{1}{2} (a_{i-1} (q_1 + q_{2i-1} \cdot g + a_i) \cdot (q_1 + q_{2i-1}) \cdot (g + G_{ri})) \right] \cdot \frac{x_i}{\sqrt{b_i^2 - x_i^2}} \pm F'_{H0} \left( \frac{h_{i-1}}{a_{i-1}} \pm \frac{h_i}{a_i} \right) \quad (7.44)$$

Vydělením předešlé rovnice průřezem vodiče S získáme

$$\Delta \sigma_{Hi} = \left[ \frac{1}{2} \left( a_{i-1} \gamma z_{1i-1} + a_i \gamma z_{1i} + \frac{G_{ri}}{S} \right) \pm \sigma'_{H0} \cdot \left( \frac{h_{i-1}}{a_{i-1}} \pm \frac{h_i}{a_i} \right) \right] \cdot \frac{x_i}{\sqrt{b_i^2 - x_i^2}} \quad (7.45)$$

Znaménka rovnice jsou dány výškovými rozdíly  $h_{i-1}$  resp.  $h_i$ . Pro vyšší závěsný bod se volí kladné znaménko, pro nižší závěsný bod pak záporné.



**Obr 7.12: Určení znaménka před výškovými rozdíly  $h_i$**

Jednotlivé posuny závěsných bodů na nosných stožárech se určí ze vztahu

$$x_{i+1} = x_i + \Delta a_i \quad (7.46)$$

Výpočetní postup počítá s tím, že posuny v závěsných bodech na nosných stožárech (krajní stožáry) jsou rovné nule  $x_1 = x_6 = 0$ .

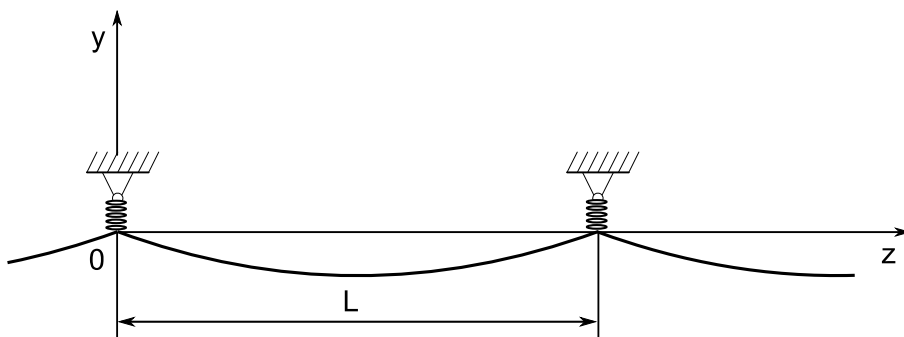
Postup výpočtu

- 1) zvolí se  $\sigma_{H11}$  v prvním rozpětí,
- 2) vypočítá se  $\Delta a_1$ ,
- 3) určí se výchylka  $x_2$ ,
- 4) vypočítá se rozdíl  $\Delta \sigma_{H2}$  mezi 1. a 2. rozpětím,

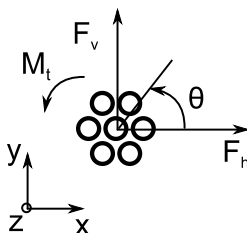
- 5) vypočítá se  $\sigma_{H12}$  ve 2. rozpětí podle vztahu  $\sigma_{H12} = \sigma_{H11} + \Delta\sigma_{H2}$   
všeobecně  $\sigma_{Hi} = \sigma_{Hi-1} + \Delta\sigma_{Hi}$
- 6)  $\Delta a_2 \rightarrow x_3 \rightarrow \Delta\sigma_{H3} \rightarrow \sigma_{H13} \rightarrow \dots \rightarrow x_6$
- 7) Výpočet je správný, pokud posun v závěsných bodech je rovný nule,  
 $x_6 = 0$ .

## 7.6. Dynamika zavěšeného vodiče

Pro sledování dynamického chování si můžeme zjednodušeně představit napjaté lano mezi stožáry (obr. 7.13) jako strunu se 3 stupni volnosti. Podél délky lana můžeme v každém bodě udělat řez (obr. 7.14).



Obr. 7.13: Zavěšení lana



Obr. 7.14: Síly a moment působící na vodič z pohledu řezu

Dynamiku pohybu vodiče můžeme popsat pomocí následujících rovnic:

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + C_y \frac{\partial y}{\partial t} - T \frac{\partial^2 y}{\partial z^2} = F_v(z) \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (7.47)$$

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + C_x \frac{\partial x}{\partial t} - T \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} = F_h(z) \quad (\text{N} \cdot \text{m}^{-1}) \quad (7.48)$$

$$I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + C_\theta \frac{\partial \theta}{\partial t} - GJ \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = M_t(z) \quad (\text{N}) \quad (7.49)$$

kde

$m$ ..... hmotnost 1 metru lana včetně případného námrazku ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )

$T$  ..... mechanické napětí napínající lano (N)

$F_v$  ..... vertikální budící síla působící na 1m lana ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )

$F_h$  ..... horizontální budící síla působící na 1m lana ( $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ )

$I$  ..... moment setrvačnosti vodiče vztažený na délku 1 m vodiče ( $\text{kg} \cdot \text{m}$ )

$GJ$  ..... torzní napětí ( $\text{N} \cdot \text{m}^2$ )

$M_t$  ..... torzní budící moment vztažený na 1 m lana (N)

$C_x, C_y$  ... tlumicí koeficienty ( $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ )

$C_\theta$  ..... tlumicí koeficient ( $\text{N} \cdot \text{s}$ )

Rovnice (7.47) až (7.49) jsou složky vlnové rovnice pro 2 posuvné pohyby a krut. V rámci řešení rovnic se přejde pomocí Fourierovy transformace k náhradě rovnic (7.47) až (7.49) k rovnicím (7.50) až (7.52).

$$m \frac{d^2 y_k(t)}{dt^2} + C_y \frac{dy_k(t)}{dt} + T \left( \frac{k\pi}{L} \right)^2 y_k(t) = \frac{2}{L} \int_0^L F_v(z, t) \sin \left( \frac{k\pi z}{L} \right) dz \quad (7.50)$$

$$m \frac{d^2 x_k(t)}{dt^2} + C_x \frac{dx_k(t)}{dt} + T \left( \frac{k\pi}{L} \right)^2 x_k(t) = \frac{2}{L} \int_0^L F_h(z, t) \sin \left( \frac{k\pi z}{L} \right) dz \quad (7.51)$$

$$I \frac{d^2 \theta_k(t)}{dt^2} + C_\theta \frac{d\theta_k(t)}{dt} + GJ \theta_k(t) = \frac{2}{L} \int_0^L M_t(z, t) \sin \left( \frac{k\pi z}{L} \right) dz \quad (7.52)$$

Dynamický model se používá v porovnání s klasickým statickým modelem výjimečně pro svoji složitost. Jeho hlavní přínos je při řešení dynamických stavů jako jsou:

- poryvy větru působící na lano
- námrazek na laně
- problematika tančení vodičů – galloping a další

a jejich kombinace. Jedním z důležitých výsledků, které pak je možné získat, je silové působení podél délky lana v závislosti na čase a taktéž polohu vodiče. Je možné tak předcházet, případně předikovat nebezpečné dynamické stavy přenosové linky a udělat opatření, jako je např. umístění tlumiče vibrací.

Z rovnic (7.50) až (7.52) je možné také vypočítat frekvenci vlastních kmitů lana při zanedbání tlumení C.

$$f = \frac{1}{2} \frac{k}{L} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad (\text{Hz}) \quad (7.53)$$

kde

m..... hmotnost 1 m lana (kg/m)

T ..... napínací napětí (N/m)

L ..... délka lana (m)

k..... číslo harmonické (-)

## 7.7. Literatura

- [1] Fecko, Š., Žiaran, J., Varga, L.: Elektrické siete. Bratislava: SVŠT, c1990, ISBN 80-227-0288-9
- [2] Kiessling, F., Nefzger, P., et al.: Overhead Power Lines. Springer, c2003, ISBN 3-540-00297-9.
- [3] Lanové vodice, Žiar nad Hronom [online]: [ŽHS], 2007, Dostupné z WWW: <<http://www.lana.sk>>.
- [4] Wang, J., Lilien, J. L.: Overhead Electrical Transmission Line Galloping - A Full Multi-Span 3-DOF Model, Some Applications and Design Recommendations. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998, pp. 909-916.
- [5] Lilien, J. L., Wang, J., Chabart, O., Pirotte, P.: Overhead Transmission Lines Design Some Mechanical Aspects. c1994, ICPST'94 (International Conference on Power System Technology). October 18-21. Beijing, China. 5 pages.

## 8. Environmentální vlivy venkovních vedení

### 8.1. Vliv elektromagnetického pole generovaného venkovními vedeními vvn na okolní prostředí

V současné době lze v oblasti dálkových přenosů elektrické energie v celosvětovém měřítku pozorovat dvě protichůdné tendence. První je nárůst přenosových schopností stávajících venkovních vedení a dostatečné dimenzování vedení nově navrhovaných. Na druhé straně stále více zemí striktně trvá na zásadním potlačení některých jevů, které provoz těchto vedení doprovázejí a které mohou nepříznivě ovlivňovat okolní prostředí. Jedním z intenzivně monitorovaných parametrů je elektromagnetické pole v okolí vedení a nemalé úsilí je věnováno jednak stanovení jeho nejvyšších přípustných hodnot, jednak možnostem jejich konkrétního docílení.

Nízkofrekvenční elektromagnetická pole (50 ÷ 60 Hz) mohou nejen působit na blízká elektrická zařízení (např. sdělovací kabely) a mít vliv na kvalitu jejich provozu ale mohou také ovlivňovat živé organismy.

Interakce nízkofrekvenčních elektromagnetických polí s živou hmotou se ve světě studuje již více než 40 let. Hlavním důvodem tohoto studia je osvětlit, zda a za jakých podmínek tato pole mohou představovat pro živé organismy nebezpečí a vyvolávat například různé druhy nemocí (zejména onemocnění rakovinného charakteru) či jiné závažné poruchy činnosti.

Již koncem sedmdesátých let byla publikována epidemiologická studie, která dávala do souvislosti zvýšený výskyt leukémie u dětí žijících v blízkosti venkovních vedení vvn v Denveru (USA). Tato studie podporovala velmi rozšířený, avšak vědecky nepodložený názor na skutečnost, že dlouhodobý pobyt v okolí zdrojů elektromagnetického pole může být za jistých okolností pro člověka dosti nebezpečný. I když se brzy ukázalo, že předložené závěry nejsou zcela korektní (byly použity zavádějící vstupní údaje a výsledky byly interpretovány nesprávným způsobem), byl zmíněný příspěvek významný tím, že inicioval v této oblasti další, již šířeji pojatý výzkum.

Do současnosti byly na uvedené téma ve světové vědecké literatuře publikovány stovky článků. Jejich obsah je zaměřen na mnoho dílčích otázek od ovlivňování biologické hmoty na molekulární úrovni přes problematiku genetických změn až po vliv vnějších polí na výskyt různých nemocí lidí i zvířat.

Je obecně známo, že na živou hmotu mohou vnější nízkofrekvenční elektromagnetická pole přímo působit prostřednictvím následujících veličin:

- elektrická složka pole,
- magnetická složka pole,
- energie pole.

Důležité ovšem mohou být i některé mechanismy nepřímé.

Interakce živé hmoty s elektrickým polem vyvolává jednak tok volných elektrických nábojů (elektrický proud) a polarizaci vázaných nábojů (vytváření nových elektrických dipólů a změnu orientace dipólů již existujících uvnitř tkáně). Rozsah těchto jevů závisí na elektrických vlastnostech tkáně (zejména na její měrné elektrické vodivosti a permitivitě) a na kmitočtu veličin pole. Vnější elektrické pole rovněž vyvolává povrchové náboje a následné proudy, jejichž rozložení je závislé na vnějších podmínkách a také na velikosti, tvaru a poloze organického materiálu v poli. Souhrnně však lze konstatovat, že živá hmota vnější elektrické pole velmi výrazně redukuje (měření ukazují, že intenzita pole v živé tkáni je až o 8 řádů nižší, než například v okolním vzduchu). Vzhledem k tomu, že termické fluktuace v buněčné tekutině reprezentující elektrolyt vyvolávají následné fluktuace elektrického pole o hodnotách řádově 0,01 V/m (odhad tohoto Johnson-Nyquistova šumu v elektrolytu uvnitř buňky o průměru 20  $\mu\text{m}$  činí 0,02 V/m) a nejvyšší hodnoty stejného pole vyvolaného externími zdroji v živém organismu nepřesahují 0,001 V/m, má se za to, že samotné elektrické pole ve skutečnosti žádný nepříznivý vliv nepředstavuje.

Interakce živé tkáně s časově proměnným magnetickým polem vede ke vzniku indukovaného pole elektrického a k cirkulačním proudům, jejichž velikost závisí na velikosti primárního magnetického pole, geometrii uzavřené smyčky a fyzikálních vlastnostech tkáně. Nejsilnější elektrické pole se indukuje ve smyčkách s velkými geometrickými rozměry, avšak ani v takových případech nepřesahují jeho hodnoty Johnson-Nyquistův šum. Předmětem zájmu je však v této oblasti tzv. stochastická rezonance, což je jev, kdy za určitých podmínek může superpozice vstupního signálu a náhodného malého šumu vyvolat prudký nárůst signálu výstupního. I když tento jev byl již v určitých buňkách živých organismů registrován, není doposud jasné, zda a za jakých okolností může jeho vliv představovat nějaké nebezpečí.

V určitém měřítku byla pozorována schopnost živých tkání absorbovat i energii pole. Její množství je však nepatrné a důsledky jsou za použití stávajících výzkumných metod prakticky nepozorovatelné.

Na základě dosavadního výzkumu a řady kritérií stanovených především biologi a lékaři se zdá, že vliv vnějších elektromagnetických polí nízkých kmitočtů na činnost živých organismů je malý. I když dostatečně silná pole mohou ovlivňovat některé buněčné parametry, rekombinaci iontových radikálů a další děje, korelace mezi přítomností těchto polí a závažnými onemocněními či jinými poruchami živého organismu je velmi malá (za zmínku snad stojí nevýrazné zvýšení dětské leukémie v exponovaných místech a chronické lymfocytické leukémie u pracovníků, jež jsou častěji vystaveni působení těchto polí). Tento závěr se zatím přijímá jak pro lidskou populaci, tak i pro ostatní druhy živočichů. Zůstane však zřejmě na budoucím široce koncipovaném a podrobnějším výzkumu, aby rozhodl s definitivní platností.

Vzhledem k přetrvávajícím nejistotám ovšem existuje široká snaha omezit špičkové hodnoty vnějších nízkofrekvenčních elektromagnetických polí v mezích možností na co nejnižší hodnoty. V mezinárodním měřítku je zde však shoda jen přibližná. Existuje řada norem a doporučení, které zabíhají do větších či menších podrobností. Některé z nich deklarují nejvyšší přípustné hodnoty polí pro celou veřejnost, jiné tyto hodnoty rozlišují pro běžnou veřejnost a pracovníky, kteří se



v dané oblasti musí pohybovat v rámci své činnosti. Pro ty se pak určuje nejdelší doba, jakou na exponovaných pracovištích mohou strávit, atd.

V ČR je v současné době platné nařízení vlády ČR: Nařízení vlády 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením

| Veřejnost   |                                                                                               |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_{max}$   | 5 kV / m                                                                                      |
| $B_{max}$   | 100 $\mu$ T                                                                                   |
| Zaměstnanci |                                                                                               |
| $E_{max}$   | 10 kV / m                                                                                     |
| $B_{max}$   | 500 $\mu$ T                                                                                   |
| Poznámka:   | referenční hodnoty (měřitelné) pro 50 Hz – zajistí nepřekročení nejvyšších přípustných hodnot |

**Tab. 8.1: Výňatek z nařízení vlády 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením**

Vývoj tvorby limitů přípustného elektrického a magnetického pole z hlediska vlivu na člověka a okolí je možné pozorovat porovnáním hodnot udávaných v různých dokumentech. Normy, nařízení a doporučení, závazné či doporučené hodnoty se často liší, nikoli však řádově. Lze ovšem očekávat, že v rámci Evropské unie a dalších mezinárodních organizací bude docházet k jejich rychlému sjednocování. Pro porovnání je možné uvést, že v přírodě žijeme v zemském elektrickém přirozeném poli (stejnoseměrném) okolo 200 V/m a v poli zemské magnetické indukce (stejnoseměrné) okolo 50  $\mu$ T.

| Veřejnost   |                     |
|-------------|---------------------|
| $E_{max}$   | 10 kV / m           |
| $B_{max}$   | 640 $\mu$ T         |
| Zaměstnanci |                     |
| $E_{max}$   | 30 kV / m           |
| $B_{max}$   | 1600 $\mu$ T        |
| Poznámka:   | 50 Hz mezní hodnoty |

**Tab. 8.2: Výňatek z ENV 50166-1: Human exposure to electromagnetic field; Low frequency (0 Hz to 10 kHz). CENELEC 1995**

| Veřejnost   |                                     |
|-------------|-------------------------------------|
| $E_{max}$   | 5 kV / m                            |
| $B_{max}$   | 100 $\mu$ T                         |
| Zaměstnanci |                                     |
| $E_{max}$   | 10 kV / m                           |
| $B_{max}$   | 500 $\mu$ T                         |
| Poznámka:   | 50 Hz, trvalá expozice obyvatelstva |

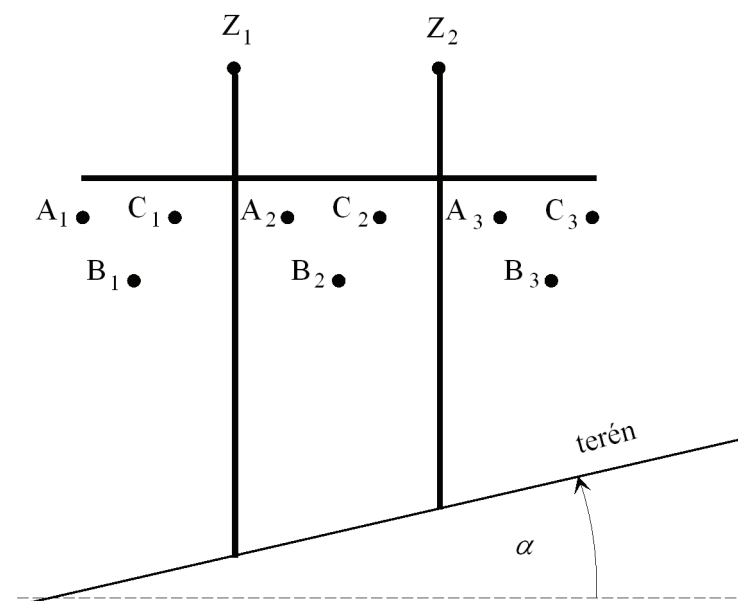
**Tab. 8.3: Výňatek ze směrnice ICNIRP (International Commission on Non-ionizing Radiation Protection) z roku 1999, schválena WHO**

| Pracovníci s elektrotechnickou kvalifikací<br>na pochůzkových trasách a na pracovištích |                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $E_{\max}$ trvale                                                                       | 15 kV / m                                                                                                                                                              |
| $E_{\max}$ 1,5 hod denně                                                                | 15 až 20 kV / m                                                                                                                                                        |
| $E_{\max}$ 0,5 hod denně                                                                | 20 až 25 kV / m                                                                                                                                                        |
| Veřejnosti přístupná pásma vlivu elektroenergetických zařízení                          |                                                                                                                                                                        |
| $E_{\max}$                                                                              | 10 kV / m                                                                                                                                                              |
| $B_{\max}$                                                                              | 500 $\mu$ T                                                                                                                                                            |
| Poznámka:                                                                               | 50 Hz, v pásmu vlivu od zařízení elektrizační soustavy. Pásmo vlivu je prostor, kde je $E > 1$ kV / m ve výši 1,8 m nad zemí a $B > 100$ $\mu$ T ve výši 1 m nad zemí. |

Tab. 8.4: Výňatek z ČSN 332040 (1993) - Ochrana před účinky elektromagnetického pole 50 Hz v pásmu vlivu zařízení elektrizační soustavy

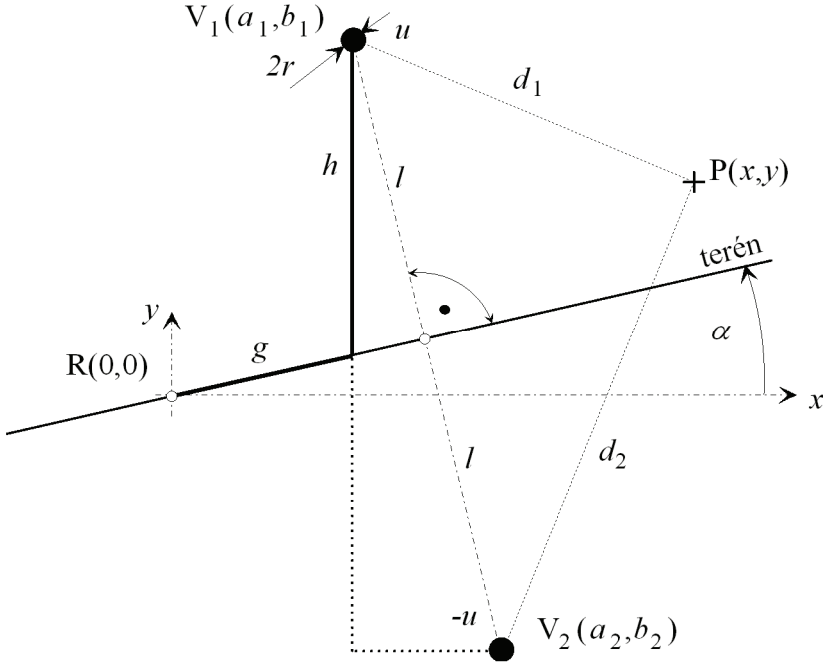
## 8.2. Výpočet elektrického pole v blízkosti vedení vvn

Náplní této kapitoly je metodika určování veličin elektrického pole v blízkosti trojfázového vedení vvn, jež má obecně  $n$  potahů a terén má sklon  $\alpha$  (pro 3 potahy je takové vedení schématicky znázorněno na obr. 8.1). Fázový posuv fáze  $A_i$  -tého potahu ( $i = 1, \dots, n$ ) označme  $\beta_i$ . Veškeré geometrické údaje i napětí jednotlivých potahů jsou známy.



Obr. 8.1: Uspořádání se třemi potahy ( $Z_1$  a  $Z_2$  označují zemnicí lana)

Výpočet vychází z metodiky zrcadlení probrané v základním kurzu teorie elektromagnetického pole. Uvažujme nejprve jeden vodič  $V_1$  o poloměru  $r$  a napětí  $u$  proti zemi se středem ve výšce  $h$  (obr. 8.2). Počátek souřadnic je v bodě  $R$ . Úkolem je určit elektrické pole v obecném bodě  $P$  o souřadnicích  $x$  a  $y$ , jsou-li známy souřadnice tohoto bodu a dále vzdálenosti  $g$  a  $h$ .



**Obr. 8.2: K určení elektrického pole v bodě  $P$**

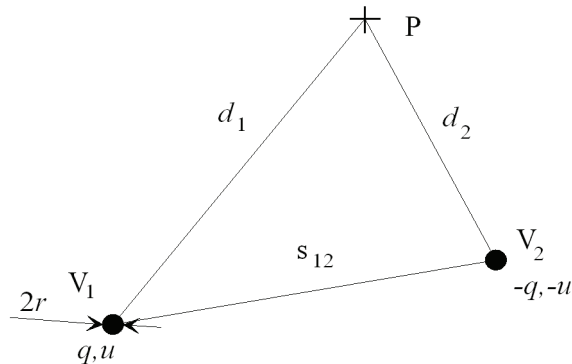
Nejprve je třeba určit souřadnice  $a_1, b_1$  vodiče  $V_1$  a souřadnice  $a_2, b_2$  jeho zrcadlového obrazu  $V_2$  ve vzdálenosti  $2l$  ve směru kolmém k terénu. Platí:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= g \cdot \cos \alpha \\
 b_1 &= h + g \cdot \sin \alpha \\
 l &= h \cdot \cos \alpha \\
 a_2 &= a_1 + 2l \cdot \sin \alpha = g \cdot \cos \alpha + 2h \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = & (8.1) \\
 &= g \cdot \cos \alpha + h \cdot \sin 2\alpha \\
 b_2 &= h + g \cdot \sin \alpha - 2l \cdot \cos \alpha = g \cdot \sin \alpha + h(1 - 2 \cdot \cos^2 \alpha) = \\
 &= g \cdot \sin \alpha - h \cdot \cos 2\alpha
 \end{aligned}$$

Dále vypočteme vzdálenosti  $d_1$  a  $d_2$ . Platí:

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(x - a_1)^2 + (y - b_1)^2} \\ d_2 &= \sqrt{(x - a_2)^2 + (y - b_2)^2} \end{aligned} \quad (8.2)$$

Nyní vyjdeme ze známého vztahu pro stanovení potenciálu v poli dvou rovnoběžných vodičů  $V_1$  a  $V_2$  o poloměru  $r$ , z nichž jeden je nabit délkovým nábojem  $q$  a druhý délkovým nábojem opačného znaménka  $-q$  (obr. 8.3).



**Obr. 8.3:** K výpočtu rozložení potenciálu v poli dvou liniových vodičů

Potenciál v bodě P je nyní dán vztahem

$$\varphi(P) = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (8.3)$$

kde

$\epsilon_0$ ..... permitivita vakua ( $\epsilon_0 \cong 10^{-9} / 36\pi \text{ F/m}$ )

Dosadíme-li za  $d_1$  a  $d_2$  z (8.2), dostáváme

$$\varphi(P) = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{\sqrt{(x - a_2)^2 + (y - b_2)^2}}{\sqrt{(x - a_1)^2 + (y - b_1)^2}} \quad (8.4)$$

Pokud by se v obr. 8.2 jednalo pouze o jeden vodič  $V_1$  a jeho zrcadlový obraz  $V_2$ , je úloha vyřešena. Neznámá velikost liniového náboje  $q$  se totiž získá z podmínky, že potenciál na povrchu vodiče  $V_1$  ( $d_2 \cong s_{12} = 2l$  a  $d_1 = r$ ) je roven známému napětí  $u$ , takže

$$u = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{2l}{r} \quad (8.5)$$

Ve vícevodičové soustavě (do níž musíme zahrnout i zemnicí lana) je ovšem celý postup složitější. Zavedme nejprve v souladu s (8.1), (8.2) a obr. 8.2 pro  $i$ -tý vodič ( $i = 1, \dots, n$ ) označení  $g_i$ ,  $h_i$ ,  $l_i$ ,  $a_{1i}$ ,  $a_{2i}$ ,  $b_{1i}$ ,  $b_{2i}$ ,  $d_{1i}$ ,  $d_{2i}$ ,  $l_i$ ,  $r_i$ ,  $u_i$  a  $q_i$ . Pro úplnost je zapotřebí podotknout, že vzdálenost  $g_i$  může být jak kladná, tak i záporná (podle toho, kterým směrem se v obr. 8.2 pohybujeme od referenčního bodu R). Potenciál v bodě  $P(x,y)$  je nyní dán superpozicí příspěvků (8.4) od jednotlivých vodičů  $V_{i1}$  a jejich zrcadlových obrazů  $V_{i2}$ :

$$\varphi(P) = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{d_{2i}}{d_{1i}} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{\sqrt{(x - a_{2i})^2 + (y - b_{2i})^2}}{\sqrt{(x - a_{1i})^2 + (y - b_{1i})^2}} \quad (8.6)$$

opět s neznámými veličinami  $q_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Ty se opět určí z podmínky, že na povrchu  $i$ -tého vodiče je známé napětí vůči zemi  $u_i$ , přičemž v případě zemnicích lan je toto napětí nulové. Obecně lze tedy psát, že

$$u_j = \sum_{i=1}^n k_{ji} \cdot q_i \quad (8.7)$$

kde

$$k_{ji} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{\sqrt{(a_{1j} - a_{2i})^2 + (b_{1j} - b_{2i})^2}}{\sqrt{(a_{1j} - a_{1i})^2 + (b_{1j} - b_{1i})^2}} \quad \text{pro } i \neq j$$

$$k_{ji} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \ln \frac{\sqrt{(a_{1j} - a_{2j})^2 + (b_{1j} - b_{2j})^2}}{r_j} \quad \text{pro } i = j \quad (8.8)$$

Tuto soustavu lineárních rovnic lze zapsat ve tvaru

$$\mathbf{u} = \mathbf{K} \cdot \mathbf{q} \quad (8.9)$$

přičemž matice tzv. potenciálových koeficientů  $\mathbf{K}$  je symetrická, diagonálně dominantní a regulární. Vektor liniových nábojů  $\mathbf{q}$  je pak dán vztahem

$$\mathbf{q} = \mathbf{K}^{-1} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{u} \quad (8.10)$$

kde matice dílčích kapacit  $\mathbf{C}$  je inverzní k matici  $\mathbf{K}$ . Dosazením takto získa-

ných veličin  $q_i$  do rovnice (8.6) je tedy úloha stanovení rozložení potenciálu v mnohavodičové soustavě vyřešena.

Jednotlivé složky intenzity elektrického pole v bodě  $P(x,y)$  (pozor, bod  $P$  nesmí ležet uvnitř žádného vodiče, projevil by se vliv nepřesností použitých při určování vzdáleností  $d_1$  a  $d_2$  ve vztahu (8.5), navíc v průřezu každého vodiče je elektrické pole nulové), nyní již snadno stanovíme ze vztahů odvozených z (8)

$$E_x = -\frac{\partial\varphi(x,y)}{\partial x} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ \frac{x - a_{1i}}{\sqrt{(x - a_{1i})^2 + (y - b_{1i})^2}} - \frac{x - a_{2i}}{\sqrt{(x - a_{2i})^2 + (y - b_{2i})^2}} \right]$$

$$E_y = -\frac{\partial\varphi(x,y)}{\partial y} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{2\pi\epsilon_0} \cdot \left[ \frac{y - b_{1i}}{\sqrt{(x - a_{1i})^2 + (y - b_{1i})^2}} - \frac{y - b_{2i}}{\sqrt{(x - a_{2i})^2 + (y - b_{2i})^2}} \right]$$

(8.11)

a její modul jako

$$|\mathbf{E}| = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}$$

(8.12)

Při výpočtu pole v čase je třeba vzít v úvahu, že napětí jednotlivých vodičů jsou časově proměnná. Omezíme-li se pouze na harmonické průběhy o stejném kmitočtu  $f$  ( $\omega = 2\pi f$ ), lze psát

$$u_i = u_i(t) = U_{im} \cdot \sin(\omega t + \beta_i)$$

(8.13)

kde  $U_{im}$  je amplituda a  $\beta_i$  fázový posuv napětí  $i$ -tého vodiče (u zemnicího lana  $U_{im} = 0$ ).

Výsledná velikost modulu intenzity elektrického pole v bodě  $P(x,y)$  ve vícevodičové soustavě je tedy složitou funkcí nejen mnoha geometrických veličin, ale i času, v němž se, podobně jako napětí dílčích vodičů, periodicky (obecně však nikoli harmonicky!) mění. Z hlediska účinků na životní prostředí nás ovšem zpravidla zajímá pouze její časové maximum a možnosti jeho snižování. V tomto ohledu se zpravidla řeší dva typy úloh:

- Stanovení časového maxima intenzity pole buď v bodě, podél určité křivky, či v zadané oblasti, přičemž geometrická konfigurace vedení a napětí včetně fázových posuvů jednotlivých potahů jsou již pevně dány.
- Návrh geometrie vedení a/nebo fázových posuvů dílčích potahů tak, abychom v daném bodě (podél dané křivky či v zadané oblasti) dosáhli minimálních hodnot pole. V tomto případě jsou zpravidla známa napětí a omezující podmínky (minimální přípustné vzdálenosti vodičů jednotlivých fází od sebe, od stožáru a od země a dále maximální možné vzdálenosti s ohledem např. na rozpětí a výšku stožáru a další případné parametry).

Úlohu **prvního typu** lze řešit dvěma způsoby:

- a) Nalezení maxima  $|E|$  funkce jedné proměnné (času). Vydeme ze vzta-  
hu (8.12) a položíme

$$\frac{d|E|}{dt} = \frac{E_x \frac{dE_x}{dt} + E_y \frac{dE_y}{dt}}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2}} = 0 \Rightarrow E_x \frac{dE_x}{dt} + E_y \frac{dE_y}{dt} = 0 \quad (8.14)$$

S využitím (8.10) a (8.11) tak získáme velmi složitou funkci času, pro niž hle-  
dáme nulové body. Analytické postupy zde zpravidla selhávají, účinná je například  
metoda tečen či jiné vhodné numerické metody. Po nalezení spektra těchto bodů  
(stačí uvnitř jedné periody) je nutno zkontrolovat, ve kterém z nich nastává globální  
maximum funkce (8.12).

- b) Řešení zkusmé. Perioda se rozdělí na určitý počet časových úseků  
(např. 60) a v nich se spočte hodnota  $|E|$ . Snadno stanovíme časový  
okamžik  $t$ , v němž tato veličina nabývá svého maxima.

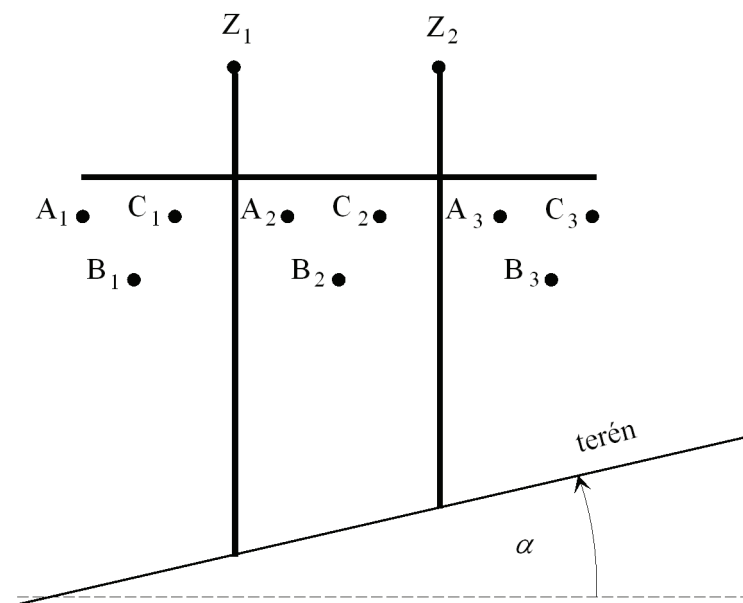
Úloha **druhého typu** je podstatně složitější. Jedná se vlastně o optimalizační  
problém na množině proměnných s řadou omezení. I zde lze využít několika po-  
stupů:

- a) Využití metody Lagrangeových multiplikátorů. Nejprve je třeba zkon-  
struovat množinu povolených geometrických rozměrů daných přede-  
psanými omezeními. Další postup je již klasický a vede na řešení sou-  
stavy nelineárních algebraických rovnic, jejíž složitost prudce narůstá  
s počtem vodičů.
- b) Využití metod zahrnujících prvky umělé inteligence (genetické algo-  
ritmy, taboo search, simulated annealing).

Poznámka: výpočty mohou velmi přesně respektovat i vliv svazkových vodičů.  
Je však třeba si uvědomit, že v takovém případě velmi prudce narůstá řád matice  
 $\mathbf{K}$  a tedy doba potřebná k výpočtu inverzní matice  $\mathbf{C}$ .

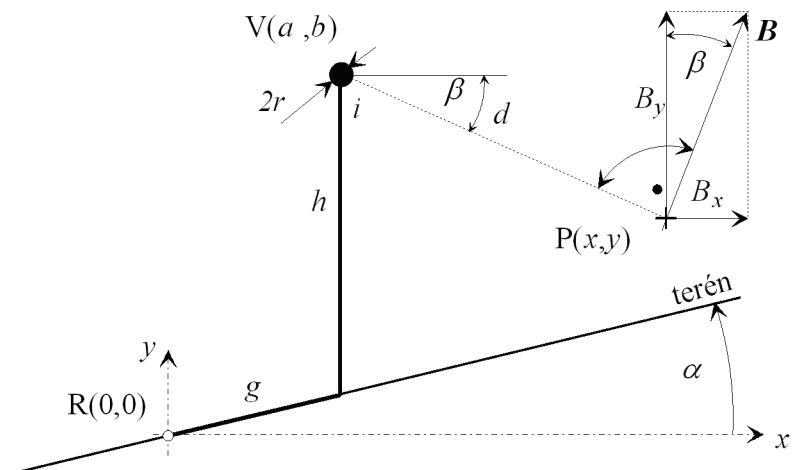
### 8.3. Výpočet magnetického pole v blízkosti vedení vvn

Pro výpočet magnetického pole v blízkosti vedení vvn se používají základní  
vzorce pro výpočet magnetického pole v okolí rovného vodiče a princip superpozi-  
ce. Dále je popsáno určování veličin magnetického pole v blízkosti trojfázového  
vedení vvn, jež má obecně  $n$  potahů a terén má sklon  $\alpha$  (pro 3 potahy je takové  
vedení schématicky znázorněno na obr. 8.4). Fázový posuv fáze  $A_i$ -tého potahu ( $i$   
 $= 1, \dots, n$ ) označme  $\beta_i$ . Veškeré geometrické údaje a proudy jednotlivých potahů  
jsou známy.



**Obr. 8.4: Uspořádání se třemi potahy ( $Z_1$  a  $Z_2$  označují zemnicí lana)**

Výpočet vychází z určení složek vektoru pole v blízkosti vodiče kruhového průřezu (probráno v základním kurzu teorie elektromagnetického pole). Uvažujme nejprve jeden vodič  $V$  se středem v bodě  $o$  souřadnicích  $a, b$  a o poloměru  $r$  (viz obr. 8.5), kterým protéká proud  $i$  (je obecně funkcí času). Počátek souřadnic je v bodě  $R$ . Úkolem je určit magnetické pole v obecném bodě  $P$  o souřadnicích  $x$  a  $y$ , jsou-li známy souřadnice tohoto bodu a dále vzdálenosti  $g$  a  $h$ .



**Obr. 8.5: K určení magnetického pole v bodě  $P$**



Nejprve je třeba určit souřadnice a, b vodiče V. Platí:

$$a = g \cdot \cos \alpha, \quad b = h + g \cdot \sin \alpha \quad (8.15)$$

Dále vypočteme vzdálenost d. Platí:

$$d = \sqrt{(x - a)^2 + (y - b)^2} \quad (8.16)$$

Modul magnetické indukce v bodě P je dán vztahem

$$|\mathbf{B}| = \frac{\mu_0 i}{2\pi d} \quad (8.17)$$

kde  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m je permeabilita vakua. Složky tohoto vektoru jsou nyní dány formulemi (obr. 8.5):

$$B_x = -|\mathbf{B}| \cdot \sin \beta, \quad B_y = |\mathbf{B}| \cdot \cos \beta \quad (8.18)$$

což po úpravě dává

$$B_x = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \cdot \frac{b - y}{(a - x)^2 + (b - y)^2}, \quad B_y = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \cdot \frac{x - a}{(a - x)^2 + (b - y)^2} \quad (8.19)$$

V lineárním prostředí s n vodiči, jejichž středy mají souřadnice  $a_i$ ,  $b_i$  a jimiž protékají proudy  $i_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), jsou složky pole v bodě P dány vztahy

$$B_x = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{i_i \cdot (b_i - y)}{(a_i - x)^2 + (b_i - y)^2}, \quad B_y = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{i_i \cdot (x - a_i)}{(a_i - x)^2 + (b_i - y)^2} \quad (8.20)$$

Nyní nezbyvá, než do těchto vztahů dosadit pro všechny vodiče a výsledky jednotlivých složek vektoru v počítaném okamžiku od různých vodičů sečíst. Jedinou komplikaci zde může představovat přítomnost zemnicích lan, kde nejprve musíme určit protékající proudy.

Nechť soustava n vodičů sestává z m aktivních vodičů a n - m zemnicích lan. Proud  $i_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) v aktivních vodičích jsou známy, zemnicí lana jsou naopak dobře uzemněna a jejich potenciál lze pokládat za nulový. Úbytky napětí na vodičích lze pak vyjádřit soustavou rovnic

$$\begin{pmatrix} \Delta u_1 \\ \vdots \\ \Delta u_m \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & \dots & Z_{1m} & Z_{1m+1} & \dots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1} & \dots & Z_{mm} & Z_{mm+1} & \dots & Z_{mn} \\ Z_{m+11} & \dots & Z_{m+1m} & Z_{m+1m} + 1 & \dots & Z_{m+1n} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \dots & Z_{nm} & Z_{nm+1} & \dots & Z_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 \\ \vdots \\ i_m \\ i_{m+1} \\ \vdots \\ i_n \end{pmatrix} \quad (8.21)$$

kde  $Z_{ii}$  označuje vlastní impedanci  $i$ -tého vodiče a  $Z_{ij}$  impedanci mezi  $i$ -tým a  $j$ -tým vodičem. Ty jsou dány vztahy:

$$\begin{aligned} Z_{ii} &= R_i + R_g + j \cdot \omega L_i \\ Z_{ij} &= R_g + j \cdot \omega L_{ij} \end{aligned} \quad (8.22)$$

kde

$R_i$  ..... rezistance  $i$ -tého vodiče na jednotku délky

$R_g$  ..... rezistance země na jednotku délky

$L_i$  ..... vlastní indukčnost vodiče na jednotku délky

$L_{ij}$  ..... vzájemná indukčnost mezi  $i$ -tým a  $j$ -tým vodičem na jednotku délky.

Tyto veličiny jsou dány vztahy:

$$\begin{aligned} R_g &= \pi^2 f \cdot 10^{-4} \text{ } \Omega/\text{km} \\ L_i &= 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_g}{\xi r_i} \text{ H/km} \\ L_{ij} &= 2 \cdot 10^{-4} \cdot \ln \frac{D_g}{d_{ij}} \text{ H/km} \end{aligned} \quad (8.23)$$

kde

$r_i$  ..... poloměr  $i$ -tého vodiče

$d_{ij}$  ..... vzdálenost mezi  $i$ -tým a  $j$ -tým vodičem

$\xi$  ..... součinitel charakterizující tvar a materiál vodiče

$D_g$  ..... hloubka fiktivního zpětného vodiče v zemi (ta se však zpravidla

v dalších výpočtech neuplatní, stejně tak  $R_g$ ).

Rovnici (8.21) nyní přepíšme do tvaru

$$\begin{pmatrix} \Delta \mathbf{u} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Z}_{vv} & \mathbf{Z}_{vz} \\ \mathbf{Z}_{zv} & \mathbf{Z}_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{i}_v \\ \mathbf{i}_z \end{pmatrix} \quad (8.24)$$

kde jednotlivá písmena označují dílčí sloupcové vektory či matice. Např.  $\mathbf{i}_z$  označuje vektor proudů tekoucích zemnicími lany. Odtud plyne

$$0 = \mathbf{Z}_{zv} \cdot \mathbf{i}_v + \mathbf{Z}_{zz} \cdot \mathbf{i}_z \Rightarrow \mathbf{i}_z = -\mathbf{Z}_{zz}^{-1} \cdot \mathbf{Z}_{zv} \cdot \mathbf{i}_v \quad (8.25)$$

Takto tedy získáme proudy tekoucí zemnicími lany potřebné do rovnice (8.20).

Další výpočty, případně optimalizace se provádí stejně, jak bylo vysvětleno v případě pole elektrického.

## 8.4. Možnosti ovlivnění elektrického a magnetického pole v blízkosti vedení vvn

**Elektrické pole** v blízkosti vedení vvn je dáno hodnotami okamžitého napětí jednotlivých vodičů, jejich vzájemným geometrickým uspořádáním a vlivem případných stínících prvků.

Pro řízení elektrického pole v okolí vedení je možné uvažovat o následujících opatřeních

- **zvětšení vzdálenosti fázových vodičů od země:** Velikost elektrického pole pod vedením může být dokonce limitujícím faktorem pro minimální výšku vodičů nad zemí. U stávajících vedeních lze, umožňují-li to mechanické podmínky, uvažovat o zmenšení průřezu vodičů.
- **snížení napětí:** Teoreticky lze napětí vedení měnit v tolerancích  $\pm 5\%$ , resp.  $\pm 10\%$  jmenovitého napětí, nicméně z důvodů zvýšených ztrát při nižším napětí i z jiných provozních důvodů se snížení napětí za účelem snížení elektrického pole pod vedením prakticky neprovádí.
- **zmenšení počtu svazkových vodičů a kroku svazku:** Snížením kroku svazku se sice zmenší maximální hodnota pole pod vodičem, ale může dojít ke zvýšenému nebezpečí vzniku koróny.
- **změna polohy a rozložení vodičů:** Pro zmenšení elektrického pole je vhodné umístit vodiče tak, aby koruna stožáru měla pokud možno co nejmenší plošný průřez a ani jeden vodič nebyl příliš vzdálen od vodičů zbylých dvou fází. Udává se, že u dvoupotahových vedení je optimální, pokud vodiče jsou rozloženy prakticky na obvodu kruhu tak, aby stejné fáze obou potahů byly umístěny naproti sobě. Tomu nejlépe odpovídá stožár typu „soudek“.

- **zmenšení vzdálenosti vodičů (kompaktnost vedení):** Zmenšení vzdálenosti mezi jednotlivými vodiči, která je prakticky změnou polohy a zvýšením kompaktnosti vedení, má relativně výrazný vliv na rozložení a velikost pole v okolí vedení, ovšem je velmi omezené podmínkou bezpečnosti provozu vedení vvn.
- **změny sledu fází u vícepotahových vedení:** Změna sledu fází fyzikálně představuje změnu rozložení vodičů tak, aby se pole vodičů na různých potenciálech pokud možno kompenzovalo. Je-li rozložení fází nevhodně provedeno, bývá náprava levná a opatření je proto dosti efektivní.
- **umístění stínících lan pod vedením:** Umístění stínících lan pod vedením je velmi účinným opatřením, jelikož elektrické pole lze relativně jednoduše odstínit. Zajímavé je, že jako elektrické stínění funguje i porost a to i v období mimovegetačním. Též do budov běžných konstrukcí elektrické pole od vedení vvn prakticky neproniká.

**Magnetické pole** v okolí vedení vvn je dáno především okamžitým proudem ve vodičích a rozložením těchto vodičů.

Oproti řízení elektrického pole u magnetického pole lze jen obtížně použít odstínění. Pro magnetické pole uvažovaných frekvencí se ani budovy běžné konstrukce a vegetace neprojeví jako stínění.

Obdobně jako u elektrického pole lze však uvažovat o použití zvětšení vzdálenosti fázových vodičů od země, snížení vzdálenosti vodičů (kompaktnost vedení) a změny sledu fází.

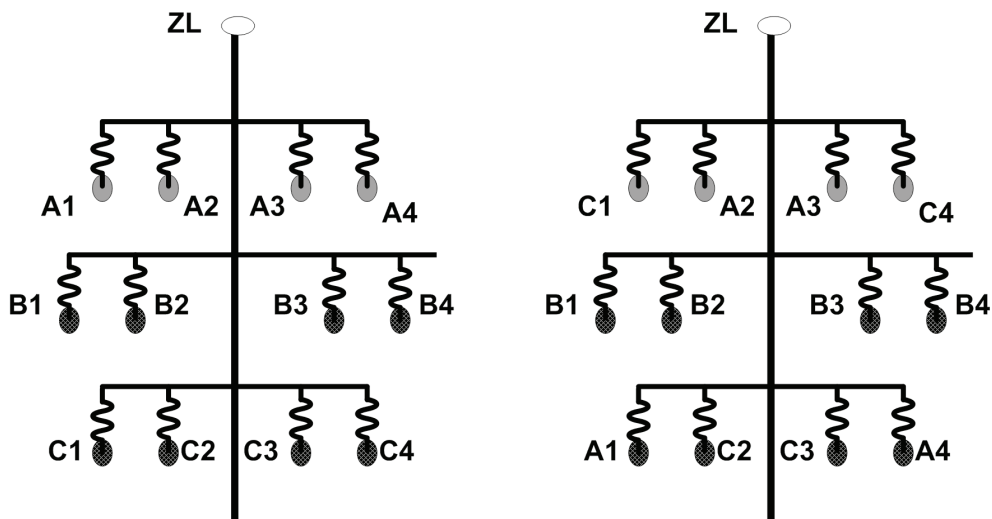
Další možností je použití **rozštěpení vinutí**, kdy je proud jedné fáze veden dvěma vzdálenými vodiči. Provoz pak odpovídá paralelnímu provozu dvou potahů jednoho vedení. Oproti dvěma nezávislým potahům je však zaručeno stejné zatížení obou větví a tedy prakticky nejlepší možné vzájemné vykompenzování magnetických toků. Nejvhodnější pro toto řešení je opět stožár typu „soudek“, ale lze jej použít i u jiných uspořádáních.

Lze také použít snížení provozního proudu, které má však za následek buď snížení přenášeného výkonu, nebo nutnost zvýšení napětí. Nicméně vzhledem ke skutečnému zatěžování vedení lze u mnohých vedení předpokládat, že po většinu doby je magnetické pole v okolí vodičů o desítky procent menší, než odpovídá maximálnímu provoznímu proudu.

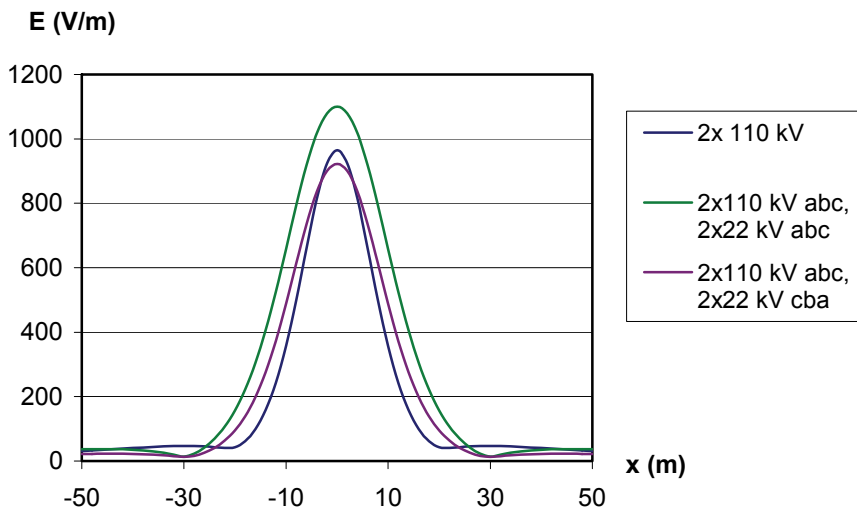
Na *obr. 8.6* je vidět rozložení elektrického a magnetického pole pod čtyřpotahovým vedením. Vodiče jednotlivých fází jednoho potahu jsou svisle pod sebou a jednotlivé potahy jsou umístěny vodorovně vedle sebe. Prostřední dva potahy jsou 110 kV a jmenovité napětí vnějších potahů je 22 kV. Zobrazené jsou průběhy maximálních hodnot magnetického a elektrického pole pod vedením, když jsou odpojené potahy 22 kV a se jmenovitým napětím a proudem jsou pouze potahy 110 kV a dále případy, kdy jsou všechny potahy provozovány se jmenovitým proudem a napětím. Zvláště je vyobrazen případ se stejným a opačným sledem fází na sousedících potazích 22 kV a 110 kV.

Je vidět, že pořadí fází má na maximální hodnoty obou polí nezanedbatelný vliv. Zajímavé je, že přidáním dalších (vnějších) dvou potahů lze maximální hodno-

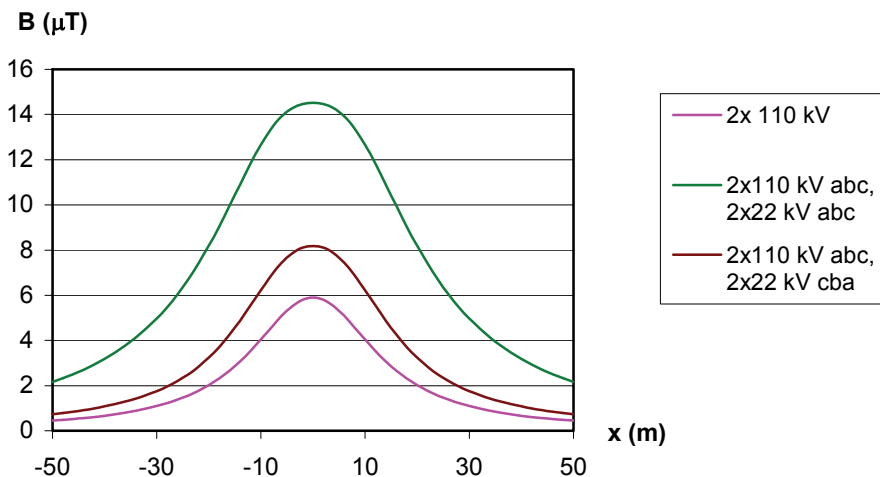
ty elektrického a magnetického pole v prostoru pod vedením při správném pořadí fází dokonce snížit.



Obr. 8.6: Schéma uvažovaných zapojení fází čtyřpotahových vedení 2 x 110 kV + 2 x 22 kV



Obr. 8.7: Rozložení elektrického pole pod čtyřpotahovým vedením 2 x 110 kV + 2 x 22 kV při různém zapojení fází



**Obr. 8.8: Rozložení magnetického pole pod čtyřpotahovým vedením 2 x 110 kV + 2 x 22 kV při různém zapojení fází**

## 8.5. Literatura

- [1] Lago J., Savčák M., Skurčák L., Vojtek M.: Elektromagnetické polia vonkajších vedení VVN a ZVN. *Elektroenergetika* 2/2007, s. 51-58
- [2] Nařízení vlády 1/2008 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením
- [3] Mayer D.: *Elektrodynamika v energetice*. BEN – technická literatura, Praha 2005 ISBN 80-7300-164-0
- [4] Petržílka V., Šafrata S.: *Elektřina a magnetismus*. Přírodovědecké vydavatelství, Praha 1953

# 9. Elektrické ochrany

## 9.1. Poruchy v elektrických rozvodných systémech

Pro správné nastavování ochran je nezbytné provést analýzu všech poruchových stavů, které mohou v elektrárně či v přenosové a distribuční soustavě vzniknout. V úvodu této kapitoly je proto uvedena základní terminologie používaná ve výpočtech pro nastavení ochran.

Poruchou v elektrizační soustavě rozumíme buď vznik neočekávaného chybného vodivého propojení (např. zkrat, zemní spojení), nebo rozpojení (přerušení dodávky). Oba typy těchto poruch se ve větší nebo menší míře propagují do okolní sítě a mají za následek škody na zařízení či výpadky dodávky elektrické energie. Z hlediska analýzy poruch se však jedná buď o *poruchy příčné*, nebo *poruchy podélné*. Podélné rozpojení vytváří přepětí nebo nesymetrie, které mohou být příčinou nadměrného zatěžování zařízení. Příčná porucha bývá způsobena zpravidla poruchou elektrické izolace nebo chybnou manipulací a v případě zkratu může naopak znamenat velmi rychlou destrukci zařízení. Klíčová úloha elektrických ochran tak spočívá v odpovídající reakci na vzniklou poruchu s ohledem na potenciální škody na zařízení.

### 9.1.1. Druhy zkratových proudů

Zkrat je nejzávažnějším druhem poruchy a vyžaduje okamžitou reakci chráničího prvku. Zkratem rozumíme přímé vodivé propojení dvou nebo více pólů elektrizační soustavy s různými potenciály, které má za následek vznik výrazného nadproudu (narozdíl od tzv. zemního spojení). Zkratové proudy protékající elektrickým obvodem mohou vést k závažným poškozením energetických zařízení i úrazů či úmrtí osob. Jejich negativní účinky se projevují zejména

- tepelně
- silovým působením (dynamické účinky)
- nebezpečným zvýšením potenciálu země
- galvanicky či magneticky přeneseným přepětím do elektronických zařízení

Jejich vzniku zamezit nelze, lze však omezit dobu jejich působení a energetický systém navrhnout tak, aby se po tuto dobu vyloučily jejich negativní účinky na člověka i zařízení.

Pro další popis se omezíme na třífázové soustavy. Vzhledem k faktu, že elektrizační soustava je dominantně napájena synchronními alternátory, je zkratový proud v třífázové soustavě aproximován přechodným dějem, který odpovídá svým průběhem zkratu na alternátoru. Základní terminologii zkratových proudů v třífázových soustavách uvádí ČSN EN 60 909-0 a též PNE 33 3042. Podle typu poruchy se zkraty dělí na:

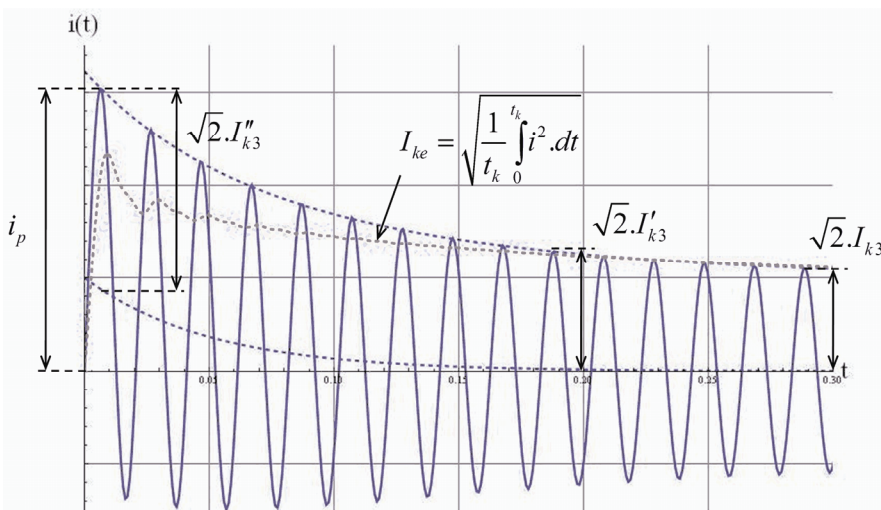
- jedнопólový
- dvoupólový

- dvoupólový zemní
- trojpólový

Pro každý typ poruchy existuje průběh zkratového proudu, který charakterizují tyto hodnoty:

- *Nárazový zkratový proud* ( $i_p$ ) je maximální možná hodnota předpokládaného zkratového proudu.
- *Počáteční souměrný rázový zkratový proud* ( $I''_k$ ) je efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku zkratu při konstantní impedanci.
- *Přechodný zkratový proud* ( $I'_k$ ) je efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v přechodném stavu.
- *Ustálený zkratový proud* ( $I_k$ ) je efektivní hodnota předpokládaného zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného děje.
- *Ekvivalentní oteplovací zkratový proud* ( $I_{th}$ ) je 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.

Ke každému z výše uvedených proudů se přiřazuje index charakterizující typ zkratu (3 – trojfázový, 2 – dvoufázový, 2E – dvoufázový zemní a 1 – jednofázový). Ke každému z těchto proudů existuje jeho minimální a maximální varianta.



Obr. 9.1: Druhy zkratových proudů



### 9.1.2. Podmínky výpočtů zkratových proudů

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutno vzít v úvahu:

- maximální provozní napětí soustavy a zdrojů reprezentované součinitelem  $c_{\max}$  (tab. 9.1)
- takovou konfiguraci soustavy (bloků v elektrárně, síťových napáječů), která znamená největší příspěvek zkratového proudu v daném místě
- pokud je síť nahrazena ekvivalentní impedancí  $Z_Q$ , počítat s její minimální variantou
- zahrnout příspěvky motorické zátěže
- všechny rezistance vedení, kabelů a vodičů uvažovat při teplotě 20 °C

Naopak, při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutno vzít v úvahu:

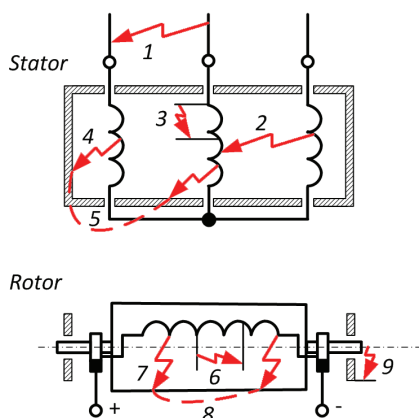
- minimální provozní napětí soustavy a zdrojů reprezentované součinitelem  $c_{\min}$  (tab. 9.1)
- takovou konfiguraci soustavy (bloků v elektrárně, síťových napáječů), která minimalizuje příspěvek zkratového proudu v daném místě
- pokud je síť nahrazena ekvivalentní impedancí  $Z_Q$ , počítat s její maximální variantou
- zahrnout příspěvky motorické zátěže
- všechny rezistance vedení, kabelů a vodičů uvažovat při maximální provozní teplotě

| Jmenovité napětí $U_n$      | Napěťový součinitel $c$ pro výpočet      |                                          |
|-----------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|
|                             | maximálních zkratových proudů $c_{\max}$ | minimálních zkratových proudů $c_{\min}$ |
| Nízké napětí 100 V – 1000 V | 1,10                                     | 0,95                                     |
| Vysoké napětí 1 kV – 35 kV  | 1,10                                     | 1,00                                     |
| Velmi vysoké napětí > 35 kV |                                          |                                          |

**Tab. 9.1: Součinitel  $c$  pro výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů**

Pozn. Je-li max. provozovací napětí  $U_m > c_{\max} \cdot U_n$ , pak  $U_m = c_{\max} \cdot U_n$ .

### 9.1.3. Poruchy na generátoru



#### Izolační poruchy:

##### A) Statoru

- 1 Vnější zkrat
- 2 Vnitřní zkrat
- 3 Závitový zkrat
- 4 Zemní spojení
- 5 Druhé zemní spojení

##### B) Rotoru

- 6 Závitový zkrat
- 7 Zemní spojení
- 8 Druhé zemní spojení
- 9 Ložiskové proudy

#### Nenormální podmínky chodu:

##### C) Statoru

- 10 Přetížení
- 11 Přepětí
- 12 Samobuzení
- 13 Podsynchronní otáčky

##### D) Rotoru

- 14 Ztráta buzení
- 15 Nesouměrnost

##### E) Pohonu

- 16 Zpětný tok výkonu
- 17 Nadsynchronní otáčky
- 18 Posuny rotoru
- 19 Kmitání stroje
- 20 Strojní poruchy turbíny
- 21 Poruchy kotle

**Obr. 9.2: Přehled poruch a nenormálních podmínek chodu generátoru**

Nejvýznamnějším zařízením elektrické části elektrárny je generátor. Obr. 9.2 proto poskytuje přehled izolačních poruch a nenormálních podmínek chodu synchronního generátoru. Někdy se ještě uvádí rozdělení na vnější a vnitřní, resp. statorové a rotorové poruchy. Systém ochrany generátoru musí být navržen tak, aby při vzniku poruchy zabránil škodám na zařízení. Prakticky to znamená, že pro většinu vnitřních izolačních poruch generátoru je nutné jej ihned odpojit, u vnějších poruch nebo nenormálních podmínek chodu je možné tolerovat určitou dobu provozu do odstavení (odpojení od sítě, reakce strojních ochran apod.).

## 9.2. Odolnost elektrických zařízení

Výrobní elektrické energie či elektrická stanice (rozvodna) musí být dimenzována tak, aby byla schopna přenášet provozní proudy a aby odolala po jistou předepsanou dobu účinkům zkratových proudů. Jmenovitými parametry elektrické stanice jsou z tohoto pohledu

- Jmenovitý proud přípojnic / odboček ( $I_n$ )
- Jmenovitá zkratová odolnost tepelná ( $I_{thn}$ )
- Jmenovitá zkratová odolnost dynamická ( $i_p$ )

Např. je-li  $I_{thn} = 31,5$  kA a  $i_{pn} = 80$  kA po dobu 1 s, uvádí se v popisu stanice „31,5/80 kA, 1 s“. Obdobně napěťovou odolnost definují tyto parametry:

- Maximální provozovací napětí ( $U_m$ )
- Jmenovitě krátkodobé výdržné napětí síťového kmitočtu

- Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulzu

### 9.2.1. Odolnost zařízení s ohledem na tepelné účinky zkratových proudů a nadproudů

Vodiče krátkodobým tepelným účinkům zkratových proudů vyhoví, jestliže

$$S_{th} = \frac{I_{th}}{A} \leq S_{thr} \quad (9.1)$$

kde

$S_{th}$  ..... hustota ekvivalentního oteplovacího proudu

$S_{thr}$  ..... jmenovitá hustota ekvivalentního oteplovacího proudu

$A$  ..... průřez vodiče.

Jmenovitou hustotu ekvivalentního oteplovacího proudu obdržíme jako

$$S_{th} = \sqrt{\frac{\kappa_{20} \cdot c \cdot \rho}{\alpha_{20}} \cdot \ln\left(\frac{1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_e - 20^\circ\text{C})}{1 + \alpha_{20} \cdot (\theta_b - 20^\circ\text{C})}\right)} \quad (9.2)$$

kde příslušné materiálové konstanty uvádí *tab. 9.2* a doporučené hodnoty konečných teplot při zkratu *tab. 9.3*.

|                                                                | měď             | hliník, slitina hliníku, AlFe vodiče | ocel              |
|----------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|-------------------|
| $c \text{ (J.kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$       | 390             | 910                                  | 480               |
| $\rho \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$                              | 8900            | 2700                                 | 7850              |
| $\kappa_{20} \text{ (}\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}\text{)}$ | $56 \cdot 10^6$ | $34,8 \cdot 10^6$                    | $7,25 \cdot 10^6$ |
| $\alpha_{20} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$             | 0,0039          | 0,004                                | 0,0045            |

**Tab. 9.2: Materiálové konstanty pro výpočet oteplení**

| Typ vodiče                                                    | Maximální doporučená teplota při zkratu |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Holé vodiče, kompaktní nebo splétané: Cu, Al, nebo Al slitiny | 200 °C                                  |
| Holé vodiče, kompaktní nebo splétané: ocel                    | 300 °C                                  |

**Tab. 9.3: Doporučené konečné teploty materiálů po zkratu**

Je-li místo  $I_{th}$  znám proud  $I''_{k3}$  a  $I'_{k3}$ , je ho možno vypočítat ze vztahu:

$$I_{th} = I''_{k3} \cdot \sqrt{m+n} \quad (9.3)$$

kde  $m$  a  $n$  jsou konstanty

$$m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} \cdot \left[ e^{4 \cdot \pi \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\kappa - 1)} - 1 \right] \quad (9.4)$$

a

$$\frac{I''_{k3}}{I'_{k3}} = 1 : n = 1$$

$$\frac{I''_{k3}}{I'_{k3}} \geq 1,25 :$$

$$n = \frac{1}{\left( \frac{I''_{k3}}{I'_{k3}} \right)^2} \cdot \left[ \begin{aligned} & 1 + \frac{T'_d}{20 \cdot T_k} \cdot \left( 1 - e^{-20 \cdot T_k / T'_d} \right) \cdot \left( \frac{I''_{k3}}{I'_{k3}} - \frac{I'_{k3}}{I'_{k3}} \right)^2 + \\ & + \frac{T'_d}{2 \cdot T_k} \cdot \left( 1 - e^{-2 \cdot T_k / T'_d} \right) \cdot \left( \frac{I'_{k3}}{I'_{k3}} - 1 \right)^2 + \\ & + \frac{T'_d}{5 \cdot T_k} \cdot \left( 1 - e^{-10 \cdot T_k / T'_d} \right) \cdot \left( \frac{I''_{k3}}{I'_{k3}} - \frac{I'_{k3}}{I'_{k3}} \right) + \\ & + \frac{2T'_d}{T_k} \cdot \left( 1 - e^{-T_k / T'_d} \right) \cdot \left( \frac{I'_{k3}}{I'_{k3}} - 1 \right) + \\ & + \frac{T'_d}{5,051 \cdot T_k} \cdot \left( 1 - e^{-10,1 \cdot T_k / T'_d} \right) \cdot \left( \frac{I''_{k3}}{I'_{k3}} - \frac{I'_{k3}}{I'_{k3}} \right) \cdot \left( \frac{I'_{k3}}{I'_{k3}} - 1 \right) \end{aligned} \right] \quad (9.5)$$

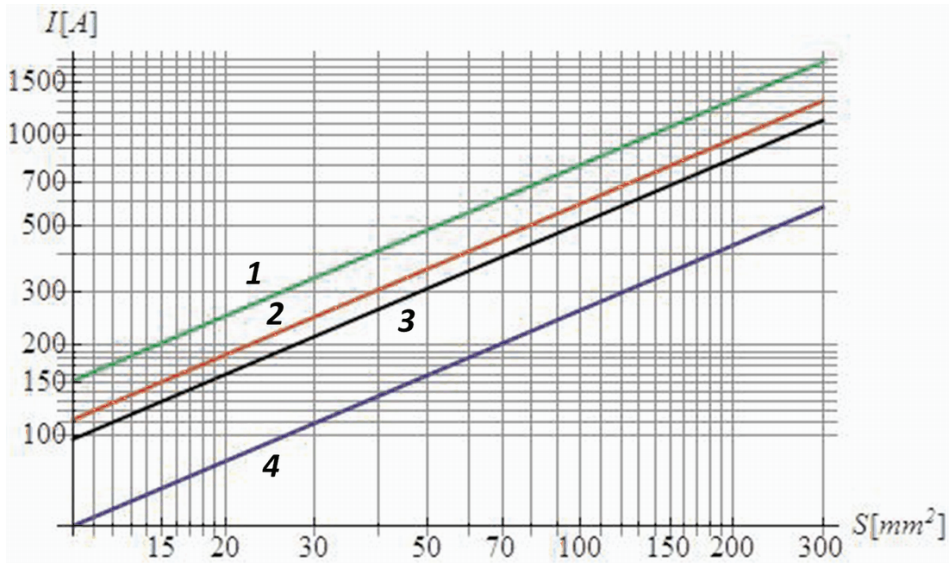
kde

$$\frac{I'_{k3}}{I'_{k3}} = \frac{I''_{k3} / I'_{k3}}{0,88 + 0,17 \cdot I''_{k3} / I'_{k3}} \quad (9.6)$$

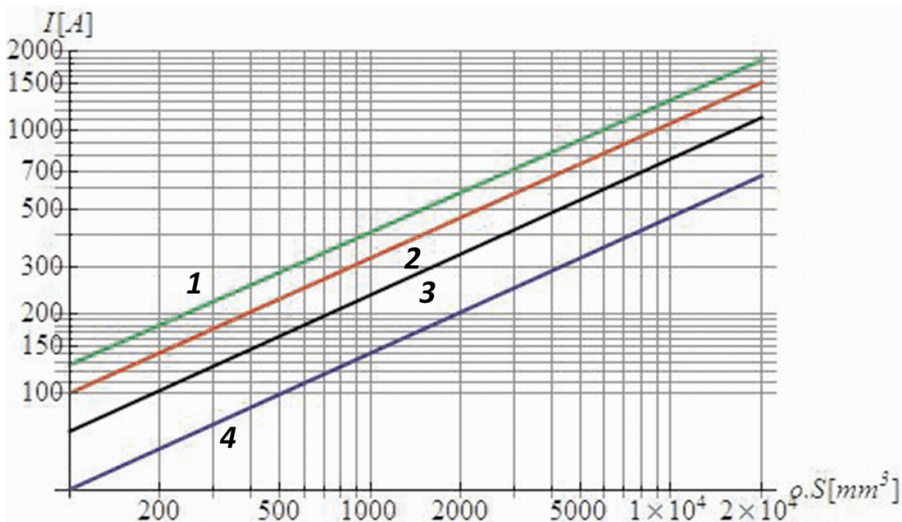
a

$$T'_d = \frac{3,1 s}{I'_{k3} / I_{k3}} \quad (9.7)$$

Výše uvedené vztahy platí pro vodiče i uzemňovací přívody, jestliže je doba trvání zkratu menší než 5 s. Pro trvalé proudy či nadproudy (např. proud zemního spojení) platí *obr. 9.3* a *9.4*.



**Obr. 9.3:** Trvalá zatížení vodičů kruhového průřezu (1 - měď holá nebo pozinkovaná, 2 – hliník, 3 – měď pocínovaná s olověným povlakem, 4 - galvanizovaná ocel, konečná teplota vodiče je 300°C pro 1, 2, 4 a 150°C pro 3)



**Obr. 9.4:** Trvalá zatížení vodičů obdélníkového průřezu (1 - měď holá nebo pozinkovaná, 2 – hliník, 3 – měď pocínovaná s olověným povlakem, 4 - galvanizovaná ocel, konečná teplota vodiče je 300°C pro 1, 2, 4 a 150°C pro 3), parametrem je součin obvodu  $o$  a průřezu  $S$  ( $\text{mm}^3$ )

Často může být konečná teplota vodiče odlišná od 300°C (viz. tab. 9.3). Tab. 9.4 ukazuje korekce grafů z obr. 9.3 a 9.4 na teploty odlišné od 300°C, jak je stanovuje norma. Problematika trvalé zatížitelnosti vodičů je však poněkud složitější, protože zatížitelnost závisí na teplotě okolí, osvětlení a emisivitě vodiče a rychlosti větru. Podrobněji se těmito výpočty zabývá *ampacita* („ampérová kapacita“) vedení (viz. kapitola 6).

| Konečná teplota (°C) | Přepočítací činitel pro zatížitelnost z obr. 9.3 a 9.4 pro průběhy 1, 2, a 4 |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 400                  | 1,2                                                                          |
| 350                  | 1,1                                                                          |
| 300                  | 1,0                                                                          |
| 250                  | 0,9                                                                          |
| 200                  | 0,8                                                                          |
| 150                  | 0,7                                                                          |
| 100                  | 0,6                                                                          |

**Tab. 9.4:** Činitelé pro přepočet konečné zatížitelnosti při konečné teplotě 300°C na jinou konečnou teplotu

Odolnosti proti zkratovým proudům a nadproudům generátorů a motorů upravuje norma ČSN EN 60034-1. Generátor musí odolat zkratovému proudu (jmenovitá hodnota zkratové odolnosti) po dobu min. 3 s. V případě trojfázového zkratu při

jmenovitým napětí nesmí vrcholová hodnota proudu překročit 15-ti násobek vrcholové hodnoty nebo 21-ti násobek efektivní hodnoty jmenovitého proudu stroje. Proudová přetížení musí dosahovat 1,5 násobek jmenovitého proudu po minimální dobu uvedenou v *tab. 9.5*.

| Typ stroje                         | Minimální doba proudového přetížení $1,5 \cdot I_n$ |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Generátory do výkonu 1200 MVA      | 30 s                                                |
| Generátory nad 1200 MVA            | 15 s                                                |
| Střídavé motory nn do 315 kW       | 120 s                                               |
| Střídavé motory vn a nn nad 315 kW | udává výrobce                                       |

**Tab. 9.5: Proudové přetížení točivých strojů**

Synchronní generátor je díky své konstrukci sám o sobě zdrojem nesymetrie. Při nesymetrických poruchách navíc vznikají další nesymetrie, zejména zpětná složka proudu, která může způsobit nebezpečné oteplení vinutí stroje. Odolnosti při nevyvážených podmínkách (zpětná složka proudu) upravuje *tab. 9.6*.

| druh stroje                                            | Max. hodnota $I_2/I_n$ pro trvalý provoz | Max. hodnota $(I_2/I_n)^2 \cdot t$ při poruše |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| stroje s vyniklými póly                                |                                          |                                               |
| nepřímo chlazená vinutí:<br>motory                     | 0,1                                      | 20                                            |
| generátory                                             | 0,08                                     | 20                                            |
| synchronní kompenzátory                                | 0,1                                      | 20                                            |
| přímo (vnitř.) chlazená nebo budící vinutí:<br>motory  | 0,08                                     | 15                                            |
| generátory                                             | 0,08                                     | 15                                            |
| synchronní kompenzátory                                | 0,08                                     | 15                                            |
| stroje s hladkým rotorem                               |                                          |                                               |
| nepřímo chlazená rotorová vinutí:<br>vzduchem          | 0,1                                      | 15                                            |
| vodíkem                                                | 0,1                                      | 10                                            |
| přímo (vnitř.) chlazená rotorová vinutí:<br>do 350 MVA | 0,08                                     | 8                                             |
| 350 – 900 MVA                                          | $0,08 - \frac{S_n - 350}{10^4}$          | $8 - 0,005 \cdot 45 \cdot (S_n - 350)$        |
| 900 – 1250 MVA                                         |                                          | 5                                             |
| 1250 – 1600 MVA                                        | 0,05                                     | 5                                             |

**Tab. 9.6: Nevyvážené pracovní podmínky pro synchronní stroje**

Odolnosti proti zkratovým proudům u transformátorů částečně upravuje norma ČSN EN 60076-5. Minimální doba trvání zkratového proudu je 2 s, u blokových transformátorů se však většinou sjednocuje s požadavky na generátor. K omezení velikosti zkratových proudů se přistupuje již při realizaci, kdy jsou pro jednotlivé napěťové hladiny předepsány minimální hodnoty napětí nakrátko (tedy impedance omezující zkrat).

| Jmenovitý výkon (kVA) | Min. napětí nakrátko (%) |
|-----------------------|--------------------------|
| do 630 kVA            | 4                        |
| 631 – 1250 kVA        | 5                        |
| 1251 – 2500 kVA       | 6                        |
| 2501 – 6300 kVA       | 7                        |
| 6301 – 25000 kVA      | 8                        |
| 25001 – 40000 kVA     | 10                       |
| 40001 – 63000 kVA     | 11                       |
| 63001 – 100000 kVA    | 12,5                     |
| nad 100000 kVA        | > 12,5                   |

**Tab. 9.7: Minimální hodnoty napětí nakrátko pro výkonové transformátory**

Výběr napěťové hladiny vyššího napětí blokového transformátoru pro vyvedení výkonu nebo transformátorů na vlastní spotřebě souvisí s hodnotou zkratového výkonu na té které hladině. Doporučené maximální hodnoty jsou v tab. 9.8.

| Nejvyšší provozovací napětí (kV) | Zkratový výkon (MVA) |
|----------------------------------|----------------------|
| 7,2 ÷ 25 kV                      | 500                  |
| 36 ÷ 38,5 kV                     | 1 000                |
| 52 ÷ 72,5 kV                     | 3 000                |
| 100 ÷ 123 kV                     | 6 000                |
| 145 ÷ 170 kV                     | 10 000               |
| 245 kV                           | 20 000               |
| 300 kV                           | 30 000               |
| 362 kV                           | 35 000               |
| 420 kV                           | 40 000               |
| 525 kV                           | 60 000               |
| 765 kV                           | 83 500               |

**Tab. 9.8: Doporučené maximální hodnoty zkratového výkonu podle napěťových hladin (pro Evropské ES)**

### 9.2.2. Odolnost zařízení s ohledem na dynamické účinky zkratových proudů

Dynamickou odolnost propojovacích vodičů a vedení upravuje norma ČSN EN 60865-1.



Pro vyhodnocení odolnosti proti zkratovým silám u tuhých vodičů se nejprve spočítá vrcholová síla mezi dvěma vodiči

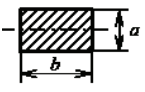

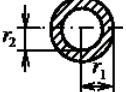
$$F_{m3} = \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot j_{p3}^2 \cdot \frac{l}{d_m} \quad (9.8)$$

kde  $d_m$  je účinná vzdálenost mezi vodiči respektující tvar průřezu vodiče. Vypočítá se z fázové rozteče  $d$  jako

$$d_m = \frac{d}{k_{12}} \quad (9.9)$$

kde  $k_{12}$  je součinitel. Pro kruhové vodiče je vždy  $k_{12} = 1$ , pro obdélníkové vychází ze vzorců pro magnetické pole mezi dvěma vodiči obdélníkového průřezu.

Moment setrvačnosti pro vodič se vypočítá podle *tab. 9.9*.

| obdélníkové průřezy                                                               | kruhové průřezy                                                                   | trubkové průřezy                                                                  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| $I = \frac{b \cdot a^3}{12}$                                                      | $I = \frac{\pi \cdot r^4}{4}$                                                     | $I = \frac{\pi \cdot (r_1^4 - r_2^4)}{4}$                                         |

**Tab. 9.9: Momenty setrvačnosti pro různé průřezy vodičů**

Průřezový modul vodiče  $Z$  bude:


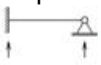
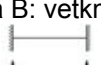
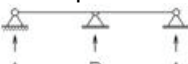

$$Z = \frac{I}{a/2} \text{ pro obdélníkový nebo}$$

$$Z = \frac{I}{r} \text{ pro kruhový vodič} \quad (9.10)$$

Pro výpočet ohybového napětí vodiče a podpěrek je nutné spočítat konstanty v *tab. 9.10* a *9.11*.

| Druh zkratu | $V_\sigma \cdot V_r$<br>Bez trojfázového OZ | $V_\sigma \cdot V_r$<br>S trojfázovým OZ | $V_F \cdot V_r$<br>S i bez trojfázového OZ                                                                                                                                                                                                                               |
|-------------|---------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2f          | 1,0                                         | 1,8                                      | Oblast 1 : 2,0 pro $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} \leq 0,5$<br>Oblast 2 : $\frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ pro $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} \leq 0,5$<br>Oblast 3 : 1,0 pro $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}}$            |
| 3f          | 1,0                                         | 1,8                                      | Oblast 1 : 2,7 pro $\frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} \leq 0,370$<br>Oblast 2 : $\frac{0,8 \cdot R_{p0,2}}{\sigma_{tot}}$ pro $0,370 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}} \leq 1$<br>Oblast 3 : 1,0 pro $1,0 \leq \frac{\sigma_{tot}}{0,8 \cdot R_{p0,2}}$ |

**Tab. 9.10: Konstanty  $V_\sigma, V_r, V_F$  pro výpočet ohyb. napětí a síly na podpěrky**

| Typ nosníku a způsob upevnění         |                                                                                                                         | $\alpha$                                 | $\beta$        |
|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----------------|
| nosník o jednom poli                  | A a B: prosté podepření<br>           | $\alpha_A = 0,5$<br>$\alpha_B = 0,5$     | $\beta = 1$    |
|                                       | A: vetknutí, B: prosté podepření<br> | $\alpha_A = 0,625$<br>$\alpha_B = 0,375$ | $\beta = 0,73$ |
|                                       | A a B: vetknutí<br>                  | $\alpha_A = 0,5$<br>$\alpha_B = 0,5$     | $\beta = 0,5$  |
| nosník o více polích stejných rozměrů | 2 pole:<br>                          | $\alpha_A = 0,375$<br>$\alpha_B = 1,25$  | $\beta = 0,73$ |
|                                       | 3 pole:<br>                          | $\alpha_A = 0,4$<br>$\alpha_B = 1,1$     | $\beta = 0,73$ |

**Tab. 9.11: Konstanty  $\alpha, \beta$  pro výpočet ohyb. napětí a síly na podpěrky**



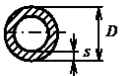
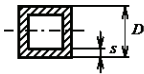
U jednoduchého vodiče (není složen z dílčích vodičů) platí pro celkové ohybové napětí  $\sigma_{tot}$  a tedy

$$\sigma_{\text{tot}} = V_{\sigma} \cdot V_r \cdot \beta \cdot \frac{F_{m3} \cdot l}{8 \cdot Z} R_{p0,2\text{min}} \quad (9.11)$$

kde  $l$  je délka rozpětí.

Přípojnice jsou odolné vůči zkratové síle, jestliže  $\sigma_{\text{tot}} \leq q \cdot R_{p0,2}$  pro minimální hodnotu meze průtažnosti materiálu vodiče  $R_{p0,2\text{min}}$  (je-li známa).

Součinitel  $q$  je uveden v *tab. 9.12*.  $q = 1,5$

|                                                                                   |                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | $q = 1,5$                                                                                                     |
|  | $q = 1,7$                                                                                                     |
|  | $q = 1,7 \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot s}{D}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot s}{D}\right)^4}$ |
|  | $q = 1,5 \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot s}{D}\right)^3}{1 - \left(1 - \frac{2 \cdot s}{D}\right)^4}$ |

**Tab. 9.12: Součinitelé  $q$  pro různé průřezy vodičů**

Dynamická síla na podpěrky  $F_d$  se vypočítá podle vztahu:

$$F_d = V_F \cdot V_r \cdot \alpha \cdot F_{m3} \quad (9.12)$$

podle *tab. 9.10* pro maximální hodnotu  $R_{p0,2\text{max}}$ .

Dynamická odolnost lanových vodičů přípojníc se týká především správného nadimenzování ocelových konstrukcí a dostatečných doskokových vzdáleností při kyvech vodičů po zkratu (viz. kap. 9.2.3). Výpočty dynamických sil jsou však poměrně komplikované a překračují rámec rozsahu této publikace, více viz. EN 60865-1. Zatímco pro tuhé vodiče se dynamickým účinkům předchází pouze správným konstrukčním provedením, u lanových vodičů včasné působení ochrany může významně snížit konstrukční nároky na výsledné technické řešení.

Dynamické odolnosti ostatních zařízení elektroprovozu jsou dány štítkovými hodnotami jednotlivých zařízení.

### 9.2.3. Napěťová odolnost zařízení

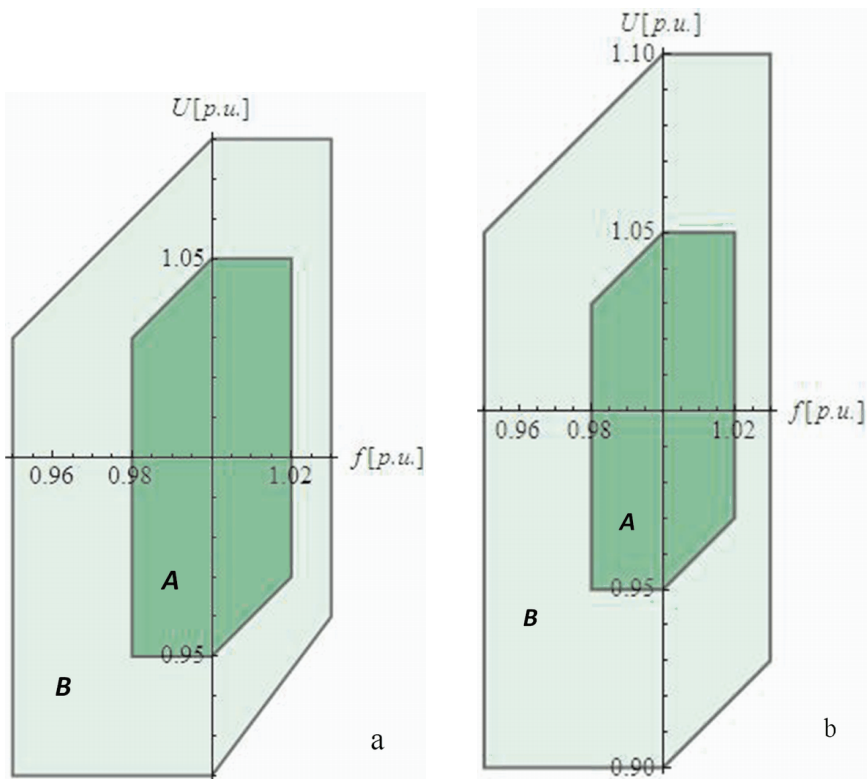
Napěťová odolnost rozvodného zařízení je v případě vzduchem izolovaných systémů (tj. např. venkovní rozvodna, vnitřní kobková rozvodna, vývody z generátoru, jsou-li provedeny holými vodiči) splněna dostatečnou vzdušnou vzdáleností od okolních předmětů a dostatečnou izolační schopností všech izolátorů v systému. Výdržná napětí a minimální vzdušné vzdálenosti pro vysokonapěťový systém předepisuje ČSN 33 3201. Základní údaje jsou uvedeny v *tab. 9.13*.

K dosažení výdržných napětí uvedených v *tab. 9.13* u zapouzdřených rozvodů a silového zařízení elektrárny se izolační úroveň zajišťuje jinými prostředky (SF<sub>6</sub>, minerální olej, papírová izolace, pryskyřice apod.).

Kromě krátkodobých a impulsních napětí je rovněž podstatná otázka provozu při zvýšené hodnotě napětí. Na provoz se zvýšenou hodnotou napětí jsou citlivé zejména točivé stroje. Mezní hodnoty trvalého provozu se však musí hodnotit společně s frekvencí, protože kritickým parametrem je tok v magnetickém obvodu (viz. popis ochrany proti přebuzení). *Obr. 9.5a* znázorňuje mezní stavy pro generátory a *obr. 9.5b* pro motory, které musí výrobci splňovat. V oblasti A přitom stroj musí být schopen vykonávat svoji základní funkci a vykazovat pouze drobné odchylky od garantovaných hodnot. V oblasti B stroj také musí být schopen vykonávat svoji základní funkci, ale odchylky mohou být větší než v oblasti A a vyšší může být také oteplení. Trvalý provoz na vnějším obvodu oblasti B se nedoporučuje.

| Nejvyšší napětí (kV) | Jmenovité výdržné napětí při atmosférickém impulsu (kV) | Jmenovité krátkodobé výdržné napětí 50 Hz (kV) | Minimální vzdušné vzdálenosti fáze-fáze fáze-země (mm) |               |
|----------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------|
|                      |                                                         |                                                | vnitřní                                                | venkovní      |
| 7,2                  | 60                                                      | 20                                             | 90                                                     | 120           |
| 12                   | 75                                                      | 28                                             | 120                                                    | 150           |
| 25                   | 125                                                     | 50                                             | 210                                                    | 290           |
| 38,5                 | 180                                                     | 75                                             | 320                                                    | 400           |
| 72,5                 | 325                                                     | 140                                            | 630                                                    |               |
| 123                  | 550                                                     | 230                                            | 1100                                                   |               |
| 145                  | 650                                                     | 275                                            | 1300                                                   |               |
| 245                  | 1050                                                    | 460                                            | 2100                                                   |               |
|                      | atm. impuls                                             | spín. impuls                                   | fáze-země                                              | fáze-fáze     |
| 420                  | 1425                                                    | 1050                                           | 2600                                                   | 3600          |
|                      | (fáze-země)                                             | (fáze-země)                                    | (vodič-konstrukce)                                     | (vodič-vodič) |
|                      | 1665                                                    | 1575                                           | 3400                                                   | 4200          |
|                      | (fáze-fáze)                                             | (fáze-fáze)                                    | (tyč-konstrukce)                                       | (tyč-vodič)   |

**Tab. 9.13: Napěťová odolnost a minimální vzdušné vzdálenosti**



Obr. 9.5: Mezní. hodnoty kmitočtu a napětí pro generátory (9.5a) a pro motory (9.5b)

### 9.2.4. Zkratová odolnost uzemnění s ohledem na nebezpečné dotykové napětí

Dotykové napětí je při poruše závislé na mnoha faktorech a závisí mimo jiné i na součinnosti ochran. Prvním z těchto faktorů je především kvalita uzemňovací sítě. Nejjednodušší vztah pro výpočet odporu uzemnění  $R_{Em}$  mřížové sítě je

$$R_{Em} = \frac{\sigma_E}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (9.13)$$

kde

$\sigma_E$  ..... měrná rezistivita půdy

A ..... celková plocha uzemňovací sítě

Ideální odpor uzemnění se blíží nule. To však neplatí, a tak vzniká při průchodu poruchového proudu ke vzdálené zemi (místo s nulovým potenciálem) na odporu  $R_{Em}$  úbytek napětí. Vznikne-li potřeba tento odpor snížit, je možné zvětšit plo-

chu uzemnění nebo soustavu doplnit o tyčové zemniče s odporem

$$R_{Et} = \frac{\rho_E}{2 \cdot \pi \cdot L} \cdot \ln \frac{4 \cdot L}{d} \quad (9.14)$$

kde

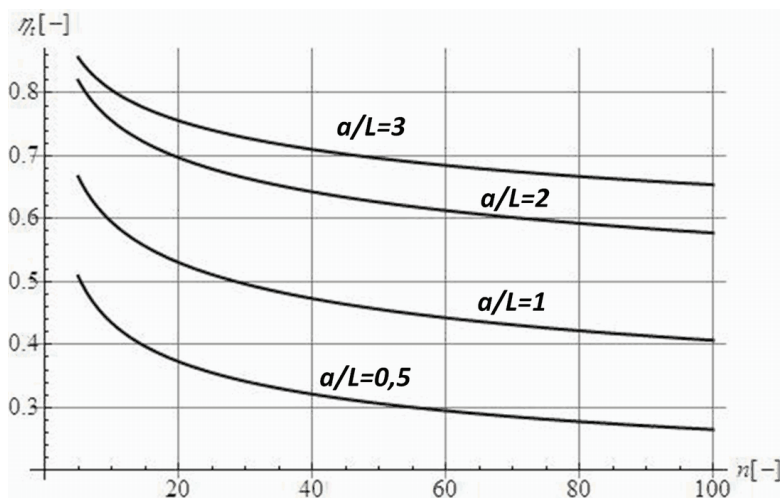
L ..... délka tyče

d ..... průměr tyče.

Výsledný odpor uzemnění stanice s n tyčovými zemniči bude

$$R_{Es} = \frac{1}{\frac{1}{R_{Em}} + \frac{\eta_t \cdot n}{R_{Et}}} \cdot \frac{1}{0,9} \quad (9.15)$$

kde  $\eta_t$  je činitel využití tyčí, který závisí na délce tyčí L a rozestupech mezi nimi a, viz. obr. 9.6.



**Obr. 9.6: Činitel využití tyčových zemničů v závislosti na poměru vzdálenosti mezi tyčemi a jejich délky**

Výsledný odpor uzemnění  $R_E$  se dále snižuje vlivem galvanického spojení uzemňovací soustavy a externích uzemňovacích soustav (uzemnění stožárů propojené zemnicími lany, uzemnění jiných stanic propojené stíněním kabelů nebo vyrovnávacími vodiči) s celkovým odporem  $R_{Eext}$  a bude platit:

$$R_E = \left( \frac{1}{R_{Es}} + \frac{1}{R_{Eext}} \right)^{-1} \quad (9.16)$$

Napětí na uzemnění při poruše bude

$$U_E = R_E \cdot I_E \quad (9.17)$$

kde  $I_E$  je část poruchového proudu, která teče do uzemnění. Tento proud závisí na typu uzemnění středu sítě, ve které k poruše došlo, viz *tab. 9.14*.

|                                                                     |                                          |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Síť TT s nízkoohmovým uzemněním uzlu                                | $I_E = r \cdot I''_{kl}$                 |
| Síť IT s uzemněním uzlu přes tlumivku v místě instalace tlumivky    | $I_E = r \cdot \sqrt{I_{Res}^2 + I_L^2}$ |
| Síť IT s uzemněním uzlu přes tlumivku ve stanici, kde není tlumivka | $I_E = r \cdot I_{Res}$                  |
| Síť IT(r) s uzemněním uzlu přes odpor                               | $I_E = r \cdot \sqrt{I_C^2 + I_R^2}$     |

**Tab. 9.14: Proudy do uzemnění podle typu soustav**

kde

$I_C$  ..... proud zemního spojení nevykompenzované sítě

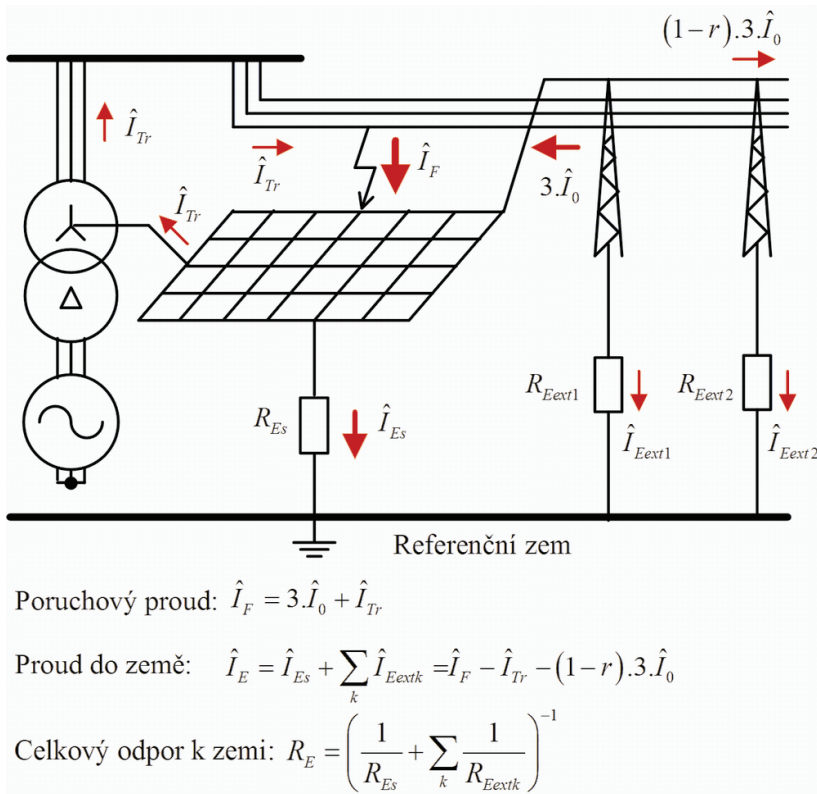
$I_{Res}$  ..... zbytkový proud zemního spojení (do 10 % proudu zemního spojení nevykompenzované sítě)

$I_L$  ..... proud uzlové tlumivky

$I_R$  ..... proud uzlového odporníku

$r$  ..... redukční činitel

Redukční činitel  $r$  respektuje magnetickou vazbu mezi fázovým vodičem a zemnicím lanem či stíněním a fakt, že část poruchového proudu je odvedena přes zemnicí lana nebo stínění kabelů právě touto vazbou. Rovněž respektuje vliv lokálních zdrojů, jejichž zkratový příspěvek je odveden lokální uzemňovací soustavou. Je definován jako poměr zpětného zemního proudu k součtu  $3 \cdot I_0$  ve fázových vodičích hlavního obvodu vzdáleného od místa zkratu a uzemňovací soustavy instalace.



**Obr. 9.7: Bilance poruchových proudů do uzemnění**

Maximální dovolené dotykové napětí  $U_{Tp}$  je funkcí doby vypnutí poruchy  $U_{Tp} = f(t_p)$ , viz. ČSN 33200-4-41 nebo ČSN 333201. Tato doba závisí na rychlosti působení ochran. Např. v sítích zvn/vvn vybavených moderními ochranami se tato doba předpokládá 100÷150 ms. Skutečné dotykové napětí se získá z napětí na uzemnění  $U_E$ . Pro správný návrh uzemnění postačí, když

$$U_E \leq 2 \cdot U_{Tp} \quad (9.18)$$

a jsou-li splněna dodatečná izolační opatření, pak

$$U_E \leq 4 \cdot U_{Tp} \quad (9.19)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že propojení uzemnění velkých elektrických provozoven (rozveden nebo elektráren) s uzemněním okolních objektů může představovat díky vzrůstu potenciálu při poruše riziko pro okolí. Proto se většinou uzemnění takových provozoven nespojuje s okolím a dbá se na jeho dostatečnou vzdálenost od uzemnění okolí.



### 9.3. Ochrany zařízení elektrických provozů

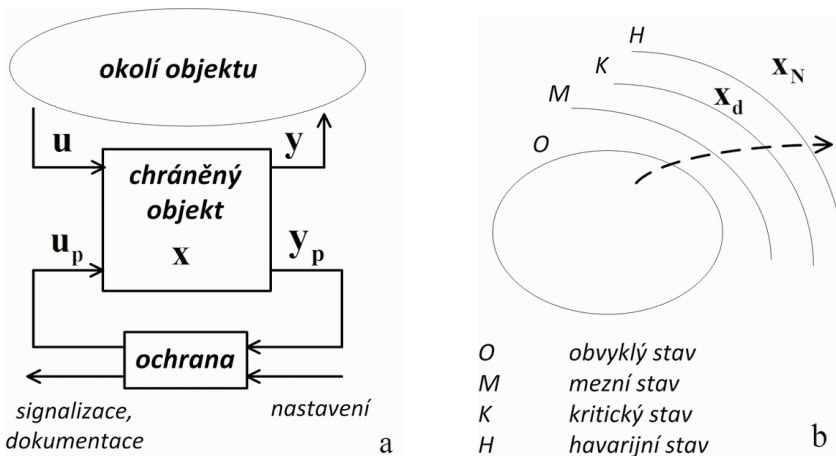
Hlavním úkolem elektrických ochranných zařízení je minimalizace škod způsobených poruchami v elektrické síti, která je složena z jednotlivých prvků, jako jsou kabely, vedení a vodiče, transformátory, generátory, vypínací prvky, měřicí zařízení apod. *Elektrická ochrana* je zařízení monitorující určitou část elektrické sítě, jež je schopno v požadované době, spolehlivě a bezpečně eliminovat vliv poruchy na chráněné zařízení. Z toho vyplývá, že ochrany jsou schopny chránit zařízení pouze před dočasnými účinky poruch (desítky ms až minuty) tak, aby nebyla překročena mez odolnosti zařízení. Elektrické ochrany naopak nezajišťují ochranu před impulsními účinky poruch (zajišťuje se svodiči přepětí, konstrukčním provedením, magnetickým stíněním apod.).

#### 9.3.1. Stavová reprezentace chránění

Výše uvedené požadavky jsou formalizovány ve stavovém popisu ochrany. Část sítě chráněná ochranou se nazývá *chráněný objekt*, zbytek sítě, které objekt ovlivňuje *okolí objektu*. Soubor vnitřních *stavových proměnných objektu*  $x$  (např. napětí, proudy, teploty, syčení apod.) popisuje objekt ve smyslu jeho jedinečného (nezaměnitelného) stavu. Jinými slovy, mají-li dva vektory vnitřních stavových proměnných téhož objektu stejné hodnoty, jedná se o jeden a tentýž stav. Chráněný objekt je svázán s okolím prostřednictvím *výstupních stavových proměnných*  $y$ , což je soubor těch stavových proměnných, které jakýmkoli způsobem ovlivňují okolí objektu (vnější systém). Naopak chráněný objekt je ovlivňován z vnějšku prostřednictvím vektoru *vstupních (řídících) veličin*  $u$ . Toto lze obecně přepsat jako soustavu diferenciálních a algebraických rovnic ve tvaru

$$\bar{x}' = \bar{f}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{u}) \quad (9.20)$$

$$\bar{0} = \bar{g}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{u}) \quad (9.21)$$



Obr. 9.8: Stavová reprezentace chránění

Ochrana snímá výstupní veličiny objektu zkrácené chybou měření a zpracování  $y_p$  a za předpokladu známých veličin  $u$  v podstatě rekonstruuje stav systému  $x$ . Tento postup je nutný, protože prakticky není možné měřit přímo všechny potřebné veličiny  $x$  (např. teplota se nahrazuje tepelným modelem jako funkce proudů, syčení poměrem  $U/f$  apod.). Nastavení ochrany definuje oblast dovolených hodnot  $x_d$ , která se ještě může dělit na oblast obvyklých hodnot, mezních hodnot a kritických hodnot. Všechny stavy, které se nalézají mimo oblast dovolených hodnot, jsou stavy nedovolené  $x_n$ . Ochrana porovnává zjištěný stav chráněného objektu a oblast dovolených hodnot. V případě, že se stav chráněného objektu nalézá mimo tuto oblast, ochrana zapůsobí prostřednictvím veličiny  $u_p$  (např. povel k vypnutí vypínače, OZ apod.). V opačném případě ochrana provádí pouze monitoring chráněného objektu (normální provoz, varovné hlášky apod.).

### 9.3.2. Základní požadavky na ochrany

Hlavním cílem použití ochrany či systému ochran je včasná izolace části elektrické sítě, ve které vznikla porucha, aniž by nepostižená část sítě vyžadovala dodatečnou obsluhu. Z toho vyplývají následující požadavky na ochrany:

- spolehlivost
- selektivita
- rychlost působení
- jednoduchost obsluhy
- ekonomická návratnost

#### Spolehlivost

Spolehlivost znamená schopnost vykonávat operace podle daného algoritmu ochrany ve stanoveném čase a s požadovanými parametry a splnit všechny technické podmínky z pohledu chráněného objektu. Celková spolehlivost ochrany se dělí do dvou kategorií – funkčnost a bezpečnost působení. Funkčnost ochrany je pravděpodobnost, že ochrana správně zapůsobí. Jinými slovy to znamená schopnost ochrany eliminovat poruchové stavy v jejím každodenním provozu. Zjednodušeně lze říci, že funkčnost je možné zvýšit paralelním zařazením *redundantního* ochranného prvku. Bezpečnost ochrany je naopak pravděpodobnost, že ochrana nezapůsobí nesprávně. Chybné působení ochrany může být způsobeno jednak vlastní konstrukcí ochrany, ale i lidským faktorem. Zvýšení bezpečnosti lze proto docílit prostřednictvím sériového zařazení redundantního ochranného prvku. Z výše uvedeného vyplývá, že požadavky na funkčnost a bezpečnost stojí proti sobě. Při redundantním použití ochran je potřeba vzít v úvahu obě tato rizika a k nim odpovídající potenciální škody. Redundanci ochran dle empirických poznatků řeší norma ČSN 33 3051.

## Selektivita

Selektivita je schopnost ochrany (systému ochran) vypnout pouze postiženou oblast. Pro dodržení selektivity je tak rozhodující, aby zareagoval ochranný prvek, který je umístěn „blíže“ k poruše. Toho lze docílit následujícími principy

- *časovým odstupňováním* (ochrana nejbližší k místu poruchy působí nejrychleji a ostatní ochrany působí postupně s nastaveným časovým zpožděním)
- *amplitudovým nebo fázovým porovnáním* (tzv. rozdílové a srovnávací ochrany)
- *směrností* (určení směru toku výkonu na vstupu a výstupu objektu)

## Rychlost působení ochrany

Rychlostí působení ochrany se chápá doba působení ochrany od identifikace poruchy až do vyslání vypínacího impulsu. Požadavky na rychlost působení se mohou velmi lišit. Zásadní faktory, které to ovlivňují, jsou:

- selektivita
- zachování dynamické stability soustavy
- minimalizace rozsahu poškození
- zkrácení času provozu spotřebičů při sníženém napětí (zvýšeném proudovém odběru)
- zmenšení nebezpečí úrazu osob

Je třeba mít na paměti, že celková doba vypnutí poruchy, která má rozhodující vliv na účinky na chráněné zařízení, je dána součtem rychlosti působení ochrany a rychlosti vypnutí vypínače.

## Jednoduchost obsluhy

Systém ochran má být navržen tak, aby umožňoval co nejjednodušší obsluhu a současně plnil všechny předepsané funkce. S každou další funkcionalitou ochrany (rozšíření programu, instalace karty, vzdálená správa a monitoring apod.), která není nezbytně nutná k její správné funkci, zároveň vnáší riziko chybné manipulace. Každý takový krok je třeba pečlivě zvážit, případně najít prostředky k eliminaci těchto rizik.

## Ekonomická návratnost

Výběr vhodného typu ochrany včetně řešení případné redundance podmiňuje její ekonomická návratnost. Při kalkulaci ekonomické návratnosti je třeba vzít v úvahu zejména četnost poruch, cenu chráněného zařízení a ztráty způsobené výpadkem dodávky elektrické energie. Základní požadavky stanovuje ČSN 333051, která je pro většinu aplikací vyhovující. To však nemusí platit u některých speciálních provozů, ve kterých vznikají velké škody z nevýroby (např. FVE), nebo při rozhodování o nasazení automatik.

### 9.3.3. Měřicí zařízení pro ochrany

Ochrany potřebují pro svoji funkci dostatečně přesná měřicí zařízení, která jsou schopna přenášet do analogových vstupních obvodů ochrany pokud možno nezkrácenou informaci o chování systémových veličin. Tato měření se provádí ve většině případů přístrojovými transformátory napětí a proudu. Výjimku tvoří např. teplotní senzory určené pro tepelná relé či optické smyčky zábleskových ochrany. Přestože senzory pro měření napětí a proudů jsou již dnes významněji zastoupeny na trhu, v energetických aplikacích se k chránění zatím příliš nevyužívají.

K měření proudů se užívají *přístrojové transformátory proudu* (PTP), k měření napětí *přístrojové transformátory napětí* (PTN) nebo *kapacitní transformátory napětí* (tj. přístrojové transformátory napětí o nižším převodu zapojené za kapacitní dělič napětí). Všechna tato zařízení slouží k redukci velkých provozních proudů a napětí v elektrizační soustavě na bezpečné malé hodnoty analogových signálů, které jsou dále využitelné v ochranách pro jejich digitální zpracování. Další funkcí PTP a PTN je izolace měřicích obvodů od soustavy vysokého napětí.

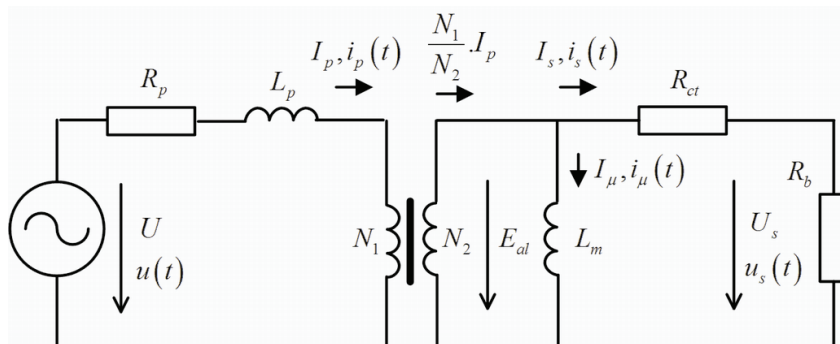
#### Přístrojové transformátory proudu

Přístrojový transformátor proudu je speciální druh transformátoru, jehož primární vinutí je tvořeno přímo vodičem (či kabelem) energetického systému, na kterém je umístěno toroidní jádro se sekundárním vinutím. Díky nízkým hodnotám hlavní i rozptylné reaktance vzhledem k parametrům elektrizační soustavy nedochází proto instalací PTP k ovlivnění poměrů v soustavě.

Pro účely měření by bylo optimální, aby PTP transformoval primární proud  $I_1$  jako tzv. *ideální transformátor*:

$$I_s = \frac{N_p}{N_s} \cdot I_p \quad (9.22)$$

V praxi však bohužel nelze zanedbat nelinearitu magnetického jádra ani rozptylné reaktance a zátěž na sekundární straně. Výsledkem je náhradní schéma PTP, které zobrazuje obr. 9.9.



Obr. 9.9: Náhradní schéma PTP

Pro přenos efektivních hodnot proudů v periodicky ustáleném stavu bude platit

$$I_s = \frac{N_p}{N_s} \cdot I_p - I_\mu \quad (9.23)$$

kde  $I_\mu$  je magnetizační proud, který je určující pro sycení jádra. Se zvyšujícím se primárním proudem roste úměrně jak magnetizační proud, tak sekundární proud. Velikost magnetizačního proudu je však v poměru k sekundárnímu proudu zanedbatelná a platí přibližně rovnice (9.22). Od jisté hodnoty primárního proudu se jádro začíná přesycovat, což se projeví výrazným narůstáním magnetizačního proudu na úkor proudu sekundáru (sinusový průběh proudu se zkresluje a oproti ideálnímu přenosu se snižuje jeho efektivní hodnota). Pro další zvyšování primárního proudu tak člen  $I_\mu$  z rovnice (9.23) nelze zanedbat a chyba měření PTP se rychle zvyšuje.

Jádra PTP rozlišujeme podle účelu použití na přesná *měřicí jádra* (např. pro fakturační měření) a *jisticí jádra* (pro ochrany). Zatímco pro měřicí jádra je důležitá přesnost měření v rozsahu provozních proudů a rychlé přesycení u nadproudů (omezení maximální hodnoty sekundárního proudu vstupujícího do elektroměru), u jisticích jader je požadován přenos pro co největší nadproudy i za cenu nižší přesnosti měření.

Podle normy IEC 60044-1 uvádějí výrobci pro měřicí jádra PTP:

- jmenovitý proud primárního a sekundárního vinutí  $I_{pn}$ ,  $I_{sn}$
- třídu přesnosti pro měřicí jádra
- jmenovité nadproudové číslo, při kterém dojde k přesycení  $n_{FSn}$  (security factor)
- jmenovitou zátěž  $S_{bn} = R_{bn} \cdot I_{sn}^2$  (VA) na sekundáru, ke které uvedené parametry vztahují

Příklad označení měřicího jádra:

|                 |                 |                 |
|-----------------|-----------------|-----------------|
| 0,2             | FS 5            | 30 VA           |
| Třída přesnosti | Security factor | Jmenovitá zátěž |

Pro jisticí jádra PTP jsou uvedeny následující hodnoty:

- jmenovitý proud primárního a sekundárního vinutí  $I_{pn}$ ,  $I_{sn}$
- třídu přesnosti pro jisticí jádra
- max. nadproudové číslo, při kterém není překročena jmenovitá třída přesnosti měření  $n_{ALFn}$  (accuracy limit factor)

- jmenovitou zátěž  $S_{bn} = R_{bn} \cdot I_{sn}^2$  (VA) na sekundáru, ke které uvedené parametry vztahují

Příklad označení jisticího jádra:

|                 |                       |                 |
|-----------------|-----------------------|-----------------|
| 5 P             | 20                    | 60 VA           |
| Třída přesnosti | Jmen. nadproud. čísel | Jmenovitá zátěž |

Nejpoužívanější třídy přesnosti a rozsahy ukazují *tab. 9.15* a *9.16*.

Při zapojení jiné než jmenovité zátěže ( $S$ ) se hodnota nadproudového činitele mění přibližně podle vztahu:

$$n_{FSskut} \approx n_{FSn} \frac{S_n + R_{ct} \cdot I_{sn}^2}{S + R_{ct} \cdot I_{sn}^2}, \text{ resp.}$$

$$n_{ALFskut} \approx n_{ALFn} \frac{S_n + R_{ct} \cdot I_{sn}^2}{S + R_{ct} \cdot I_{sn}^2} \tag{9.24}$$

kde

$$S = R_b \cdot I_{sn}^2 \quad \text{skutečné zatížení sekundáru}$$

$R_{ct}$  ..... vnitřní odpor PTP

Je nutno dodat, že pro velmi malé poměry skutečné a jmenovité zátěže chyba měření vzrůstá a tento vztah neplatí.

| třída přesnosti PTP | pro zátěž (% $S_n$ )           | max. chyba     |                     |                |
|---------------------|--------------------------------|----------------|---------------------|----------------|
|                     |                                | při % $I_{pn}$ | chyba velikosti (%) | Chyba úhlu (°) |
| 0,1                 | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$            | 5 %            | 0,4                 | 15             |
|                     |                                | 20 %           | 0,2                 | 8              |
|                     |                                | 100 %          | 0,1                 | 5              |
|                     |                                | 120 %          | 0,1                 | 5              |
| 0,2                 | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$<br>< 15 VA | 5 %            | 0,75                | 30             |
|                     |                                | 20 %           | 0,35                | 15             |
|                     |                                | 100 %          | 0,2                 | 10             |
|                     |                                | 120 %          | 0,2                 | 10             |
| 0,2S                | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$<br>< 15 VA | 1 %            | 0,75                | 30             |
|                     |                                | 5 %            | 0,35                | 15             |
|                     |                                | 20 %           | 0,2                 | 10             |
|                     |                                | 100 %          | 0,2                 | 10             |
| 0,5                 | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$            | 5 %            | 1,5                 | 90             |
|                     |                                | 20 %           | 0,75                | 45             |
|                     |                                | 100 %          | 0,5                 | 30             |
|                     |                                | 120 %          | 0,5                 | 30             |

**Tab. 9.15: Nejběžnější charakteristiky měřicích jader PTP**

| třída přesnosti PTP | pro zátěž (% $S_n$ ) | max. chyba        |                     |                |
|---------------------|----------------------|-------------------|---------------------|----------------|
|                     |                      | při % $I_{pn}$    | chyba velikosti (%) | Chyba úhlu (°) |
| 10P                 | 100 %<br>$S_n$       | 100 %             | 3                   | -              |
|                     |                      | $n_{ALFn} I_{pn}$ | 10                  | -              |
| 5P                  | 100 %<br>$S_n$       | 100 %             | 1                   | 60             |
|                     |                      | $n_{ALFn} I_{pn}$ | 5                   | -              |

**Tab. 9.16: Nejběžnější charakteristiky jisticích jader PTP**

Pro správné dimenzování jisticího jádra pro PTP je nutné aby

$$n_{ALFskut} \geq n_p \quad (9.25)$$

kde

$n_p$  ..... požadovaný nadproudový činitel

Požadovaný nadproudový činitel se obecně stanoví jako

$$n_p = K_{ssc} \cdot K_{td} \quad (9.26)$$

kde činitel symetrického zkratového proudu ( $K_{ssc}$ ) se stanoví jako

$$K_{ssc} = \frac{I''_{kMAX}}{I_{pn}} \quad (9.27)$$

Druhým činitelem je činitel předdimenzování na stejnosměrnou složku  $K_{td}$ . Pro jeho výpočet je nutné si podrobněji popsat přenos primárního zkratového proudu obsahujícího stejnosměrnou složku. Ke zkratu dojde, bude-li zdroj síťového napětí  $u(t)$  dodávat proud do obvodu obsahující  $R_p$  a  $L_p$ , které představují vnitřní impedanci sítě. Jde tedy v podstatě o přechodný děj, při kterém dojde k zapojení zdroje síťového napětí  $u(t)$  do obvodu z *obr. 9.9*. Při zanedbání magnetizační indukčnosti  $L_m$ , která je vůči  $L_p$  malá, a pro případ doby sepnutí s největší možnou stejnosměrnou složkou, bude mít zkratový proud na primární straně PTP tvar

$$i_p(t) = \frac{U}{Z} \cdot \left( \cos(\omega \cdot t) - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) = \operatorname{Re} \left[ \frac{U}{Z} \left( e^{j\omega t} - e^{-\frac{t}{T_p}} \right) \right] \quad (9.28)$$

kde impedance soustavy (měřené části sítě) bude

$$Z = \sqrt{R_p^2 + (\omega \cdot L_p)^2} \quad (9.29)$$

a časová konstanta soustavy a tedy i primární strany PTP

$$T_p = \frac{L_p}{R_p} \quad (9.30)$$

Pro sekundární stranu při zanedbání rozptylné indukčnosti sekundárního vinutí pak platí rovnice

$$R_s \cdot i_s + \frac{d\phi(i_\mu)}{dt} = R_s \cdot i_s + \frac{d\phi(i_p - i_s)}{dt} = 0 \quad (9.31)$$



Nebude-li se PTP přesycovat, bude charakteristika  $\phi(i_\mu)$  lineární a bude platit:

$$\phi(i_\mu) = L_m \cdot i_\mu = L_m \cdot (i_p - i_s) \quad (9.32)$$

a

$$R_b \cdot i_s + L_m \cdot \frac{di_\mu}{dt} = R_b \cdot i_s + L_m \cdot \frac{di_s}{dt} - L_m \cdot \frac{di_p}{dt} = 0 \quad (9.33)$$

Řešením této rovnice je:

$$i_s = \frac{U}{Z} \cdot \operatorname{Re} \left\{ \frac{j\omega T_s \cdot e^{j\omega t} - e^{-\frac{t}{T_s}}}{1 + j\omega T_s} + \frac{e^{\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}}}{T_p - T_s} \right\} \quad (9.34)$$

kde časová konstanta sekundární strany bude

$$T_s = \frac{L_m}{R_s} = \frac{L_m}{R_b + R_{ct}} \quad (9.35)$$

$R_b$  ..... odpor zátěže

$R_{ct}$  ..... vnitřní odpor PTP

Magnetizační proud bude potom:

$$i_\mu = \frac{U}{Z} \cdot \operatorname{Re} \left[ \frac{e^{j\omega t} - e^{-\frac{t}{T_s}}}{1 + j\omega T_s} + \frac{T_p}{T_p - T_s} \cdot \left( e^{\frac{t}{T_p}} - e^{-\frac{t}{T_s}} \right) \right] \quad (9.36)$$

Potřebné předdimenzování nadproudového čísla pro přenos ss složky získáme jako podíl magnetizačního proudu a ustáleného magnetizačního proudu (který vyvolá ustálená střídavá složka). Za předpokladu, že  $\omega T_s \gg 1$  a doba, po kterou se nesmi PTP přesytit  $t'_{al}$  (tzv. přípustná doba pro mez přesnosti), platí

$$K_{td} = \frac{i_\mu}{i_{\mu\infty}} \approx 1 + \frac{\omega T_s T_p}{T_p - T_s} \cdot \left( e^{\frac{t'_{al}}{T_p}} - e^{-\frac{t'_{al}}{T_s}} \right) \quad (9.37)$$

Číslo  $K_{td}$  se nazývá přechodový činitel a vyjadřuje, kolikrát se musí požadované nadproudivé číslo zvýšit pro přenos nejnepriznivějšího případu ss složky zkratového proudu po stanovenou dobu oproti požadovanému nadproudivému číslu na přenos ustálené střídavé složky tohoto proudu.

Výše uvedený vztah platí pro cyklus C-O, pro cykly opětného zapínání typu C-O-C-O je třeba ještě uvážit zbytkovou hodnotu magnetického toku při opětném zapnutí. Přesný výpočet předdimenzování PTP přes  $K_{td}$  pro přechodné stavy bývá složitý (zejména z důvodu neznalosti všech časových konstant) a výrobci PTP proto často uvádějí požadavky na tzv. jmenovitou hodnotu sekundární elektromotorické síly (e.m.s.). Protože

$$n_{ALFskut} = n_{ALFn} \frac{S_n + R_{ct} \cdot I_{sn}^2}{S + R_{ct} \cdot I_{sn}^2} = n_{ALFn} \frac{(R_{bn} + R_{ct}) I_{sn}}{(R_b + R_{ct}) I_{sn}} \geq \frac{I''_{kMAX}}{I_{pn}} \cdot K_{td} = n_p \quad (9.38)$$

a bude-li jmenovitá e.m.s. na sekundáru

$$E_{aln} = (R_{bn} + R_{ct}) I_{sn} \quad (9.39)$$

pak

$$E_{aln} \geq \frac{I''_{kMAX} \cdot K_{td}}{n_{ALFn}} \cdot (R_b + R_{ct}) \cdot \frac{I_{sn}}{I_{pn}} \quad (9.40)$$

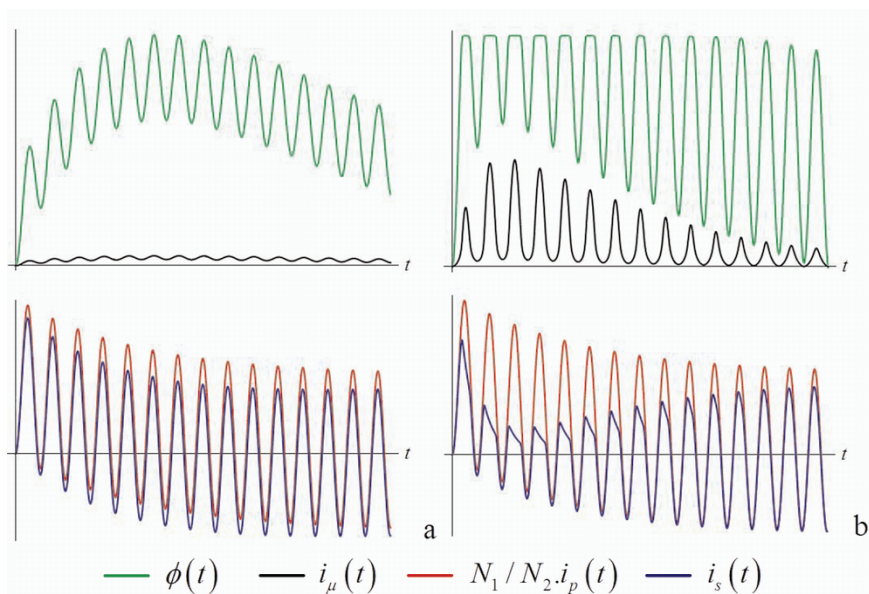
Člen  $\frac{I''_{kMAX} \cdot K_{td}}{n_{ALFn}}$  bývá zjednodušen na empirický vztah podle typu ochrany.

Příkladem jsou typické hodnoty uvedené v *tab. 9.17*.

Srovnání typických průběhů přenosu zkratového proudu se stejnosměrnou složkou je uveden na *obr. 9.10a* pro nepřesycený PTP a na *9.10b* pro přesycený PTP.

| Typ ochrany                                                                                                           | Hodnoty výrazu $\frac{I''_{kMAX} \cdot K_{td}}{n_{ALFn}}$   |                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Nadproudová ochrana časově nezávislá (zkratová)                                                                       | Maximum z $1,5 \cdot I_{pOCHR}$ a $I''_{kMAX}$              |                                                       |
| Nadproudová ochrana časově závislá s nastavenou hodnotou $I_{pOCHR}$                                                  | Maximum z $20 \cdot I_{pOCHR}$ a $I''_{kMAX}$               |                                                       |
| Rozdílová ochrana vedení (s max. poruchovým proudem vnější poruchy $I''_{fMAX}$ )                                     | Maximum z $0,5 \cdot I''_{kMAX}$ a $2 \cdot I''_{fMAX}$     |                                                       |
| Rozdílová ochrana přípojnic                                                                                           | $0,5 \cdot I''_{kMAX}$                                      |                                                       |
| Rozdílová ochrana transformátoru (se jmen. proudem $I_{nTRF}$ a max. poruchovým proudem vnější poruchy $I''_{fMAX}$ ) | Maximum z $30 \cdot I_{nTRF}$ a $2 \div 4 \cdot I''_{fMAX}$ |                                                       |
| Rozdílová ochrana generátoru (s max. poruchovým proudem vnější poruchy)                                               | $5 \cdot I''_{fMAX}$                                        |                                                       |
| Distanční ochrana vedení s nast. proudem 1. zóny $I_{1.zóna}$                                                         | $T_p \leq 30$ ms                                            | Maximum z $2 \cdot I''_{kMAX}$ a $3 \cdot I_{1.zóna}$ |
|                                                                                                                       | $T_p = 30 \div 50$ ms                                       | Maximum z $2 \cdot I''_{kMAX}$ a $6 \cdot I_{1.zóna}$ |
|                                                                                                                       | $T_p > 50$ ms                                               | Maximum z $4 \cdot I''_{kMAX}$ a $6 \cdot I_{1.zóna}$ |

**Tab. 9.17: Požadavky na PTP podle druhu ochrany udávané výrobci**



**Obr. 9.10: Průběh veličin pro nepřesycený (a) a přesycený (b) PTP**

## Přístrojové transformátory napětí

Přístrojové transformátory napětí (PTN) se vyrábějí ve dvou provedeních – induktivní a kapacitní. Induktivní typ má své primární vinutí na jednom konci galvanicky spojené s fázovým vodičem, zatímco kapacitní typ se skládá z kapacitního děliče napětí a induktivně je měřena pouze příslušná poměrná část fázového napětí. Oba dva typy PTN poskytují dostatečně přesná měření fázových napětí. Na rozdíl od PTP nepředstavují jevy spojené s přesycováním zásadní problém, protože provoz elektrizační soustavy je limitován do výše svého maximálního provozovacího napětí a poruchy v síti většinou vedou ke snížení nebo úplné ztrátě napětí. Pro přenos napětí na primáru  $U_p$  na sekundár  $U_s$  tak prakticky vždy s velmi malou odchylkou platí:

$$U_s = \frac{N_s}{N_p} \cdot U_p \quad (9.41)$$

Obdobně jako u PTP, jádra PTN rozlišujeme podle použití na měřicí (fakturační měření) a jisticí (ochrany) jádra s obdobnými požadavky.

Podle normy IEC 60044-2 uvádějí výrobci pro měřicí jádra PTN

- jmenovité napětí primárního a sekundárního vinutí  $U_{pn}$ ,  $U_{sn}$
- třídu přesnosti pro měřicí jádra
- jmenovitou zátěž  $S_{bn} = U_{sn}^2 / R_{bn}$  (VA) na sekundáru, ke které uvedené parametry vztahují

Příklad označení měřicího jádra:

0,5 – třída přesnosti

15 VA – jmenovitá zátěž

Pro jisticí jádra PTP jsou uvedeny následující hodnoty

- jmenovité napětí primárního a sekundárního vinutí  $U_{pn}$ ,  $U_{sn}$
- třídu přesnosti pro jisticí jádra
- jmenovitou zátěž  $S_{bn} = U_{sn}^2 / R_{bn}$  (VA) na sekundáru, ke které uvedené parametry vztahují

Příklad označení jisticího jádra:

3P – třída přesnosti

60 VA – jmenovitá zátěž

Standardní převody PTN jsou  $U_{pn} // 100 / \sqrt{3}$  V nebo  $U_{pn} // 110 / \sqrt{3}$  V. Nejpoužívanější třídy přesnosti a rozsahy pro PTN ukazují *tab. 9.18* a *9.19*.

| třída přesnosti PTN | pro zátěž (% $S_n$ )           | max. chyba     |                     |                |
|---------------------|--------------------------------|----------------|---------------------|----------------|
|                     |                                | při % $U_{pn}$ | chyba velikosti (%) | Chyba úhlu (°) |
| 0,1                 | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$            | 80 ÷ 120       | 0,1                 | 5              |
| 0,2                 | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$<br>< 15 VA | 80 ÷ 120       | 0,2                 | 10             |
| 0,5                 | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$            | 80 ÷ 120       | 0,5                 | 20             |
| 1,0                 | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$            | 80 ÷ 120       | 1,0                 | 40             |

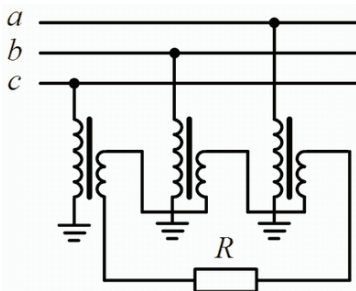
**Tab. 9.18: Nejběžnější charakteristiky měřících jader PTN**

| třída přesnosti PTN | pro zátěž (% $S_n$ ) | max. chyba           |                     |                |
|---------------------|----------------------|----------------------|---------------------|----------------|
|                     |                      | při % $U_{pn}$       | chyba velikosti (%) | Chyba úhlu (°) |
| 3P                  | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$  | 5 % -<br>5. $U_{pn}$ | 3,0                 | 120            |
| 6P                  | 25 ÷ 100 %<br>$S_n$  | 5 % -<br>5. $U_{pn}$ | 6,0                 | 240            |

**Tab. 9.19: Nejběžnější charakteristiky jisticích jader PTN**

V úvodu bylo konstatováno, že přesycení PTN nepředstavuje v provozních podmínkách zásadní problém. Z této skutečnosti se vychází při návrhu vlastního jádra, avšak k saturaci jádra v některých případech může dojít vlivem ferorezonance. Podmínkou vzniku tohoto jevu je sériový rezonanční obvod primárního vinutí PTN a parazitní kapacity (např. kontakty vypínače). Ferorezonance pak může být inicializována spínacím přepětovým impulsem a projevuje se deštrujícím přepětím na PTN. Vznik ferorezonance je velmi obtížné predikovat, protože závisí na mnoha konstrukčních parametrech PTN i parazitních parametřů v síti. Jejím vzniku je však možné zamezit, bude-li obvod efektivně ztlumen. K ztlumení se využívá speciální antiferorezonanční obvod uvedený na obr. 9.11. Skládá se ze tří vinutí zapojených do otevřeného trojúhelníka s tlumicím rezistorem, jehož velikost se na základě empirických znalostí pohybuje typicky 50 ÷ 60  $\Omega$  a jmenovitý výkon 200 ÷ 500 W. Za běžných provozních podmínek rezistorem proud neprotéká. Proud začne protékat až za stavu, kdy bude v trojfázovém obvodu přítomna neto-

čivá složka napětí. Protože k ferorezonanci nedochází ve všech třech fázích současně, vytvoří se tak netočivá složka napětí a dochází k tlumení.

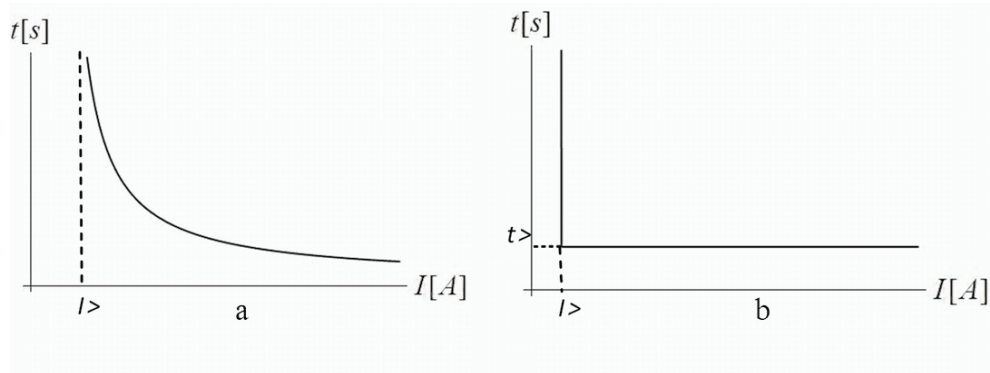


Obr. 9.11: Antiferorezonanční obvod s rezistorem k ztlumení ferorezonance

### 9.3.4. Přehled ochran a principy chránění

#### Nadproudová ochrana

Nadproudová ochrana měří obvykle tři fázové proudy a/nebo zemní proud. Ochrana vybaví v nastaveném čase, jestliže je za stanovených podmínek kterýkoli z naměřených proudů větší než nastavená hodnota. Z tohoto pohledu rozdělujeme charakteristiky nadproudových ochran na charakteristiky časově *nezávislé* a časově *závislé*. Většinou je potřeba, aby ochrana reagovala různě na různé typy nadproudů (např. aby zkratový proud vypnula pokud možno okamžitě a nadproud s časovou prodlevou). Z tohoto důvodu je výsledná charakteristika ochrany složena z kombinace různých charakteristik, kterým odpovídají různě odstupňované nadproudy (bývají označovány např.  $I >$ ,  $I >>$ ,  $I >>>$  atd.).



Obr. 9.12: Nadproudová ochrana s charakteristikou časově závislou (9.12a) a časově nezávislou (9.12b)

Obecně tak lze vyvodit základní podmínku nastavení zkratové ochrany

$$I''_{k \min} > I_p > I_{L \text{ peak max}} \quad (9.42)$$

kde

$I_p$  ..... hodnota nastavení pro  $I >>$

$I''_{k\min}$  ..... minimální hodnota zkratového proudu

$I_{L\text{peak max}}$  maximální okamžitá hodnota proudu zátěže.

Většina výrobců přitom doporučuje alespoň  $I_p \geq 1,5 \div 1,6 \cdot I_{L\text{peak max}}$ . Zároveň hodnota minimálního zkratového proudu by měla dosáhnout  $I''_{k\min} \geq 2 \cdot I_p$ . Tyto požadavky implikují nutnost dostatečného zkratového výkonu sítě. V elektrárnách s točivými stroji tato podmínka bývá většinou splněna. Naopak u fotovoltaických elektráren nebo sítí s rozptýlenou výrobou to může znamenat značný problém.

Podmínka nastavení nadproudové ochrany bude

$$I_{L\text{peak max}} > I_p > I_{L\text{max}} \quad (9.43)$$

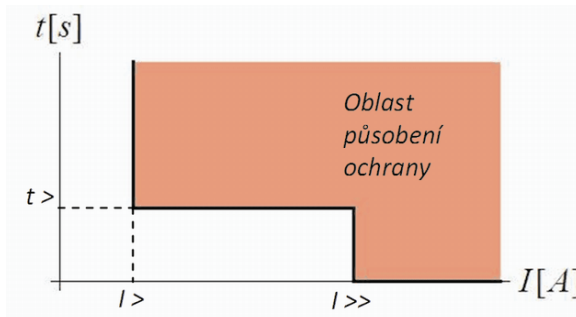
kde

$I_{L\text{max}}$  ..... maximální ustálená hodnota proudu zátěže

$I_p$  ..... hodnota nastavení pro  $I >$

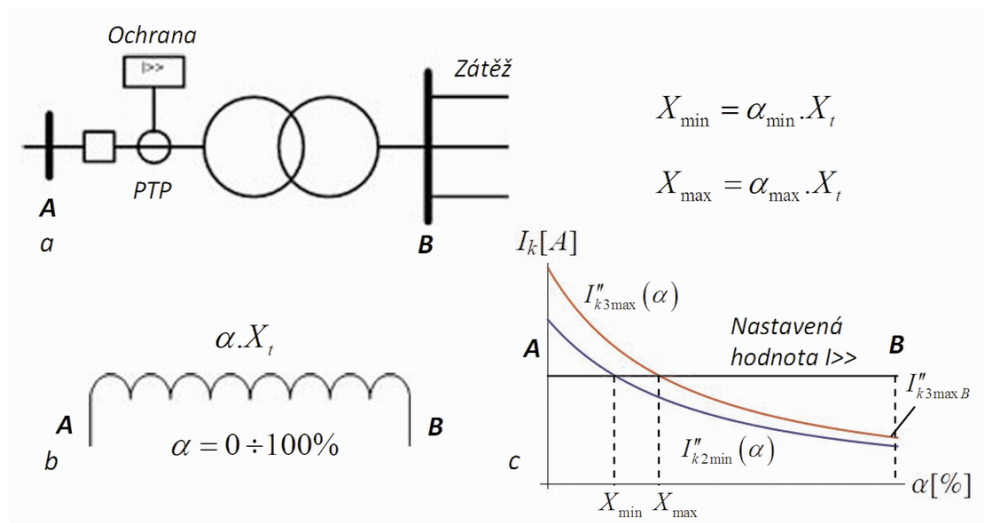
Přitom musí platit, že časové odstupňování musí být takové, aby ochrana nezareagovala na dočasnou hodnotu  $I_{L\text{peak max}}$ . Doporučená hodnota je  $I_p \geq 1,2 \div 1,4 \cdot I_{L\text{max}}$ .

Kombinaci dvou časově nezávislých charakteristik nadproudové ochrany ilustruje obr. 9.13. V případě, že se poruchový proud nalézá v rozmezí  $I >$  a  $I >>$ , ochrana vybaví v pevně nastaveném čase  $t >$ . Je-li proud větší než  $I >>$ , ochrana vybaví bez prodlevy (mžiková ochrana).



**Obr. 9.13: Nadproudová ochrana s dvěma nezávislými časovými charakteristikami**

Časově nezávislých charakteristik (obr. 9.12b) se téměř výlučně používá u ochran před zkratovými proudy a většinou je nutné je kombinovat s časově závislou charakteristikou. Následující příklad z obr. 9.14 toto dokresluje.



**Obr. 9.14: Problém selektivity chránění pro nadproudovou ochranu s jednostupňovou časově nezávislou charakteristikou: (a) schéma obvodu, (b) reaktance transformátoru, (c) poruchové proudy a rozsah chránění**

Transformátor je chráněn nadproudovou ochranou s časově nezávislou charakteristikou. Na sekundární straně jsou vývody chráněny pojistkami nebo jističi (tedy prvky s časově závislou charakteristikou). Aby bylo dosaženo selektivity a ochrana nevybavila při poruše za sekundární stranou transformátoru (za bodem B), musí pro nastavenou hodnotu proudu platit:

$$I_p \geq I''_{k3B\max} \quad (9.44)$$

kde  $I''_{k3B\max}$  je výpočtem určená maximální hodnota (v tomto případě trojpólového) zkratového proudu v místě B. Minimální zkratový proud (v tomto případě dvojpólový)  $I''_{k2\min}$  a maximální zkratový proud  $I''_{k3\max}$  v závislosti na pozici vinutí (A – začátek vinutí, B – konec vinutí) je vidět z obr. 9.14c. Z obrázku je patrné, že je dodržena selektivita, ale část vinutí není chráněna vůbec. To je možné vyřešit časovým odstupňováním – buď využitím časově nezávislé charakteristiky s prodlevou, nebo časově závislé charakteristiky. Použití časově závislé charakteristiky v tomto případě poskytuje lepší možnost ochrany před tepelnými účinky zkratových proudů a efektivněji se koordinuje s (časově závislými) charakteristikami ochranných prvků na vývodech.

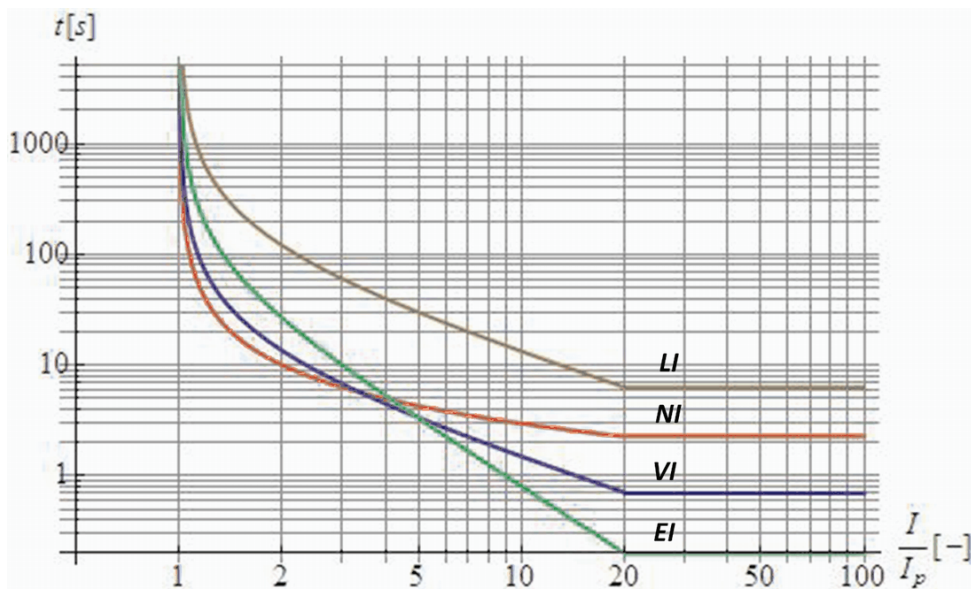
Časově závislá charakteristika nadproudové ochrany je znázorněna na obr. 9.12a. Ochrana vybaví v čase  $t$ , který odpovídá hodnotě proudu  $I$ . V moderních digitálních ochránách se využívá několik normalizovaných průběhů (viz. tab. 9.20).



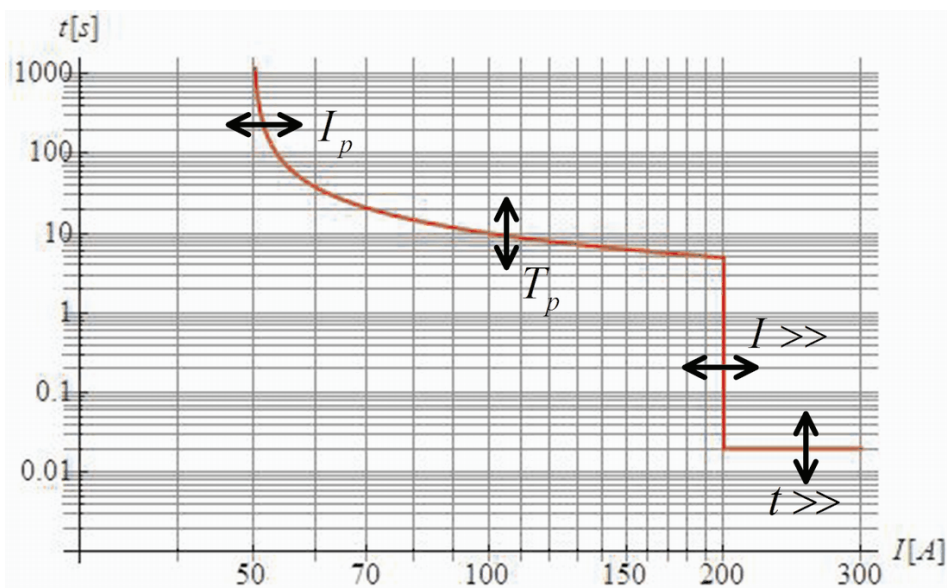
| Průběh dle IEC    |    | vzorec                                                             |
|-------------------|----|--------------------------------------------------------------------|
| Normal Inverse    | NI | $t = \frac{0,14}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^{0,02} - 1} \cdot T_p$ |
| Very Inverse      | VI | $t = \frac{13,5}{\left(\frac{I}{I_p}\right) - 1} \cdot T_p$        |
| Extremely Inverse | EI | $t = \frac{80}{\left(\frac{I}{I_p}\right)^2 - 1} \cdot T_p$        |
| Long Time Inverse | LI | $t = \frac{120}{\left(\frac{I}{I_p}\right) - 1} \cdot T_p$         |

**Tab. 9.20: Normalizované časově závislé charakteristiky podle IEC**

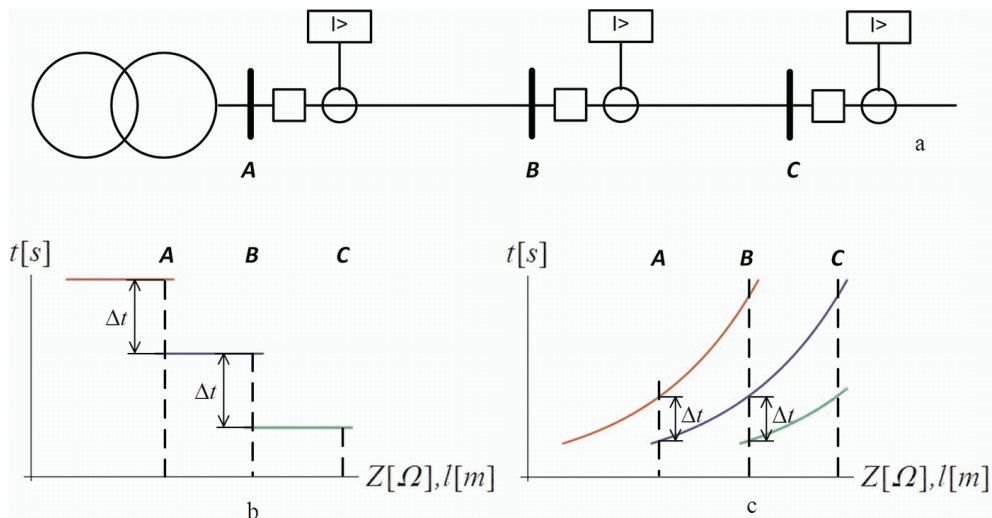
Pro nastavení ochrany je tak rozhodující proud  $I_p$  a čas  $T_p$ . Vliv parametrů na nastavování pro jednotlivé typy charakteristik ukazuje obr. 9.16.



**Obr. 9.15: Průběhy normalizovaných časově závislých charakteristik podle IEC**



**Obr. 9.16: Nastavování ochrany s časově závislou charakteristikou pro nadproudy a časově nezávislou charakteristikou pro zkraty**



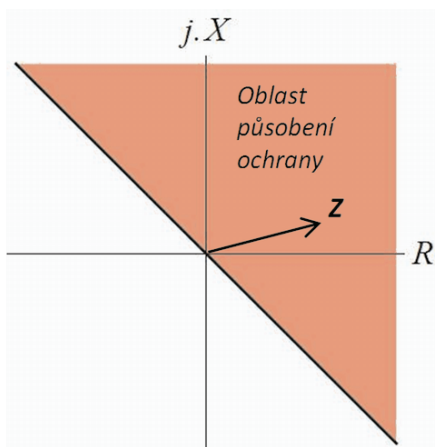
**Obr. 9.17: Selektivita nadproudových ochrany s časově nezávislou (9.17b) a časově závislou (9.17c) charakteristikou**

Výhodu použití ochrany s časově závislou charakteristikou ilustruje obr 9.17. Na schématu je zobrazeno chránění radiálního systému složeného z několika úseků. Pro dodržení selektivity v jednotlivých chráněných úsecích jsou nejprve využity nadproudové ochrany časově nezávislé. Selektivitu je možné docílit časovým odstupňováním o  $\Delta t$ . V dnešních aplikacích běžně postačí, je-li  $\Delta t$  alespoň 100 ms.

To ale znamená, že zkrat je vypínán v každém úseku vždy v odlišném čase (např. v případě poruchy v prvním úseku dochází k vypnutí vždy o  $2 \cdot \Delta t$  tedy o 200 ms později než v posledním úseku). Použijeme-li ochrany časově závislé, pak selektivitu dosáhneme oddálením jednotlivých charakteristik v místech B a C o  $\Delta t$  tedy 100 ms. Vezmeme-li v úvahu, že směrem od místa A celková impedance roste a zkratové proudy klesají, je zkrat vypnut ve všech třech úsecích s podobnou rychlostí. Tím se oproti předchozímu případu snižují možné negativní účinky zkratového proudu v prvních úsecích. Nevýhodou tohoto uspořádání je naopak delší reakce nadřazených ochran v případě selhání základní ochrany.

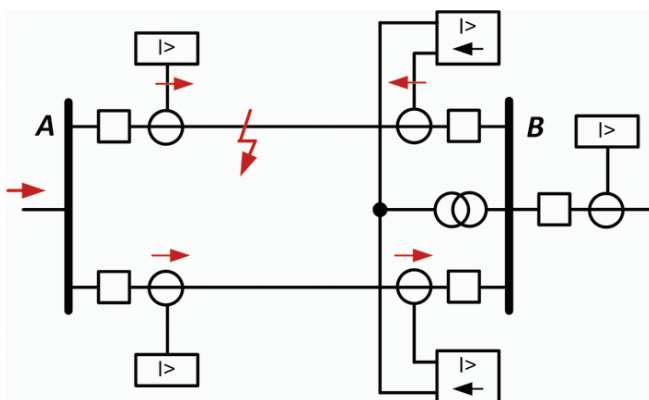
### Směrová nadproudová ochrana

V aplikacích, které se liší od radiálního konceptu elektrické sítě, je pro nadproudové chránění nezbytná také informace o směru toku poruchového proudu. Zatímco u radiálně provozované sítě teče vždy proud od zdroje k místu poruchy jedinou cestou a je zbytečné mít informaci o jeho směru, je v ostatních konfiguracích sítí tato informace nutná, aby nedošlo k chybnému zapůsobení a odpojení nepostižené části sítě. Charakteristika  $t = f(I)$  směrové nadproudové ochrany je identická jako u nesměrové nadproudové ochrany. Rozdíl je v tom, že působí pouze v předvolené fázové polorovině. Pro měření fázoru proudu je tak nezbytný jak napěťový, tak proudový vstup (tedy přístrojový transformátor napětí i proudu).



**Obr. 9.18: Oblast působení směrové nadproudové ochrany**

Typickým příkladem pro využití směrové nadproudové ochrany je chránění paralelního vedení (obr. 9.19). Skládá se ze dvou směrových nadproudových ochran s okamžitou (mžikovou) reakcí a dvou nesměrových nadproudových ochran časově odstupňovaných. Směrové nadproudové ochrany reagují pouze na část zkratového proudu, který se vrací z místa B do místa zkratu a naopak ignorují jeho cestu z místa A do místa B.

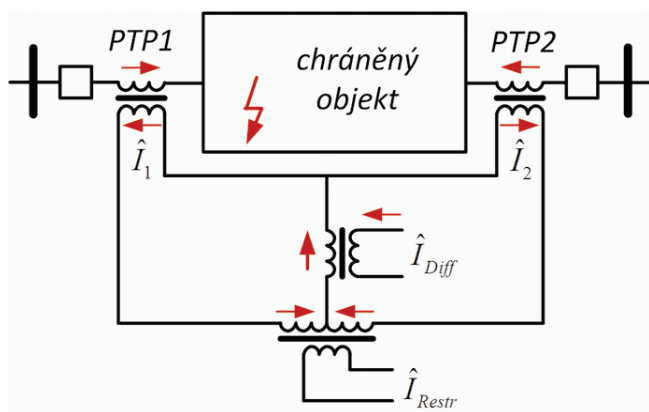


**Obr. 9.19: Příklad využití směrové nadproudové ochrany**

Vzhledem k měnícímu se konceptu sítí ze sítí pasivních radiálně uspořádaných na sítě s rozptýlenou výrobou elektrické energie je směrová nadproudová ochrana stále častěji využívána.

### Rozdílová ochrana

Rozdílová ochrana je založena na předpokladu, že chráněným objektem procházejí provozní proudy, jejichž součet na všech vývodech a přívodech je za normálního stavu nulový. Je-li jejich součet nenulový, znamená to existenci nového svodu, kterým uniká poruchový *rozdílový proud*. V takovém případě se v chráněném objektu nachází *vnitřní porucha* a ochrana vybaví. Základní schéma funkce rozdílové ochrany ilustruje obr. 9.20.



**Obr. 9.20: Principiální schéma funkce rozdílové ochrany**

Rozdílová ochrana tedy měří rozdílový proud, jehož hodnota je rozhodující pro její *mžikové vybavení*. Rozdílový proud pro NV vývodů trojfázového systému lze vyjádřit vztahem:

$$I_{\text{Diff}} = \left| \sum_{i=1}^{NV} \hat{I}_i \right| \quad (9.45)$$

kde

$\hat{I}_i$  ..... součtový fázor proudu i-tého vývodu

Prakticky je však ve stavu bez poruchy vždy přítomna malá hodnota unikajícího proudu a v ochraně je jeho hodnota navíc zatížena chybou měření. Proto je potřeba určit necitlivost, která bude záviset na

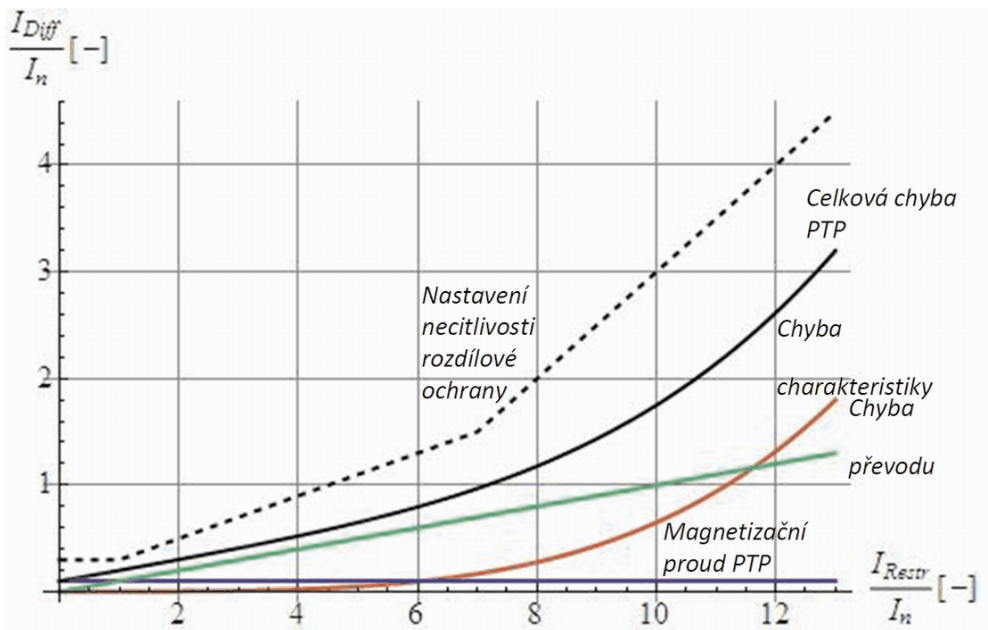
- chybě měření přístrojového transformátoru (garantovaná chyba měření, magnetizační proud)
- nestejnosti poměru převodů přístrojových transformátorů na primární a sekundární straně a základního převodu silového transformátoru (je-li chráněným objektem silový transformátor)
- neadaptovatelnosti převodů přístrojových transformátorů na převod silového transformátoru s odbočkami (je-li chráněným objektem silový transformátor s odbočkami)

Z výše uvedeného vyplývá, že část chyb bude nezávislá na provozním stavu objektu, a část bude úměrná průchozímu (provoznímu) proudu. Provozní proud se v ochraně nahrazuje s ohledem na způsob měření součtovým (omezujícím) proudem:

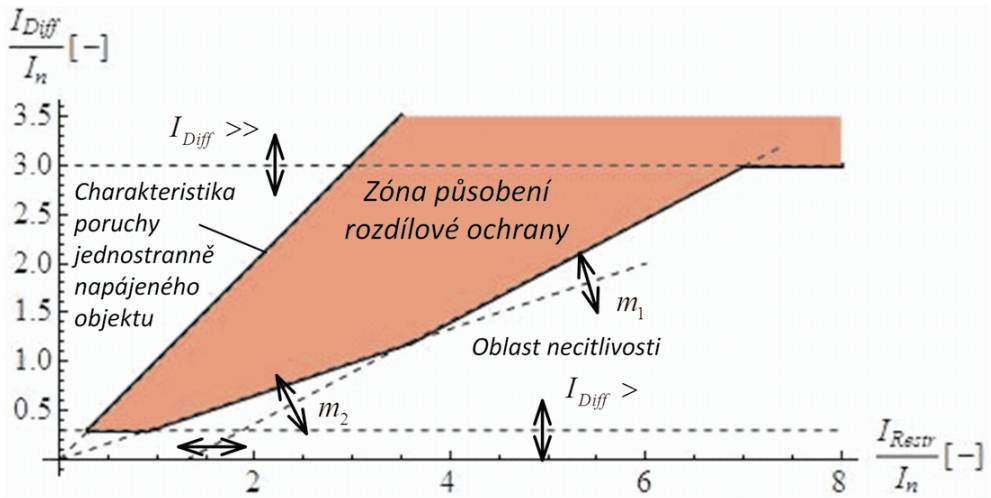
$$I_{\text{Restr}} = \sum_{i=1}^{NV} \left| \hat{I}_i \right| \quad (9.46)$$

Charakteristika rozdílové ochrany bude funkcí  $I_{\text{Diff}}(I_{\text{Restr}})$ . Požadavky na tvar charakteristiky ilustruje *obr. 9.21*.

Výsledná charakteristika používaná v moderních digitálních ochranách je zobrazena na *obr. 9.22*. Udává se v poměrných hodnotách, kde jsou jednotlivé proudy vztahované k jmenovité hodnotě  $I_N$  chráněného zařízení. V charakteristice se nejprve nastavuje základní necitlivost  $I_{\text{Diff}} >$ . U transformátorů se pohybuje okolo  $0,2 \cdot I_N$ , u kabelů 2,5 násobek nabíjecího proudu kabelu.



Obr. 9.21: Vliv chyb měření na nastavení necitlivosti rozdílové ochrany



Obr. 9.22: Nastavení a oblast působení rozdílové ochrany

Sklon přímky respektující proporcionální vlivy chyb se nastavuje pomocí parametru  $m_1$  (který je vždy menší než 1, běžně se pohybuje od 0,25 do 0,8). Parametr  $m$  se nastavuje se od nejnižší hodnoty a zvyšuje se, má-li proporcionální charakter chyb větší sklon. Sklon přímky respektující nelineární vlivy chyb (např. syčení) se nastavuje, je-li zapotřebí, pomocí parametru  $m_2$ . Bude-li chráněný objekt

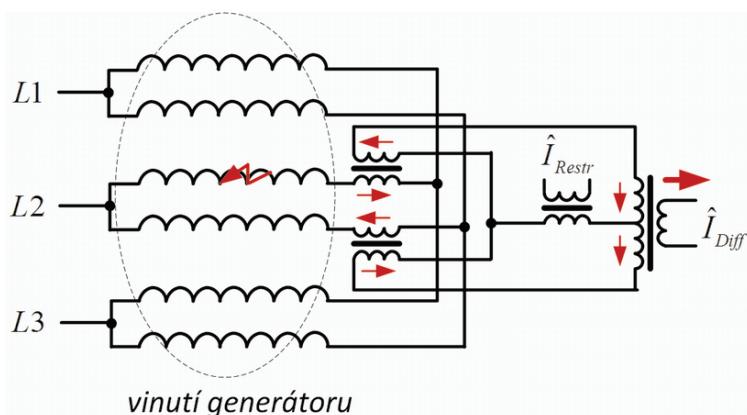
jednostranně napájený a dojde k vnitřní poruše, bude platit  $I_{Diff} = I_{Restr}$ , což odpovídá přímce se sklonem  $m = 1$ . V ostatních případech vnitřních poruch bude vždy absolutní hodnota součtu fázorů  $I_{Diff}$  vždy menší než součet absolutních hodnot  $I_{Restr}$  a  $m < 1$ . Proto se do charakteristiky doplňuje přímka znázorňující stavy vnitřních poruch s jednostranným napájením. Bývá možné též nastavit proud nejvyšší možné necitlivosti  $I_{Diff} \gg$ .

U rozdílového chránění transformátorů se rozdílová ochrana doplňuje filtračním členem na 2. (příp. 5.) harmonickou, aby nedošlo při zapnutí vlivem spínacího přechodného děje k chybnému zapůsobení ochrany.

### Závitová ochrana

Mezizávitový zkrat je zkrat mezi závitý jednoho vinutí nebo zkrat mezi dvěma vinutími téže fáze. U generátorů s jedním vinutím na fázi představuje mezizávitový zkrat relativně malé riziko a proto se v těchto případech závitová ochrana nepoužívá. U generátorů s paralelními vinutími na fázi je již riziko opodstatněné a použití závitové ochrany vyžaduje norma. Principů této ochrany je několik.

Má-li generátor vyvedeny dva statorové uzly (pro jedny i druhé paralelní větve), je možné tuto ochranu řešit pomocí kritéria napětí mezi oběma uzly (59N(IT)). Další možností je speciální rozdílová ochrana využívající toho, že při mezizávitovém zkratu cirkulují mezi vinutími téže fáze proudy. Protože PTP jsou umístěny u uzlu statorového vinutí, protékají jimi při poruše u nezatíženého generátoru (nejčastější) proudy opačného směru. Naopak, v bezporuchovém stavu buď neprotékají proudy žádné a nebo stejně veliké a stejně orientované. Výsledkem je schéma na obr. 9.23.



**Obr. 9.23: Příklad řešení závitové ochrany**

Nejsou-li vyvedeny oba uzly, lze použít rozdílová ochrana s prvním PTP na uzlovém vývodu k vinutí statoru a druhým PTP s dvojnásobným převodem na konci vinutí jedné větve.

## Distanční ochrana

Distanční ochrany nacházejí největší uplatnění pro chránění vedení, ale své využití mají i při chránění elektrárenských bloků jako záložní ochrana. Princip funkce distanční ochrany spočívá ve sledování impedance sítě (tzv. viděné impedance) z daného místa v síti. Vysoká hodnota této impedance znamená, že v chráněném úseku není porucha (tj. pracuje v mezích svého provozního zatížení). Naopak nízká hodnota této impedance znamená poruchový stav.

Hlavní výhodou distanční ochrany v porovnání s časově odstupňovanými nadproudovými ochranami je velmi rychlé vybavení pro poruchy a to zejména v první zóně ochrany, která chrání 80 ÷ 90 % délky vedení, vinutí transformátoru či statorového vinutí generátoru.

Při nastavování *první zóny distanční ochrany*, která vybavuje bez časové prodlevy, je třeba vzít v úvahu následující chyby:

- chyba při přechodných dějích (cca 5 %)
- chyba PTP (1 % pro 5P a 3 % pro 10P podle IEC 60255-6)
- nepřesnost určení impedance vedení (je-li pouze vypočtena a nikoli změřena)
- bezpečnostní koeficient (cca 5 %)

Celková nejistota se pak může pohybovat v rozmezí 15 ÷ 20 %. Z tohoto důvodu není možné chránit distanční ochranou v první zóně 100 % délky vedení nebo vinutí, ale pouze 80 ÷ 85 % a v případech, kdy je impedance přesně změřena, maximálně 90 %. Pokud by došlo ke kovovému (ideálnímu) zkratu v této chráněné oblasti, pohybovala by se naměřená impedance v impedanční rovině na úsečce svírající s osou  $R$  úhel  $\varphi$ . Tento úhel se proto nazývá úhel linky, který můžeme vyjádřit jako

$$\varphi = \arctg \frac{X_1}{R_1} \quad (9.47)$$

kde  $X_1$  je podélná reaktance a  $R_1$  je podélná rezistance linky nebo vinutí.

Budeme-li uvažovat navíc obloukový zkrat s odporem  $R_{obl}$  např. podle empirického vzorce

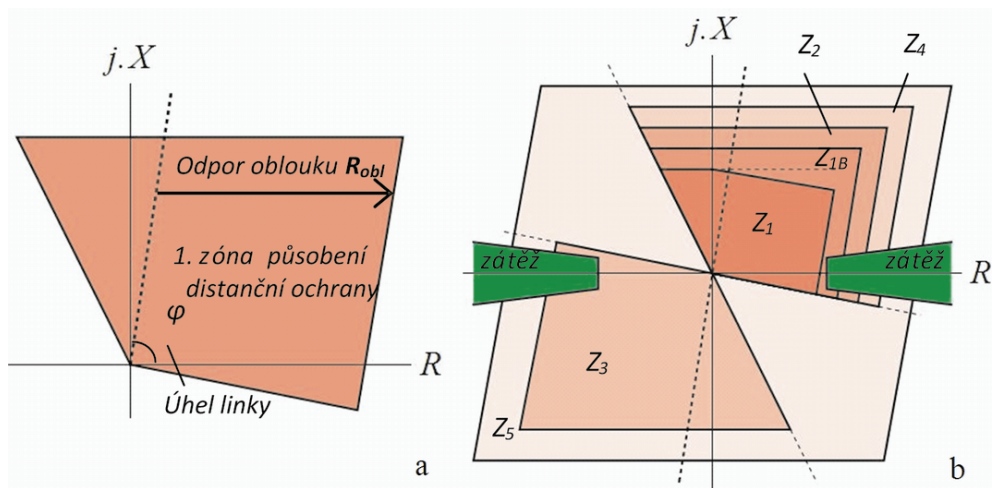
$$R_{obl} = 2,5 \cdot \frac{I_{obl}}{I_{kmin}''} \quad (9.48)$$

kde  $l_{obl}$  je délka oblouku v mm, posune se tato úsečka ve směru osy  $R$  o hodnotu  $R_{obl}$ . Jelikož se u zkratu žádná další odporová složka nepředpokládá, bude vše ve směru osy  $X$  nad touto úsečkou potenciálně spadat do první zóny. Zbývá určit omezení shora, které je dáno přímkou rovnoběžnou s osou  $R$  protína-



jící horní bod úsečky, a zdola, které tvoří přímky odpovídající úhlu impedance zátěže (v kladné i záporném směru toku výkonu) s příslušným navýšením.

Vyšší zóny *distanční ochrany* se nastavují s obdobnými principy, ochrana však vybavuje se zpožděním a má záložní funkci. Možné nastavení jednotlivých zón ukazuje obr. 9.24.



**Obr. 9.24: Tvar 1. zóny distanční ochrany (9.24a), charakteristiky pětizónové distanční ochrany se dvěma zónami do opačného směru a blokadou pro impedance zátěže (9.24b)**

Díky nemožnosti chránit 100 % vinutí statoru tak distanční ochrana umístěná v elektrárenském bloku plní funkci pouze záložní ochrany pro generátor, ale v druhé a dalších zónách zároveň zálohuje linkové distanční ochrany. Naopak linkové distanční ochrany ve svých vyšších zónách zálohují ochrany bloku.

Závěrem je třeba zdůraznit, že je zde zmíněn jen základní popis funkce a nastavování distančních ochrany. V reálných aplikacích velmi ovlivňuje distanční chránění používání T-odboček nebo souběhy vedení. Moderní digitální ochrany umí tyto negativní vlivy částečně kompenzovat. Více detailů je popsáno v kapitole 10.

### Ochrana proti tepelnému přetížení

Tento typ ochrany je typický pro generátory, velké motory v systému vlastní spotřeby elektrárny, ale i pro kabely. Tepelné účinky nadproudu u většiny chráněných zařízení omezuje nadproudová ochrana s časově závislou charakteristikou, která se vzrůstajícím nadproudem zkracuje dobu do vybavení. Je možné se proto domnívat, že výsledné oteplení zařízení se na základě údajů od výrobce pohybuje v přípustných hodnotách, nebo je chráněno ještě jiným dodatečným způsobem. Pro velká zařízení, jejichž poškození vlivem nadproudu by znamenalo velké ekonomické ztráty, se instaluje ochrana přepočítávající proudové zatížení v čase na jejich teplotu, která je kritériem chránění. Základem ochrany je tzv. tepelný model zařízení, což odpovídá diferenciální rovnici

$$\tau_{th} \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = \left( \frac{I}{k \cdot I_n} \right)^2 \quad (9.49)$$

kde

$\tau_{th}$  ..... oteplovací časová konstanta

$k \cdot I_n$  ..... maximální trvalý proud přetížení

$\theta$  ..... vztažná hodnota oteplení vztažená k oteplení při trvalém zatížení proudem  $k \cdot I_n$ .

$$\theta = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta\vartheta_{\infty kI_n}} \quad (9.50)$$

kde

$\Delta\vartheta$  ..... oteplení (°C)

$\Delta\vartheta_{\infty kI_n}$  .. taková hodnota oteplení, kterou stroj dosáhne při trvalém zatížení proudem  $k \cdot I_n$ . Dosáhne-li oteplení hodnotu 100 %, ochrana vybaví.

Ochrana proti tepelnému přetížení disponuje ještě dalšími funkcemi omezujícími opakovaný rozběh motoru. Rozlišují se teplé starty (většinou po 5 ÷ 6 minutách, max. 2 starty) a studené starty. Tyto funkce však často dubluje řídicí systém v elektrárně.

### Ochrana proti zpětnému výkonu (zpětná wattová)

Tento typ ochrany chrání generátory velkých elektrárenských bloků před přechodem z generátorického do motorického režimu. V tomto režimu synchronní generátor odebírá ze sítě činný výkon a roztáčí celé turbosoustrojí. Tento stav bezprostředně ohrožuje lopatky na turbíně a je nutné generátor okamžitě odpojit ze sítě. Rozhodujícím parametrem pro vybavení je poměr zpětného výkonu ku jmenovitému výkonu generátoru  $P_{rev} / S_n$ .

Motorický režim má různé negativní důsledky pro různé typy zdrojů. V parní turbíně se motorický režim projevuje zmenšením průtoku páry a oteplováním lopatek, které může vést k jejich poškození. U vodních turbín může soustrojí zůstat pod vodou i v případě uzavření přívodu. Tlakové poměry na lopatkách mohou pak způsobit poškození turbíny vlivem kavitace. U dieselových generátorů hrozí při motorickém režimu riziko výbuchu díky jistému množství nespáleného paliva. Z výše uvedeného vyplývá, že hodnota, při které ochrana vybaví je závislá na typu zdroje. Typické hodnoty uvádí *tab. 9.21*.

|                      |                 |
|----------------------|-----------------|
| soustrojí            | $P_{rev} / S_n$ |
| parní turbíny        | 1 ÷ 3 %         |
| plynové turbíny      | 3 %             |
| dieselové generátory | > 5 %           |

**Tab. 9.21: Poměrná hodnota zpětného výkonu doporučená pro vybavení ochrany**

### Podpěťová ochrana

Samotná podpěťová ochrana bývá téměř výlučně používána u velkých asynchronních motorů a generátorů (např. v přečerpacích elektrárnách) a slouží k zamezení nestabilního chování stroje vlivem sníženého napětí.

### Nadproudová ochrana blokována podpětím

Podpěťová ochrana se však často využívá v kombinaci s nadproudovou ochranou u generátorů nižších výkonů (řádově desítky MW). Základním problémem nadproudového chránění generátoru je odlišení poruchového proudu a proudu při přetížení. Zatímco při přetížení (může např. vzniknout jako reakce regulátoru napětí na vzdálenou poruchu v síti) je napětí na svorkách blízké jmenovité hodnotě, při poruše (zkratu) dochází k růstu synchronní impedance (chová se jako „vnitřní“ impedance zdroje) a postupnému poklesu proudu z 4 ÷ 6 násobku  $I_n$  až pod jmenovitou hodnotu (typicky 0,6 ÷ 0,7  $I_n$ ). Zároveň prudce klesá napětí na svorkách. Tento děj se odehrává v řádu několika sekund (regulátor buzení tuto dobu navíc ještě zkracuje). Samotná nadproudová ochrana by tedy nedokázala od sebe odlišit normální stav, přetížení a poruchový stav (zkrat). Blokování nadproudové ochrany podpěťovou ochranou toto umožňuje. Pro nastavování se využívají dva principy – *napětím spouštěná* a *napětím odstupňovaná* nadproudová ochrana. U napětím spouštěné ochrany dojde k působení nadproudové ochrany při podkročení nastavené hodnoty podpětí (typicky 0,8  $U_n$ ). U napětím odstupňované je doba reakce nadproudové ochrany úměrná hodnotě dosaženého podpětí.

### Nadpěťová ochrana

Tato ochrana chrání zařízení (generátor nebo transformátor) před negativními účinky zvýšeného napětí na izolaci. Vyhodnocují se jak fázová, tak sdružená napětí. Charakteristika ochrany bývá přitom dvoustupňová s nastavenými limity  $U >$  a  $U \gg$  pro její pomalé a rychlé vybavení. Typické hodnoty nastavení pro generátory uvádí *tab. 9.22*.

| parametr | hodnota               | zpoždění               |
|----------|-----------------------|------------------------|
| $U >$    | $110 \div 115 \% U_n$ | $1,5 \div 5 \text{ s}$ |
| $U >>$   | $130 \% U_n$          | $0,5 \text{ s}$        |

**Tab. 9.22: Typické hodnoty nastavení nadpěťové ochrany**

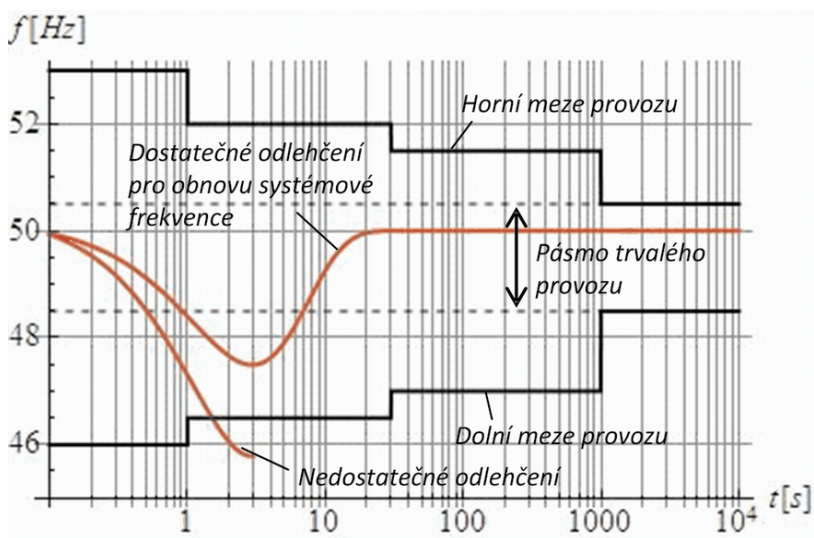
### Podfrekvenční a nadfrekvenční ochrana

Soustrojí generátor-turbína je navrhováno pro trvalý provoz v režimu síťové frekvence. Provoz se sníženou hodnotou frekvence má za následek zejména:

- zvýšené vibrace turbosoustrojí, a s tím související snížení životnosti (až zničení) lopatek turbíny
- snížení výkonu elektromotorů na vlastní spotřebě
- snížení chlazení

Negativní důsledky má také provoz se zvýšenou hodnotou frekvence. Pro provoz soustrojí turbína – generátor je proto výrobcem předepsané omezení maximální doby provozu v několika nadfrekvenčních a podfrekvenčních pásmech, které se nalézají mimo rozmezí pro stálý provoz (např.  $48,5 \div 50,5 \text{ Hz}$ ). Při vybočení kmitočtu z tohoto rozmezí musí urychleně dispečer samostatně využít plného rozsahu regulace výkonu k účasti na navrácení kmitočtu do uvedeného rozmezí. Pro řešení lokálních poruch je vybudována soustava frekvenčních odlehčování (odhazování zátěže). Nelze však vyloučit přechodný stav, kdy může kmitočet krátkodobě výrazně poklesnout. V případě správné funkce systému frekvenčního odlehčování vzápětí opět vzroste na hodnotu, která se nalézá v rozmezí pro stálý provoz.

Nastavení tohoto typu ochrany je několikastupňové s časovou prodlevou (např.  $f <$ ,  $f <<$ ,  $f >$  a  $f >>$ ) a odvozuje se od omezení daných výrobcem. Základním požadavkem je umožnit dočasný pokles frekvence při frekvenčním odlehčování, aniž by došlo k nepřipustným stavům z hlediska provozu. Provozní omezení spočívají kromě pásma trvalého provozu i v dalších frekvenčních pásmech, ve kterých se může turbosoustrojí provozovat jen po určitou dobu. Ochrana se nastavuje tak, aby pokud možno tato pásma pokryla.



Obr. 9.25: Meze provozu turbosoustrojí. Příklad průběhu s dostatečným a nedostatečným frekvenčním odlehčením

### Ochrana $df/dt$

Tento typ ochrany se využívá jako doplněk k frekvenční ochraně. Ochrana vybaví, jsou-li současně splněny podmínky překročení odchylky od jmenovité frekvence (typicky se nastavuje 0,1 Hz) a zároveň je trend změny frekvence takový, že automatika frekvenčního odlehčování není schopna dostatečně rychle zareagovat (řádově Hz/s). Výhodou této ochrany je rychlejší odstavení bloku než při frekvenčním kritériu.

### Ochrana proti ztrátě buzení

Ke ztrátě buzení synchronního alternátoru může dojít v případě výpadku napájení či poškození budiče či zkratu na budicím vinutí. Ztráta buzení bez ohledu na příčinu představuje riziko poškození generátoru. V případě výpadku buzení proud budicího vinutí klesá exponenciálně k nule s časovou konstantou vinutí. Úměrně tomu klesá i vnitřní elektromotorické napětí stroje a elektromagnetická vazba mezi rotorem a statorem. Na svorkách generátoru se to projevuje postupným snižováním jalového výkonu až k *mezi podbuzení*, kde je elektromagnetická vazba natolik slabá, že dojde ke ztrátě synchronismu. Generátor pak přechází do asynchronního chodu. Nebezpečí pro soustrojí představují v takovém stavu zejména:

- přetížení statoru vlivem značného odběru jalového výkonu ze sítě (0,4 až  $1,9 S_n$ )
- oteplení rotorového vinutí vlivem indukovaných proudů
- značné rázy činného výkonu a elektrického momentu, který přechod do asynchronního režimu doprovázejí

Samotná ochrana pracuje na principu dvouzónové distanční ochrany. Obecně jsou zóny této ochrany popsány v impedanční rovině jako kružnice s poloměrem

$$R = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_s} \right) \quad (9.51)$$

a středem v bodě

$$C = -j \cdot \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_s} \right) \quad (9.52)$$

kde

$x_d$  ..... podélná synchronní reaktance stroje

$x_s$  ..... vnější reaktance sítě

První zóna (s kratším časem) se nastavuje s ohledem na maximální přetížení vlivem odběru jalového výkonu v asynchronním chodu, je-li odebíráný jalový výkon  $Q_g \geq S_n$  a proto  $x_d = 1$  p.u. Doba vybavení se nastavuje s ohledem na přetížení statoru (špičkové hodnoty proudu mohou dosahovat až  $2,5 \cdot I_n$ ) a rotoru a řádově dosahuje desetiny až jednotky sekund.

Druhá zóna se nastavuje s ohledem na překročení meze podbuzení v oblasti statické stability (příp. povolené oteplení čelních konstrukcí stroje) a proto se volí skutečná hodnota  $x_d$ . Doba vybavení se pohybuje v časech 10 s až 1 min.

### Ochrana proti zpětnému proudu

Zpětná složka statorového proudu  $I_2$  (vzniká např. při rozpojení jedné fáze) vyvolává v rotorovém vinutí proudy o dvojnásobné frekvenci než je síťová frekvence. Tyto proudy způsobují oteplení rotorového vinutí a mohou vést k jeho poškození. Maximální doba, po kterou je možné stroj provozovat je dána vztahem:

$$t_{\max} = \frac{K}{\left( \frac{I_2}{I_n} \right)^2} \quad (9.53)$$

kde  $K$  je konstanta daného alternátoru, kterou uvádí výrobce. Běžná hodnota  $K$  pro starší alternátory bez chlazení rotorového vinutí je  $30 \div 40$  u velkých moderních strojů  $K = 5 \div 10$ . Generátor (a částečně i stroje vlastní spotřeby) jsou ale samy o sobě zdrojem zpětné složky napětí. To vyvolává určitý podíl zpětné složky proudu i za běžného provozu, při kterém ochrana nesmí vybavit. Výrobce generá-

toru navíc uvádí maximální trvalou hodnotu  $I_{2dov}$  pro daný stroj (pohybuje se okolo  $10 \% I_n$ ). Ochrana se tedy nastavuje jako nadproudová, časově závislá s charakteristikou  $t_{max} = f(I_2)$  s max. trvalou hodnotou  $I_{2dov}$ .

### Zemní ochrana statoru

Poškození izolace vinutí bývá hlavní příčinou většiny závažných poruch u alternátorů. V mnoha případech začíná zemním spojením nebo jako mezizávítový zkrat, který postupně v zemní spojení přechází. Zemní ochrana je proto velmi důležitým prvkem v souboru ochran bloku. Nula statorového vinutí alternátoru může být obecně uzemněna následujícími způsoby:

- 1) generátor má uzemněný střed
  - a) generátor má nulu statoru spojenou se zemí přes vysokou impedanci (proudy zemního spojení do 10 A)
  - b) generátor má nulu statoru spojenou se zemí přes nízkou impedanci (proudy zemního spojení od 50 do 600 A)
  - c) generátor má nulu statoru spojenou přímo se zemí
- 2) generátor nemá uzemněný střed a pracuje do izolované soustavy bez uzemněného středu
- 3) generátor nemá uzemněný střed a pracuje do izolované soustavy s nízkaimpedančním uzemněním uzlu (proudy zemního spojení od 50 do 600 A)

Výše uvedené případy 1b, 1c, 2 a 3 platí pro malé stroje, uplatňující se spíše jako záložní zdroje nebo zdroje distribuované výroby elektrické energie. U velkých elektrárenských bloků se téměř výhradně využívá způsob zapojení typu 1a.

U generátorů s vysokoimpedančním uzemněním středu se využívá měření napětí nebo proudů na impedanci (odpor, tlumivka) spojující střed statorového vinutí se zemí. Dojde-li k zemnímu spojení na vývodu z generátoru, bude na impedanci napětí:

$$U_{0max} = \frac{U_{gn}}{\sqrt{3}} \cdot \left( \frac{U_{PTNsek}}{U_{PTNprim}} \right) \quad (9.54)$$

kde

$U_{gn}$  ..... jmenovité napětí generátoru

$U_{PTNprim}$  jmenovité napětí primární strany přístrojového transformátoru napětí (PTN)

$U_{PTNsek}$  jmenovité napětí sekundární strany PTN

Hodnota proudu zemního spojení však bude proporcionálně klesat s místem jeho vzniku, postupujeme-li po statorovém vinutí od vývodu směrem ke středu (uzlu), kde bude jeho hodnota nulová. Z výše uvedeného vyplývá, že není možné chránit oblasti statorového vinutí, které jsou blízko středu, protože teoreticky vypočítaná hodnota napětí je menší než chyba měření PTN. Prakticky to znamená, že tímto typem ochrany je možné chránit 90 ÷ 95 % statorového vinutí.

Ke kompletnímu chránění statorového vinutí se dnes využívá tzv. 100 % zemní statorová ochrana. Různí výrobci ochrany využívají pro 100 % detekci zemního spojení odlišné principy. Jedním takovým je injekce subharmonických napětí do uzlu generátoru (např. 15 Hz) a vyhodnocování proudů stejné frekvence. Při zemním spojení dochází totiž k poklesu kapacity části vinutí a tím i změně impedance. Jiný princip je založen na rozložení třetí harmonické napětí na statorovém vinutí.

Je-li blok vybaven generátorovým vypínačem, připadá v úvahu ještě zemní spojení na přípojnících vn (mezi generátorovým vypínačem a blokovým transformátorem). Toto zemní spojení se detekuje pomocí PTN umístěného za generátorovým vypínačem a narozdíl od zemního spojení statorového vinutí není důvodem k vypnutí bloku.

### Zemní ochrana rotoru

Zemní spojení obvodu rotorového vinutí se projevuje obdobně jako u statoru snížením kapacity proti zemi. Díky pohybu stroje se však kapacita neustále mění a dochází k rušení, které je třeba eliminovat. Pro vyhodnocení se využívá buď měření s přiloženým zdrojem napětí o systémové frekvenci, které dokáže odhalit odporové zemní spojení v řádu kΩ. Pro větší generátory se využívá přesnější metoda injektáže obdélníkového napětí (1 ÷ 3 Hz) a následná analýza náběžných a sestupných hran signálu.

### Ochrana proti přebuzení

Ochrana proti přebuzení se používá u elektrických strojů s magnetickým obvodem, tj. transformátorů i generátorů a vybavuje, pokud dojde k nedovolenému sycení v železe. Magnetický tok se vypočítá jako

$$\Psi = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot N} \approx \frac{U}{f} \quad (9.55)$$

Podíl napětí a frekvence se přitom používá jako kritérium chránění. Negativní důsledky přebuzení jsou zejména tepelné účinky na magnetický obvod. Problém s přesycováním se objevil až s optimalizací výroby velkých elektrických strojů.

Charakteristika této ochrany je kombinace časově závislé (obsahuje tepelný model stroje) a časově nezávislé (max. podíl  $U/f$  se nejčastěji pohybuje od 120 do 140 %). Pro nastavení je také důležitý maximální trvalý podíl  $U/f$  v magnetickém obvodu, který se spočítá ze jmenovité frekvence a nejvyšší hodnoty maximálního provozovacího napětí (např. u generátorů 105 %, u transformátorů 110 %). Charakteristika musí být taková, aby ochrana falešně nezapůsobila při dovolených provozních stavech. Proto musí být její minimum větší než  $(U/f)_{\max} +$



chyba PTN + chyba ochrany (měření  $U, f$ ) + bezpečnostní pásmo, čemuž odpovídá cca dodatečných 10 %. Charakteristika ochrany odpovídá tepelnému modelu jádra a má tvar:

$$t = t_0 + \frac{K}{\left(\frac{(U/f)}{(U/f)_{\text{ochr}}}\right)^2 - 1} \quad (9.56)$$

kde  $t_0$  a  $K$  jsou konstanty zpoždění a

$$(U/f)_{\text{ochr}} = (U/f)_{\text{max}} + \varepsilon_{\text{PTN}} + \varepsilon_{U,f} + \varepsilon_{\Delta} \quad (9.57)$$

$U$  moderních strojů se tato ochrana používá v kombinaci s omezovačem  $U/f$ , který působí na budicí systém v předstihu oproti vypínací charakteristice ochrany.

### Ochrana proti ztrátě stability (synchronismu)

V normálních provozních podmínkách mají točivá pole synchronních alternátorů stejnou frekvenci jako má elektrizační soustava, přičemž magnetické póly rotoru jsou fixovány na točivá pole statoru elektromagnetickou vazbou. Tato vazba má elastický charakter, takže při malých skocích systémových veličin umožňuje kmitání úhlu mezi rotorem a točivým polem (*zátěžný úhel*). Je-li vazba příliš slabá nebo změny v soustavě příliš velké, úhel rotoru vůči točivému poli statoru se nevrátí zpět do své původní polohy, ale dojde k prokluzu tohoto úhlu o  $360^\circ$ . Dále vlivem setrvačnosti následují další prokluzu. Rotor se potom dále pohybuje se skluzem vůči statorovému poli. Tento jev se nazývá ztráta stability (synchronismu).

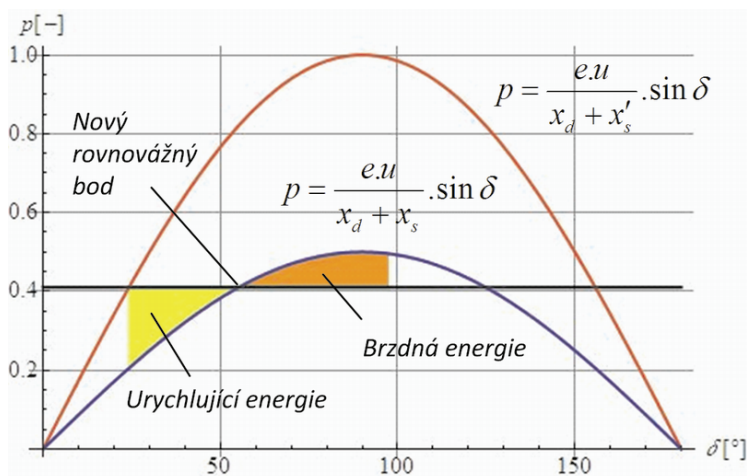
Zaměřme se nyní na dynamické chování zátěžného úhlu  $\delta$  při poruše. Statická charakteristika elektrického výkonu generátoru na zátěžném úhlu je

$$p = \frac{e \cdot u}{x_d + x_s} \cdot \sin \delta \quad (9.58)$$

kde  $x_d$  je podélná synchronní reaktance stroje a  $x_s$  vnější reaktance soustavy podle schématu na *obr 9.27*. Jestliže dojde v soustavě k poruše, při které se např. odpojí jedno ze dvou paralelních vedení k elektrárně, vzroste reaktance soustavy na hodnotu  $x'_s$ . Statická charakteristika popisující tento nový stav bude:

$$p = \frac{e \cdot u}{x_d + x'_s} \cdot \sin \delta \quad (9.59)$$

Turbína však před touto poruchou dodávala mechanický výkon  $p_m$ , který je dodáván i bezprostředně po poruše. V nové charakteristice je ale rovnováha dosažena pro jinou hodnotu úhlu  $\delta$ . Dochází tak k dynamickému ději, při kterém je rotor nejprve urychlován (mechanický výkon je větší než elektrický) a po té brzděn (elektrický výkon je větší než mechanický). Jestliže bude brzdná energie ke zpomalení rotoru větší než energie urychlení, rotor začne kývat kolem nového rovnovážného bodu. Pokud ne, dojde ke ztrátě stability. Brzdným a urychlovacím energiím odpovídají plochy na obr. 9.26 (tato úvaha je využívána v tzv. *metodě ploch*). Mezi této tzv. *dynamické stability* je kritický úhel  $\delta_k$ , přičemž vždy musí platit  $\delta_k \leq 180^\circ$ .



**Obr. 9.26: Dynamická stabilita, metoda ploch**

Princip funkce této ochrany je založen na monitorování kyvů a zjišťování, zda byl dosažen s jistotou kritický úhel. Protože jde o pomalejší dynamický děj (v řádu sekund), ochrana přesněji počítá s přechodnými veličinami generátoru

$$p' = \frac{e' \cdot u}{x'_d + x'_s} \cdot \sin \delta \quad (9.60)$$

kde  $x'_d$  je podélná přechodná reaktance stroje a  $e'$  přechodné vnitřní elektromotorické napětí stroje. Ze schématu na obr. 9.27 vyplývá, zanedbáme-li odporovou složku, že statorový proud bude

$$\hat{i} = \frac{e' \cdot \exp(j\delta) - u}{j \cdot (x'_d + x'_s)} \quad (9.61)$$

a napětí na satoru

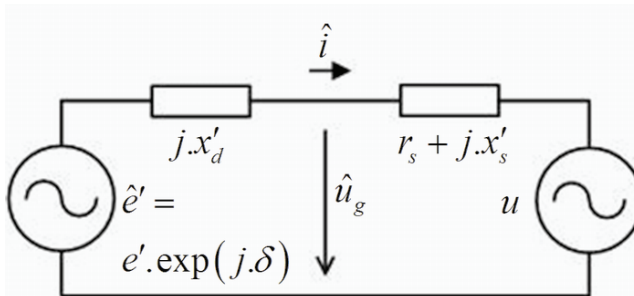
$$\hat{u}_g = e' \cdot \exp(j\delta) - j \cdot x'_d \cdot \hat{i} = e' \cdot \exp(j\delta) - x'_d \cdot \frac{e' \cdot \exp(j\delta) - u}{(x'_d + x'_s)} \quad (9.62)$$

označíme-li si poměr  $n$  jako

$$n = \frac{e'}{u} \quad (9.63)$$

bude změřená (viděná) impedance na satoru

$$\hat{z}_g = \frac{\hat{u}_g}{\hat{i}} = j(x'_d + x'_s) \cdot n \cdot \frac{(n - \cos \delta) - j \cdot \sin \delta}{(n - \cos \delta)^2 + \sin^2 \delta} - j \cdot x'_d \quad (9.64)$$

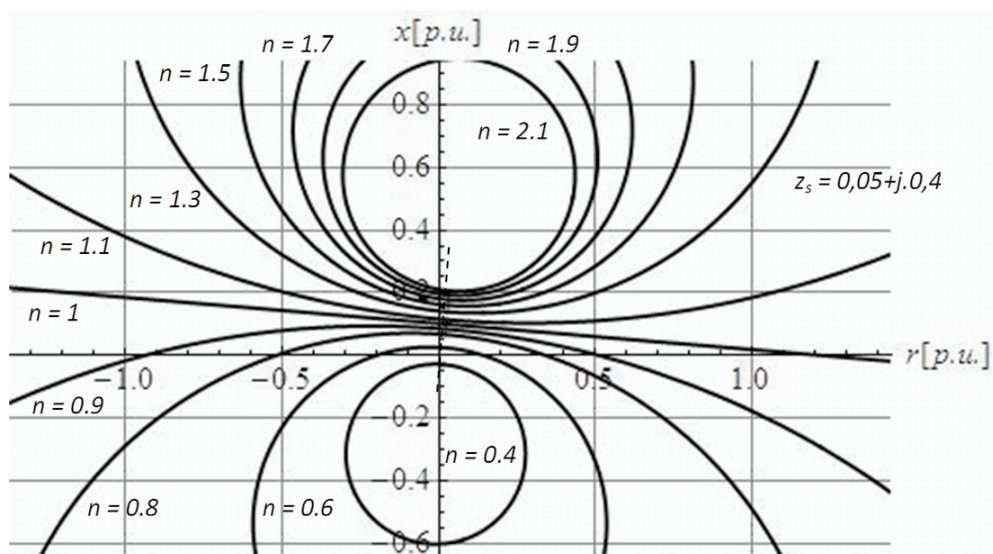


**Obr. 9.27: Náhradní obvod pro vyjádření kyvů generátoru v impedanční rovině**

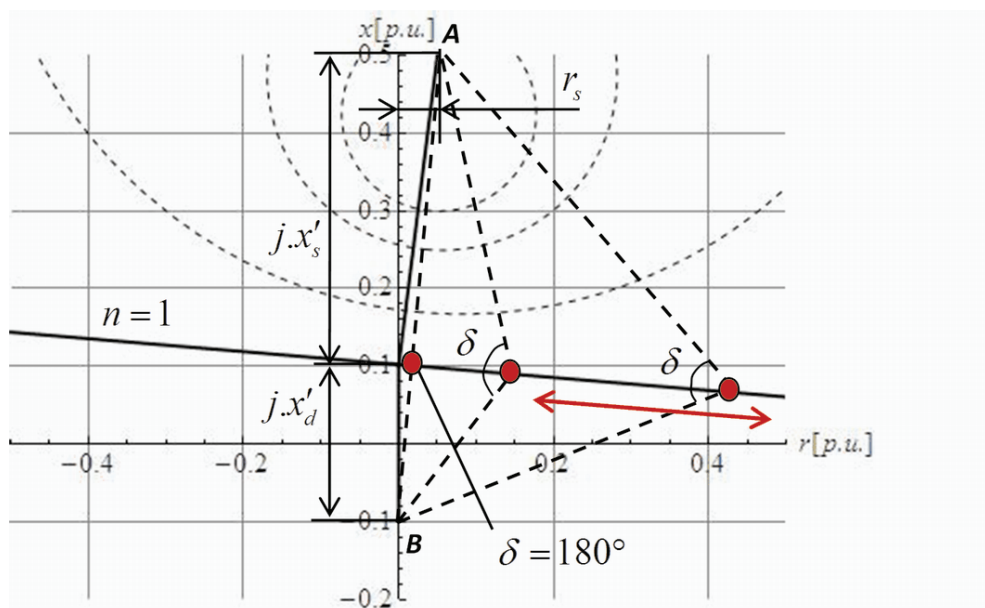
V impedanční rovině se tyto impedance jako funkce s parametrem  $\delta$  pro různá  $n$  zobrazí jako soustava kružnic podle *obr. 9.28*. Podle *obr. 9.29* průsečík těchto kružnic s přímkou danou body A-B představuje oblast s úhly  $\delta = 180^\circ$ . Jestliže změřený kvv protne tuto přímku, je evidentní, že musí nutně dojít k výpadku ze synchronismu.

Prakticky ale může dojít k výpadku ze synchronismu již při mnohem menších úhlech než  $180^\circ$ . Pokud nejsou k dispozici podrobné variantní výpočty dynamické stability, předpokládá se, že mezní úhel dynamické stability je  $120^\circ$ . Tomu odpovídá i charakteristika ochrany, která je zobrazena na *obr. 9.30a*.

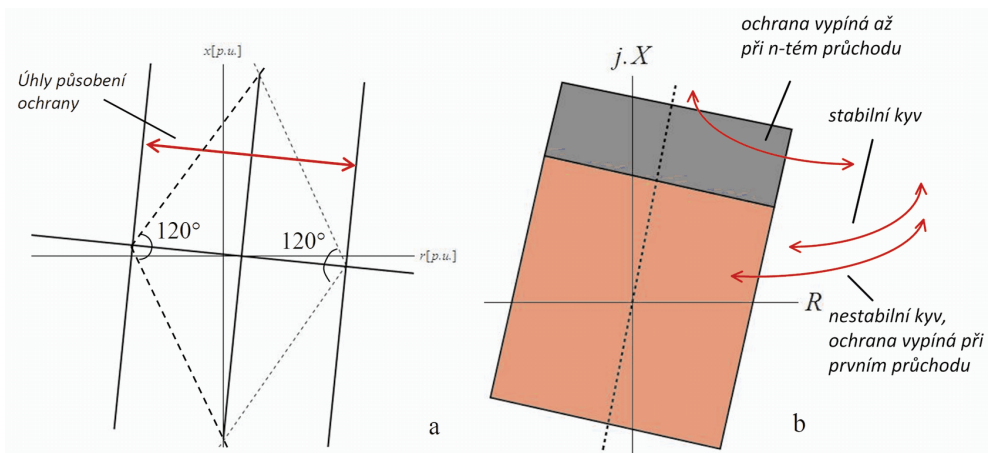
Ochrana může být rozdělena do několika zón, jak je vidět z *obr. 9.30b*. Ochrana je vybavena počítadlem vstupů a výstupů vektoru impedance do jednotlivých zón. Ochrana zapůsobí, pokud je dosažen jejich nastavený počet.



Obr. 9.28: Zobrazení křivek kyvů generátoru v impedanční rovině pro různá  $n$



Obr. 9.29: Zobrazení kyvů generátoru v impedanční rovině pro  $n = 1$



Obr. 9.30: Princip nastavení ochrany

### 9.3.5. Koncepce chránění elektrárenského bloku

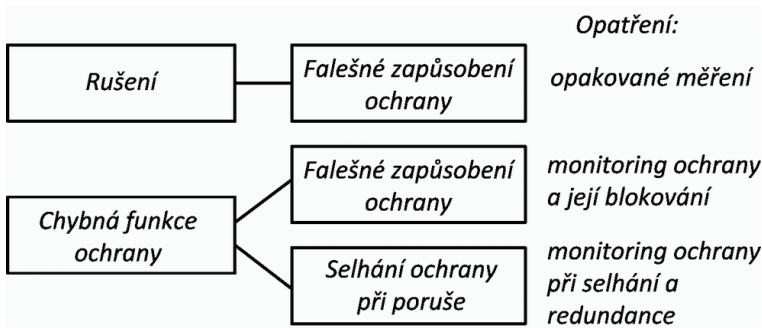
Existuje mnoho variant zapojení pro vyvedení výkonu (ať již jde o způsob uzemnění uzlu generátoru, vazbu na nadřazenou síť, napájení vlastní spotřeby, napájení obvodu buzení atd.) a nelze tak proto zcela univerzálně popsat skladbu ochranných funkcí a rozsahy zón chráněných objektů ani umístění a počet měřících zařízení (PTN, PTP, senzory). Dalším aspektem je technicko-ekonomické vyhodnocení ceny chránění vůči ceně zařízení a ztrát z nevýroby. Při tvorbě konceptu chránění však existují zásady, ze kterých je možno schéma chránění odvodit.

Pro sestavení koncepce chránění je třeba si ujasnit následující:

- koncepce redundance
- koncepce vypínání
- skladba ochranných funkcí

#### Koncepce redundance

O celkové spolehlivosti chránění rozhoduje jak pravděpodobnost správného zapůsobení ochrany při poruše tak současně pravděpodobnost, že ochrana falešně nezapůsobí v bezporuchovém stavu. Tyto pravděpodobnosti lze zvyšovat u moderních digitálních ochran pomocí opatření na obr. 9.31. Důležitým opatřením pro zvýšení spolehlivosti správného zapůsobení je tzv. *redundance*. Redundance („nadbytečnost“) je znásobování (v praxi zdvojení) ochran daného zařízení.



**Obr. 9.31: Faktory ovlivňující spolehlivost ochran**

Úplná redundance přitom znamená, že při výpadku jednoho systému ochran jsou všechny ochranné funkce tohoto systému plně zálohovány druhým rovnocenným systémem. Druhý systém přitom nemusí nutně být identická kopie prvního v případě, že je možné chránit zařízení pomocí dvou různých ochranných principů (např. ochrany impedanční - rozdílová). Zároveň nelze zdvojit některé ochrany využívající externí zdroje napětí nebo proudu (např. 100 % statorová ochrana je zálohována 90 % statorovou ochranou). Pro dosažení úplné redundance je nutné též nezávislé měření (různá jádra PTN a PTP), působení na nezávislé vypínací cívky a nezávislý zdroj napájení pro ochrany. Koncept úplné redundance je typický zejména pro bloky velkých výkonů.

Protože úplná redundance může být značně nákladná, volí se u bloků menších a středních výkonů částečná redundance. Znamená to, že blok je stále chráněn záložním systémem (ne vždy v rovnocenné kvalitě, ale vždy tak, aby byl schopen provozu) a obvody měření a napájení nemusí být zdvojeny. U nejmenších bloků se koncept redundance vypouští.

### Koncepce vypínání

Zvláštností chránění elektrárenského bloku je, že popud k vypnutí vypínače závisí na druhu poruchy. Jedna multifunkční ochrana tak může ovládat celou skupinu vypínačů (např. generátorový, vývod blokového transformátoru, přívod VS z odbočkového transformátoru apod.) a ke každé své ochranné funkci může přiřadit část vypínačů z této skupiny, která se má vypnout. Tomuto přiřazení říkáme *vypínací matice*.

### Skladba ochranných funkcí

Skladba ochranných funkcí determinuje kvalitu chránění a odvíjí se od ekonomického zhodnocení ceny ochran oproti ztrátám při poruše. S rostoucím jmenovitým výkonem rostou také požadavky na kvalitu chránění, z čehož vychází norma ČSN 33 3051, která specifikuje minimální požadavky, které jsou uvedeny v *tab. 8.23 až 8.25*. Pro ochranné funkce se užívá též normalizované označení pomocí ANSI/IEEE kódu, které je v tabulkách rovněž uvedeno.

| Druh ochrany                          | ANSI    | Výkon S (MVA)   |                 |                  |                   |                 |                 |
|---------------------------------------|---------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|-----------------|
|                                       |         | < 1             | 1 ÷ 5           | 5 ÷ 10           | 10 ÷ 50           | 50 ÷ 200        | > 200           |
| Nadproudová zkratová časově nezávislá | 50/51   | ● <sup>1)</sup> | ● <sup>1)</sup> | ● <sup>1)</sup>  | ● <sup>2)3)</sup> | ● <sup>2)</sup> | ● <sup>2)</sup> |
| Zkratová podimpedanční                | 21      |                 |                 |                  | ● <sup>3)</sup>   | ●               | ●               |
| Přetížení statoru                     | 49      | ○               | ●               | ●                | ●                 | ●               | ●               |
| Rozdílová                             | 87G     |                 | ●               | ●                | ●                 | ●               | ●               |
| Nadpětová <sup>4)</sup>               | 59      | ○               | ●               | ●                | ●                 | ●               | ●               |
| Zemní statoru                         | 59N     |                 |                 | ●                | ●                 | ● <sup>5)</sup> | ● <sup>5)</sup> |
| 100 % zemní statoru                   | 64G     |                 |                 |                  |                   | ●               | ●               |
| Zemní rotoru                          | 64R     |                 | ●               | ●                | ●                 | ●               | ●               |
| Závitová <sup>6)</sup>                | 59N(IT) |                 |                 |                  | ○                 | ○               | ●               |
| Zpětná wattová <sup>7)</sup>          | 32      |                 | ●               | ●                | ●                 | ●               | ● <sup>8)</sup> |
| Nesouměrné zatížení                   | 46      |                 |                 |                  | ●                 | ●               | ●               |
| Při ztrátě buzení <sup>9)</sup>       | 40      |                 |                 |                  |                   | ●               | ●               |
| Při podbuzení                         | 40      |                 |                 |                  |                   | ●               | ●               |
| Přetížení rotoru                      | 49R     |                 |                 |                  |                   | ○               | ●               |
| Ložisková <sup>10)</sup>              |         |                 |                 |                  |                   |                 | ●               |
| Prokluz rotoru                        | 40      |                 |                 |                  |                   |                 | ● <sup>3)</sup> |
| Proti ztrátě stability                | 78      |                 |                 |                  |                   |                 | ● <sup>3)</sup> |
| Podkmitočtová                         | 81      |                 |                 | ○ <sup>11)</sup> | ○ <sup>11)</sup>  | ○               | ●               |
| Nadkmitočtová                         | 81      |                 |                 |                  |                   |                 | ●               |
| Při přesycení <sup>10)</sup>          | 24      |                 |                 |                  |                   | ○               | ○               |
| Proti asynchronnímu chodu ES          |         |                 |                 |                  |                   |                 | ○               |
| Pokles napětí a kmitočtu ES           |         |                 |                 |                  |                   | ○               | ○               |

**Tab. 9.23: Doporučená chránění turboalternátorů**

- ..... použije se
- ..... doporučuje se
- 1) ..... ochrana může být s odblokováním při podpětí
- 2) ..... ochrana s odblokováním při podpětí
- 3) ..... podle provozních podmínek se použije jedna nebo druhá ochrana
- 4) ..... ochrana dvoustupňová nebo časově nezávislá
- 5) ..... ochrana musí chránit 100 % délky vinutí
- 6) ..... ochrana se použije, má-li vinutí statoru dvě paralelní větve
- 7) ..... ochrana se použije u protitlakých soustrojí, pracujících s protitlakem 0,8 MPa a vyšším, pokud součin výkonu (MW) a otáček (1/s) je 18 000 a vyšší; u kondenzačních a ostatních protitlakých soustrojí při jmenovitém výkonu 12 MW a vyšším, nebo je-li zpětná wattová ochrana předepsána výrobcem turbíny. Vždy musí být blokován vypínací impuls této ochrany ochranami turbíny.

- 8) ..... použijí se dvě ochrany
- 9) ..... pokud výrobce alternátoru dovoluje, aby pracoval alternátor krátkodobě v asynchronním chodu, doplní se ochrana automatikou, která sníží zatížení alternátoru na hodnotu povolenou při asynchronním chodu
- 10) ..... po dohodě s výrobcem stroje
- 11) ..... u dieselgenerátorů

| Druh ochrany                       | ANSI   | Výkon S (MVA)   |                 |                 |                 |                 |
|------------------------------------|--------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                                    |        | < 1,7           | 1,7 ÷ 5         | 5 ÷ 50          | 50 ÷ 200        | > 200           |
| Nadproudová zkratová <sup>1)</sup> | 50     | ●               | ●               | ●               | ●               | ●               |
| Plynová                            |        | ● <sup>2)</sup> | ● <sup>3)</sup> | ● <sup>3)</sup> | ● <sup>3)</sup> | ● <sup>3)</sup> |
| Rozdílová                          | 87T    | ○               | ●               | ●               | ●               | ●               |
| Zemní nádobová <sup>4)</sup>       | 51N    |                 |                 | ●               | ●               | ●               |
| Nadproudová na $I_0$ <sup>5)</sup> | 50/51N |                 |                 | ●               | ●               | ●               |
| Při přesycení                      | 24     |                 |                 |                 | ○               | ○               |
| Zemní strany vn <sup>6)</sup>      | 59N    |                 |                 | ○               | ○               | ●               |

**Tab. 9.24: Doporučená chránění blokových transformátorů**

- 1) ..... Použije se, pouze pokud je transformátor používán pro najíždění vlastní spotřeby ze soustavy vvn (zvn). V ostatních případech je transformátor chráněn nadproudovou nebo impedanční ochranou alternátoru.
- 2) ..... Pokud je transformátor plynovým relé vybaven (při jištění výkonovými pojistkami se doporučuje, aby byly vybaveny indikací působení; je-li v přívodu k transformátoru odpínač, má být po přetavení pojistky automaticky vypnut)
- 3) ..... Samostatným plynovým relé se vybavuje nádoba přepínače odboček u regulačních transformátorů
- 4) ..... Použije se u transformátorů s účinně uzemněným bodem
- 5) ..... Použije se u transformátorů s účinně uzemněným uzlem vinutí k blokování zemní ochrany statorového vinutí alternátoru při jednopólových zkratech na vvn (zvn) straně blokového transformátoru, kdy na vn straně může vzniknout napětí  $U_0$ . Toto relé, připojené na výstup PTP v účinně uzemněném nulovém bodě primárního vinutí transformátoru, může být též použito jako záložní ochrana při zkratech v soustavě vvn (zvn)
- 6) ..... Ochrana se použije, je-li mezi blokovým transformátorem a alternátorem instalován vypínač. Ochrana pouze indikuje případná zemní spojení v soustavě vn před zapnutím alternátoru



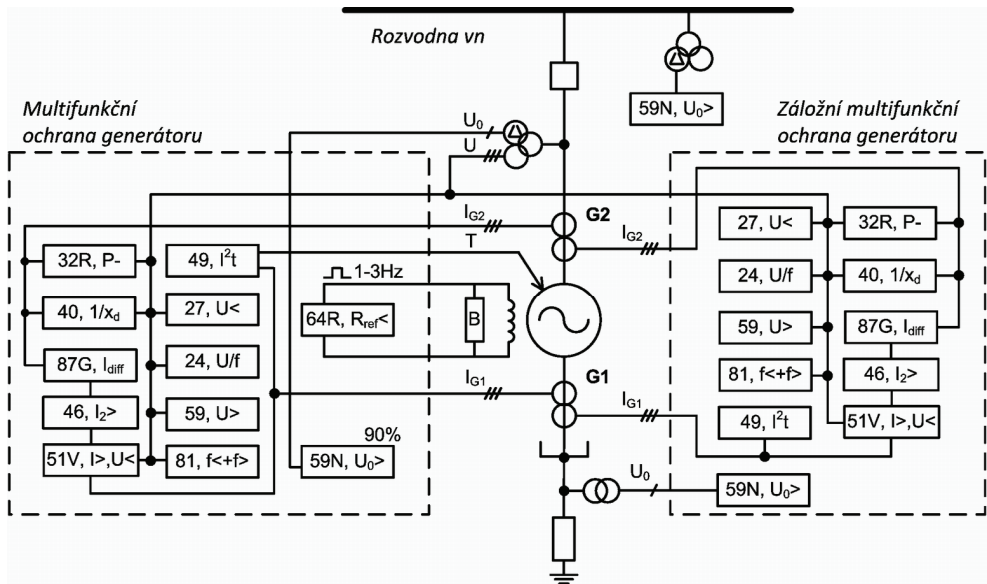
| Druh ochrany                    | ANSI  | Výkon S [MVA] |       |                 |
|---------------------------------|-------|---------------|-------|-----------------|
|                                 |       | < 1           | 1 ÷ 6 | > 6             |
| Nadproudová <sup>1)</sup>       | 50/51 | •             | •     | • <sup>2)</sup> |
| Plynová                         |       | •             | •     | •               |
| Rozdílová                       | 87T   |               | •     | •               |
| Impedanční                      | 21    |               |       | • <sup>2)</sup> |
| Nadproudová zkratová na vl. sp. | 50    | ○             | ○     | •               |

**Tab. 9.25: Doporučená chránění odbočkových transformátorů**

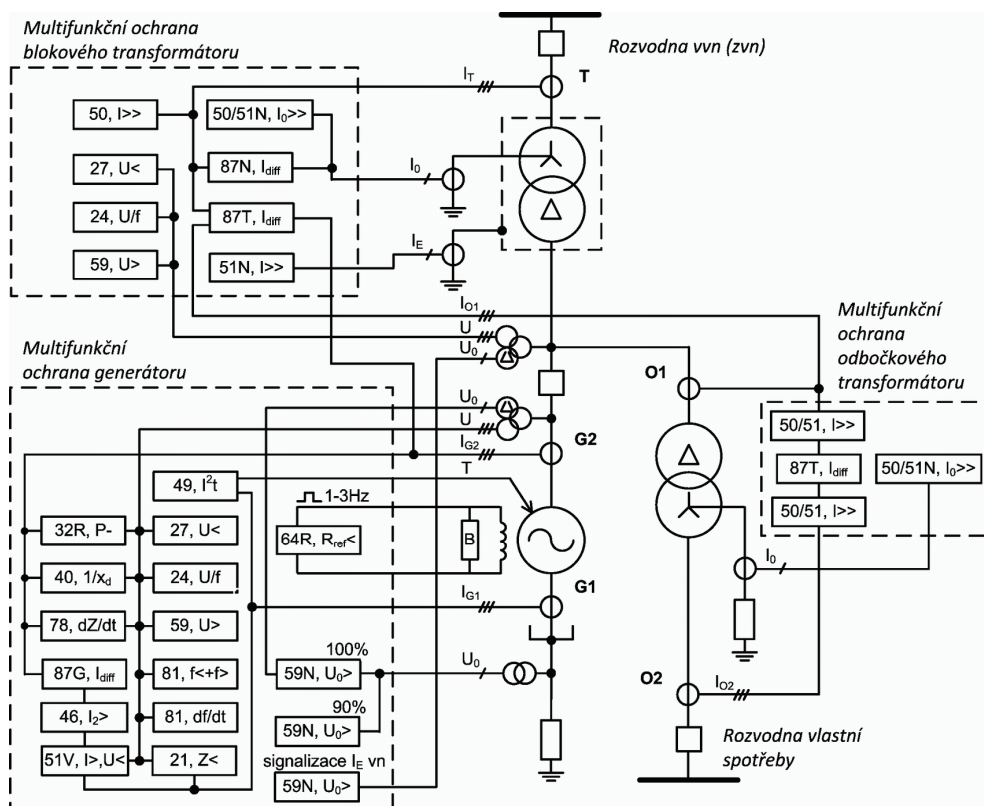
1) ..... Nadproudová ochrana proti přetížení se použije jako časově závislé nebo nezávislé relé. V elektrických stanicích bez obsluhy musí být zajištěno, aby byl transformátor při dlouhodobém přetížení odlehčen nebo vypnut buď automaticky, nebo obsluhou z dispečinku. Ochrana se použije, pokud není použita (kvalitativně vyšší) tepelná ochrana.

2) ..... Podle provozních podmínek se použije jedna nebo druhá ochrana

Na následujících obrázcích jsou uvedeny dva příklady chránění elektrárenského bloku. První příklad (*obr. 9.32*) je typický pro bloky menších výkonů vyvedených do rozvodny vn. Na obrázku je řešena i částečná redundance chránění boku. Druhý příklad (*obr. 9.33*) ukazuje chránění velkého bloku, kde pro dosažení úplné redundance se multifunkční ochrana generátoru zdvojuje, vybírají se dvojice stejných ochran založených na různých principech, zdvojuje se počet jader PTN i PTP.



**Obr. 9.32: Koncepte chránění malého bloku 10 MVA včetně částečně redundantního systému chránění**



Obr. 9.33: Koncepte chránění velkého bloku nad 200 MVA

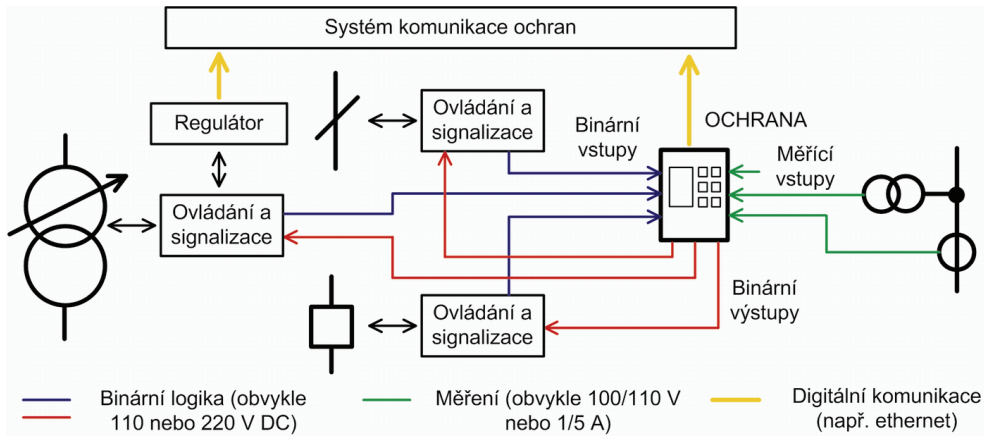
### 9.3.6. Komunikace ochran

Každá ochrana přijímá a vysílá na analogové úrovni signály, které jsou nezbytné pro její funkce. Jsou to:

- měřené veličiny (např. měření napětí a proudů)
- binární vstupy (např. pozice odbočky transformátoru)
- binární výstupy (např. povel k vypnutí vypínače)

V rozsáhlých systémech však vznikají požadavky na datovou výměnu mezi jednotlivými ochranami navzájem (dostatečně rychle), možnost ochrany centrálně spravovat, vazbu na nadřazený řídicí systém, centrální dispečink či veřejnou síť a ukládání naměřených dat, alarmů a poruchových stavů. U současných moderních digitálních ochran je tedy nutné myslet i na jejich komunikační schopnosti a komunikační prostředí. Pro splnění výše uvedených požadavků byly proto v nedávné době vyvinuty komunikační protokoly pro ochrany, které detailně specifikují strukturu a význam předávaných dat (aplikační vrstva systému komunikace). Naopak fyzická vrstva (nižší vrstvy systému komunikace) není nijak v těchto protokolech zvláště specifikována, což umožňuje využití obecně platných standardů (např. ethernet TCP/IP). Výsledkem je dnešní podoba moderních digitálních ochran (*Inte-*

ligent Electronic Device - IED) představující důležitý prostředek k dosažení efektivního řízení provozu.



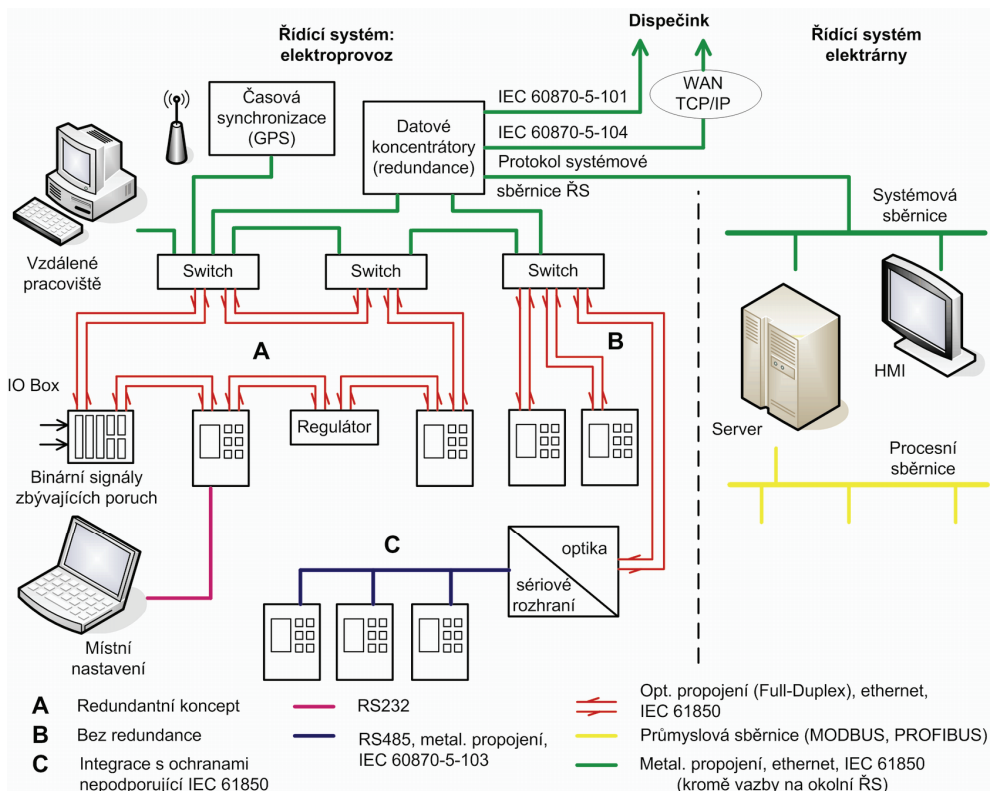
**Obr. 9.34: Měřené veličiny, binární vstupy a výstupy pro ochranu**

Komunikační infrastruktury s moderními digitálními ochranami plní zejména tyto funkce:

- místní přístup k ochraně a jejímu nastavení
- vzdálený přístup k ochraně (skupině ochran) a k archívu dat provozu
- integrace systému ochran do řídicího systému
- komunikace mezi dvěma ochranami (na horizontální úrovni)

Místní přístup k ochraně je z důvodu spolehlivosti většinou stále řešen sériovým rozhraním RS232 (které bylo v oblasti osobních počítačů nahrazeno rozhraním USB).

Vzdálený přístup k ochranám, archivace dat i vzájemná rychlá horizontální komunikace mezi ochranami navzájem vyžadují existenci komunikační sítě s dostatečnou přenosovou rychlostí. Příslušná komunikační infrastruktura je tak v současnosti nejběžněji řešena LAN sítí ethernet s přenosovými rychlostmi 100 Mbit/s a 1 Gbit/s. Komunikace mezi jednotlivými IED je realizována pomocí protokolu IEC 61850, který umožňuje vytvářet mnohem sofistikovanější datovou strukturu umožňující efektivní přenos měřených veličin, poruchových stavů a řídicích veličin pro silovou (primární) část energetického systému. Vertikální komunikace je řešena na principu master-slave: Pro časově kritické informace lze však využít protokol IEC 61850 k přenosu krátkých GOOSE zpráv na horizontální úrovni. Implementace tohoto protokolu do současných IED umožňuje přímé začlenění ochran různých výrobců do společné komunikační infrastruktury. Pro architekturu komunikační struktury ochran platí také princip redundance, přičemž nejpoužívanějším je cenově přijatelný koncept vnořených smyček HSR (High Availability Seamless Redundance, viz. obr. 9.35 A) naroždil od nákladnějšího konceptu PRP (Parallel Redundancy Protocol) zdvojnásobujícího celou síť.



**Obr. 9.35: Ukázka integrace moderní komunikační infrastruktury ochran do ŘS**

Značný počet měřících a ovládacích funkcí ochran lze s výhodou využít i pro operátorské stanice (Human-Machine Interface - HMI) umístěné v elektrárně nebo centrálním dispečinku. Současně je přenos některých informací z vnějších sítí naopak nežádoucí (např. nastavování ochran). Vzniká tak potřeba zajistit přístup ze systémové nebo procesní sběrnice ŘS do komunikační struktury ochran. U sítí LAN využívající protokol IEC 61850 se tak děje pomocí datových koncentrátů, které jsou zapojené do systémové sběrnice ŘS s průmyslovým ethernetem (např. Profinet, Modbus TCP) a umějí komunikovat příslušným protokolem. Pro komunikaci s dispečinkem elektrizační sítě mimo elektrárnu se využívají komunikační standardy pro dálkové ovládání řady IEC 60870-5. Komunikační infrastruktura ochran je tak začleněna do ŘS a sama se stává (velmi rychlou) procesní sběrní částí elektrického provozu (z HMI na velině mohou být vzdáleně přes ochrany ovládané silové prvky elektrického provozu).

Někdy je potřeba navíc rychlá komunikace mezi dvěma vzdálenými terminály ochran (typickým příkladem je srovnávací ochrana kabelu). V takovém případě se využívá spojení peer-to-peer prostřednictvím metalického (do 10 ÷ 15 km) nebo optického (do 100 km) kabelu v trase linky nebo silových kabelů.

## 9.4. Literatura

- [1] Reinert D.: Protective Relaying for Power Generation Systems, 2006, CRC Press, New York
- [2] Blackburn J.L.: Protective Relaying, Principles and Applications, 1998, Marcel Dekker New York - Basel
- [3] Ungrad H., Winkler W., Wisniewski A: Protection Techniques in Electrical Energy Systems, 1995, Marcel Dekker, New York - Basel
- [4] ČSN EN 60 909-0 (33 3022): Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách „ Část 0: Výpočet účinků, Český normalizační institut, Praha 2002
- [5] ČSN EN 60 865-1 (33 3040): Zkratové proudy – Výpočet účinků – Část 1: Definice a výpočetní metody, Český normalizační institut, Praha 1997
- [6] ČSN 33 3051: Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení, Federální úřad pro normalizaci a měření, Praha 1992
- [7] ČSN 33 3201: Elektrické instalace nad 1 kV AC, Český normalizační institut, Praha 2002
- [8] ČSN EN 60 034-1 (35 0000): Točivé elektrické stroje – Část 1: Jmenovité údaje a vlastnosti, Český normalizační institut, Praha 2005
- [9] ČSN EN 60 044-1 (35 1358): Přístrojové transformátory – Část 1: Transformátory proudu, Český normalizační institut, Praha 2001
- [10] ČSN EN 60 044-2 (35 1358): Přístrojové transformátory – Část 2: Induktivní transformátory napětí, Český normalizační institut, Praha 2001
- [11] ČSN EN 60 044-5 (35 1358): Přístrojové transformátory – Část 5: Kapacitní transformátory napětí, Český normalizační institut, Praha 2005
- [12] ČSN EN 60 044-6 (35 1358): Přístrojové transformátory – Část 6: Požadavky na jistíci transformátory proudu pro přechodné jevy, Český normalizační institut, Praha 2001
- [13] ČSN EN 60 076-5 Ed. 2 (35 1001): Výkonové transformátory – Část 5: Zkratová odolnost, Český normalizační institut, Praha 2007
- [14] PNE 33 0000-4: Příklady výpočtů uzemňovacích soustav v distribuční a přenosové soustavě dodavatele elektřiny, druhé vydání, 2001
- [15] Applications for SIPROTEC Protection Relays, 2005, Siemens Aktiengesellschaft, Nuremberg
- [16] SIPROTEC Numerical Protection Relays, 2008, Siemens Aktiengesellschaft, Nuremberg
- [17] Sjoval K: Instrument Transformers Application Guide, 2009, ABB AB High Voltage Products, Ludvíka

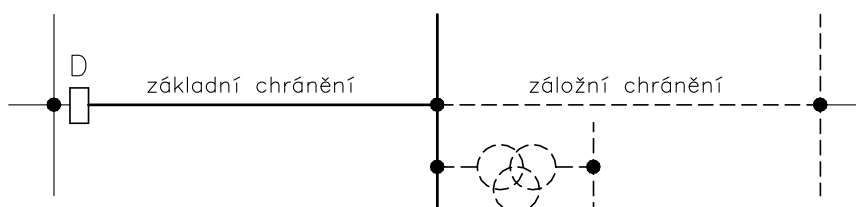
## 10. Distanční ochrany

Kapitola 9 podala základní přehled o principu a funkcích široké škály elektrických ochran. Tyto ochrany jsou obvykle instalovány v elektrických stanicích, rozvodnách vlastní spotřeby elektráren či přímo na jejich blocích. Klíčovým typem ochran zejména na přenosových vedeních jsou distanční ochrany, které byly přes jejich důležitost popsány jen stručně. Jejich bližšímu popisu, vysvětlení provozních specifik a aplikacím se věnuje tato kapitola.

### 10.1. Základní princip distančních ochran

Distanční ochrany jsou využívány k základnímu a záložnímu chránění elektrického vedení. Lze je využít na všech napěťových hladinách. Převážně se využívají k chránění elektrických vedení na zvláště vysokém napětí (zvn) a velmi vysokém napětí (vvv), na vysokém napětí (vn) se využívají zřídka.

Distanční ochrany se nevyžívají pouze k chránění venkovních či kabelových vedení, ale využívají se i k chránění transformátorů (síťové, distribuční, blokové) a generátorů. U těchto zařízení však plní distanční ochrany pouze funkci doplňkové nebo záložní ochrany. Hlavní ochranou bývá v těchto případech rozdílová ochrana.



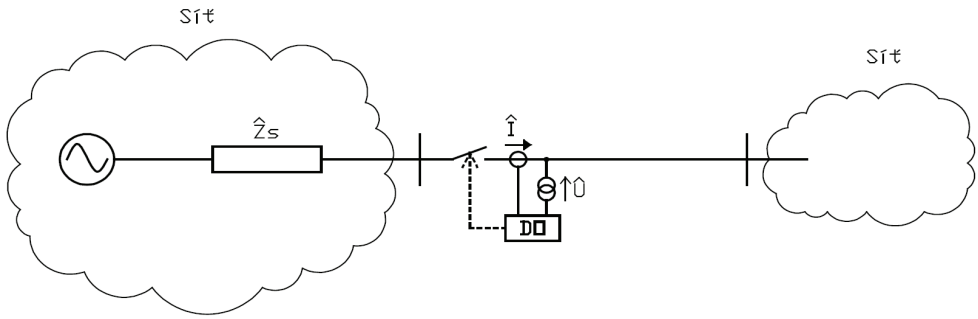
Obr. 10.1: Základní, záložní chránění

Principem distanční ochrany je měření impedance zkratové smyčky z měření proudu  $I$  a napětí  $U$  (obr. 10.1). Proto je někdy také nazývána impedanční ochrana. Impedance  $Z$  měřené smyčky vedení je podle Ohmova zákona:

$$Z = \frac{U}{I}$$

Měření probíhá přes přístrojové transformátory proudu a napětí (obr. 10.2). Ochrana se tedy řadí mezi sekundární ochrany. Proto se také změřená impedance musí ještě přepočítat podle převodů měřicích transformátorů na skutečnou impedanci vedení.

$$Z_{\text{skutečna}} = \frac{\frac{U_{\text{prim}}}{I_{\text{prim}}}}{\frac{U_{\text{sek}}}{I_{\text{sek}}}} \cdot Z_{\text{zmerena}} \quad (10.1)$$



**Obr. 10.2: Zapojení distanční ochrany**

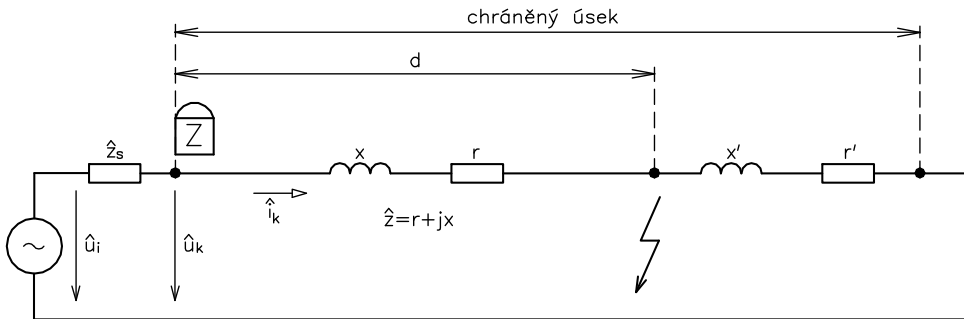
Ochrana měří proud  $\hat{I}_k$  a napětí  $\hat{U}_k$ . Při zkratu platí mezi těmito veličinami vztah  $\hat{I}_k = \hat{Z}_k \cdot \hat{U}_k$ , kde

$\hat{U}_k$  ..... napětí v místě ochrany

$\hat{I}_k$  ..... proud v místě ochrany

$\hat{Z}_k$  ..... impedance zkratové smyčky.

Velikiny  $\hat{U}_k$  a  $\hat{I}_k$  tedy jednoznačně určují impedanci zkratové smyčky a tím i vzdálenost (distanci)  $d$  zkratu od ochrany.

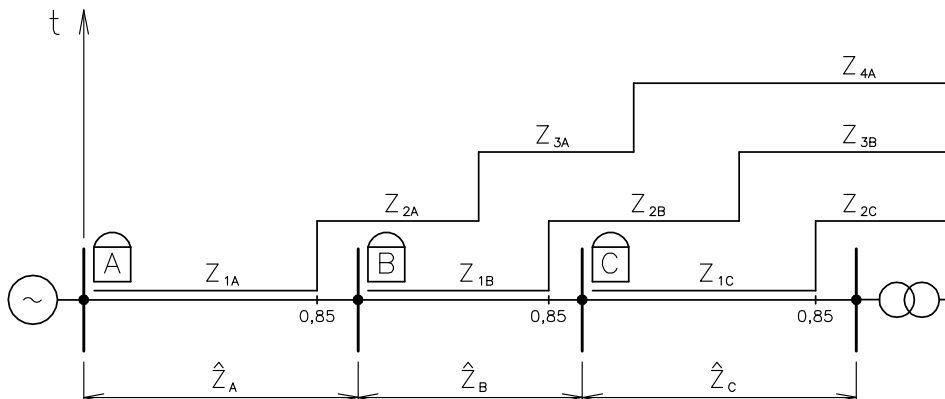


**Obr. 10.3: Impedance zkratové smyčky**

## 10.2. Doba vybavení ochrany

Doba vybavení ochrany v případě vzniku zkratu je závislá na vzdálenosti poruchy. Díky této vlastnosti jsou distanční ochrany schopné selektivního vypínání. Ochrana se nastavuje tak, že pro nejbližší úsek vedení je rychlost vypnutí omezena pouze rychlostí mžikového zapůsobení ochrany a rychlostí akce vypínače. Pro vzdálenější úseky se k vypínacím časům připočítává čas zpoždovacího členu, aby

před vypnutím zkratu vzdáleného pro tuto ochranu zapůsobila ochrana nejbližší zkratu s nejmenším vybavovacím časem. Na obr. 10.4 je vzorový příklad možného nastavení třech distančních ochran chránících tři úseky elektrického vedení.



**Obr. 10.4: Nastavení impedančně časové charakteristiky**

Pro správnou funkci selektivního vypínání se musí jednotlivé ochrany nastavit tak, aby nedošlo ke zbytečnému vypnutí bezporuchových míst. Zapůsobení vzdálenější distanční ochrany může způsobit odchylky proudů přístrojových transformátorů proudů (PPT) a napětí (PTN). Dalšími možnými nepřesnostmi mohou být omezené informace o chráněných vedeních a nepřesné výpočty. Vlivem těchto odchylek a nepřesností by mohlo dojít v koncových částech vedení k překrytí impedančně časové charakteristiky

V základním stupni ochrany, prvním bez časově zpožďovacího členu, se proto chrání 80 % až 90 % délky vedení. Další impedanční stupně jsou časově prodlouženy o určitý čas, který se pohybuje od 0,3 do 0,5 s. Při volbě tohoto času se musí zohlednit tyto faktory:

- rychlost mžikového zapůsobení ochrany – 0,15 ÷ 0,25 ms (typicky 30 ms)
- rychlost vypínače – 40 ÷ 80 ms
- velikost bezpečnostní mezery – z důvodu zachování selektivity

Druhý stupeň ochrany se nastavuje s ohledem na první stupeň protějškové ochrany, která je ve směru chránění. Aby bylo chráněné vedení spolehlivě chráněno, musí se zajistit zhruba 20 % přesah protějškové rozvodny.

Matematicky je možné zapsat impedance jednotlivých impedančních stupňů ochrany takto:

$$Z_{1A} = 0,85 \cdot Z_A$$

$$Z_{1A} = 0,85 \cdot (Z_A + Z_{1B}) = 0,85 \cdot (Z_A + 0,85 \cdot Z_B) \quad (10.2)$$



$$Z_{3A} = 0,85 \cdot (Z_A + Z_{2B}) = 0,85 \cdot (Z_A + 0,85 \cdot (Z_B + Z_C))$$

### 10.3. Charakteristika distanční ochrany

U distančních ochran se používá impedanční charakteristika, díky které můžeme velmi dobře posuzovat chování ochrany. Její základ tvoří impedanční Gaussova rovina. Impedanční charakteristika udává v principu množinu bodů (impedančí), při kterých ochrana působí.

V běžném provozním stavu, nebo bez zátěže, je impedance mnohem vyšší než při zkratu. Dojde-li k poruše a nastane zkrat, impedance se velmi rychle sníží. Takový stav je znázorněn na *obr. 10.3*. Pro tento případ ale není počítáno s činným odporem, který by vznikl při případném hoření elektrického oblouku. Jedná se tedy o tzv. kovový zkrat. Impedance  $\hat{Z}$  zkratu ve vzdálenosti  $d$  má pak složky:

$$\hat{Z} = r + j \cdot x$$

$$x = d \cdot \lambda \tag{10.3}$$

$$x = d \cdot \rho$$

kde

$r$  ..... činný odpor zkratového úseku vedení ( $\Omega$ )

$x$  ..... reaktance zkratového úseku vedení ( $\Omega$ )

$\lambda$  ..... indukční reaktance 1 km délky vedení ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )

$\rho$  ..... činný odpor 1 km délky vedení ( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )

V případě posuvného zkratu po homogenním vedení se poměr  $x/r$  nemění.

$$\frac{x}{r} = \frac{d \cdot \lambda}{d \cdot \rho} = \frac{\lambda}{\rho} = \text{tg} \varphi_k = \text{konst.} \tag{10.4}$$

kde

$\text{tg} \varphi_k$  ..... směrnice, po které se pohybuje impedance při posuvném zkratu (přímka  $p$  na *obr. 10.5*)

$\varphi_k$  ..... zkratový úhel vedení, vzhledem k indukčnímu charakteru vedení je tento úhel většinou větší než úhel při běžné zátěži

Chceme-li počítat i s vlivem elektrického oblouku, musíme zahrnout do impedance zkratové smyčky odpor oblouku. Protože oblouk vytváří ztráty, budeme ho nahrazovat pouze činným odporem. Velikost odporu lze určit řadou vzorců, které

respektují různé vlivy. Například vliv větru na natahování oblouku, vliv napětí, atd. Warringtonův vzorec počítá s vlivem délky oblouku a velikostí zkratového proudu:

$$R_{obl} \approx \frac{28707 \cdot l}{I_k^{1,4}} \quad (10.5)$$

kde:

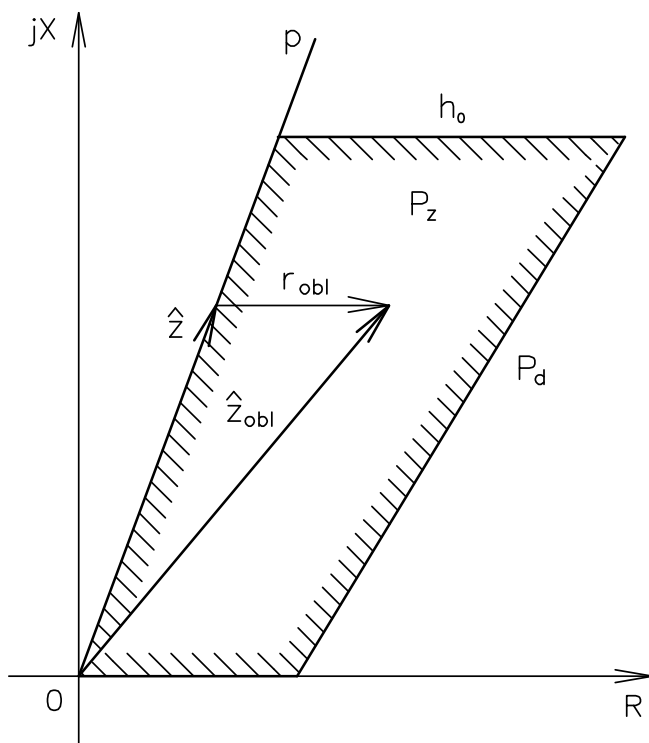
$l$ ..... délka oblouku (m)

$I_k$ ..... zkratový proud (A)

$R_{obl}$  ..... odpor oblouku ( $\Omega$ )

Impedance zkratové smyčky  $Z_a$  se započteným obloukem je pak součet:

$$Z_a = R + R_{obl} + j \cdot X \quad (10.6)$$



**Obr. 10.5: Ideální charakteristika distanční ochrany**

Impedanční charakteristiky analogových a digitálních ochran jsou rozdílné (viz následující kapitoly).

### 10.3.1. Charakteristika analogových ochran

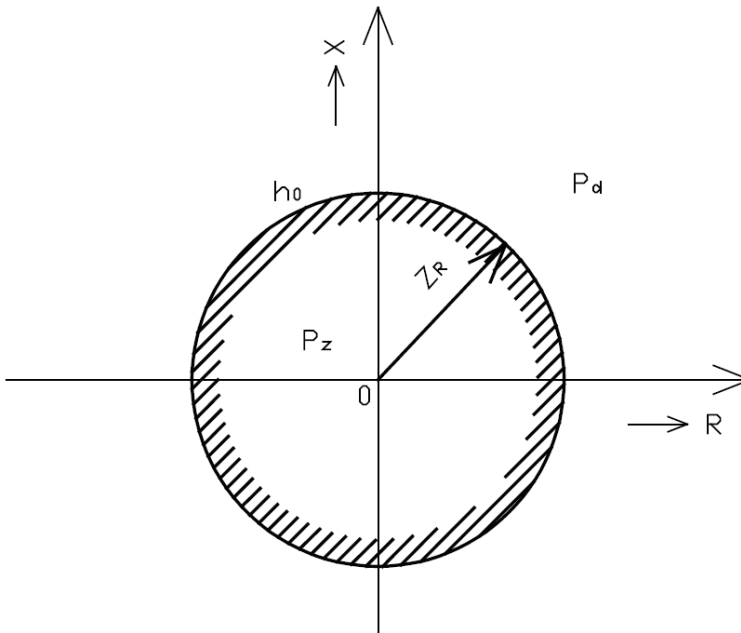
Ideální impedanční charakteristika distanční ochrany se skládá z přímek. U běžných elektromechanických ochran ale v základu vycházíme z kruhové charakteristiky. Základní impedanční charakteristika má tvar kružnice se středem v počátku a poloměrem  $Z_R$  (obr. 10.6). Podmínkou pro působení je:

$$Z < Z_R \quad (10.7)$$

kde

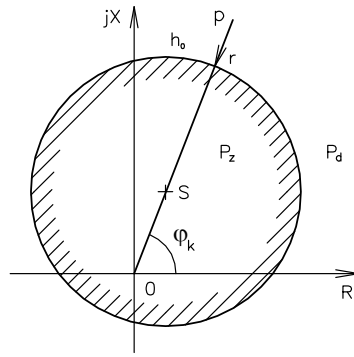
$Z$  ..... modul impedance zkratové smyčky ( $\Omega$ )

$Z_R$ ..... modul předřadné impedance ( $\Omega$ )

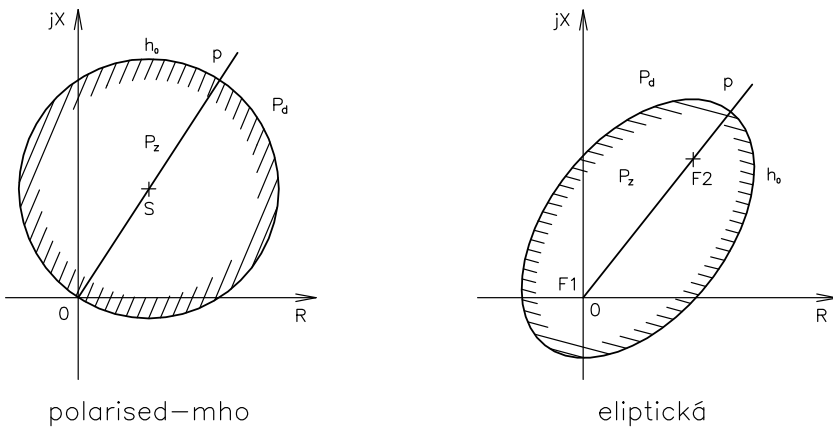


**Obr. 10.6: Základní charakteristika analogové ochrany**

Protože takováto charakteristika není směrová, byly vytvořeny změny ve struktuře analogových ochran tak, aby se kruhová charakteristika vysunula ve směru zkratového úhlu vedení (obr. 10.7 a 10.8). Mezi ně patří charakteristiky offset-mho, polarised-mho. Je možné také vytvořit eliptickou charakteristiku.



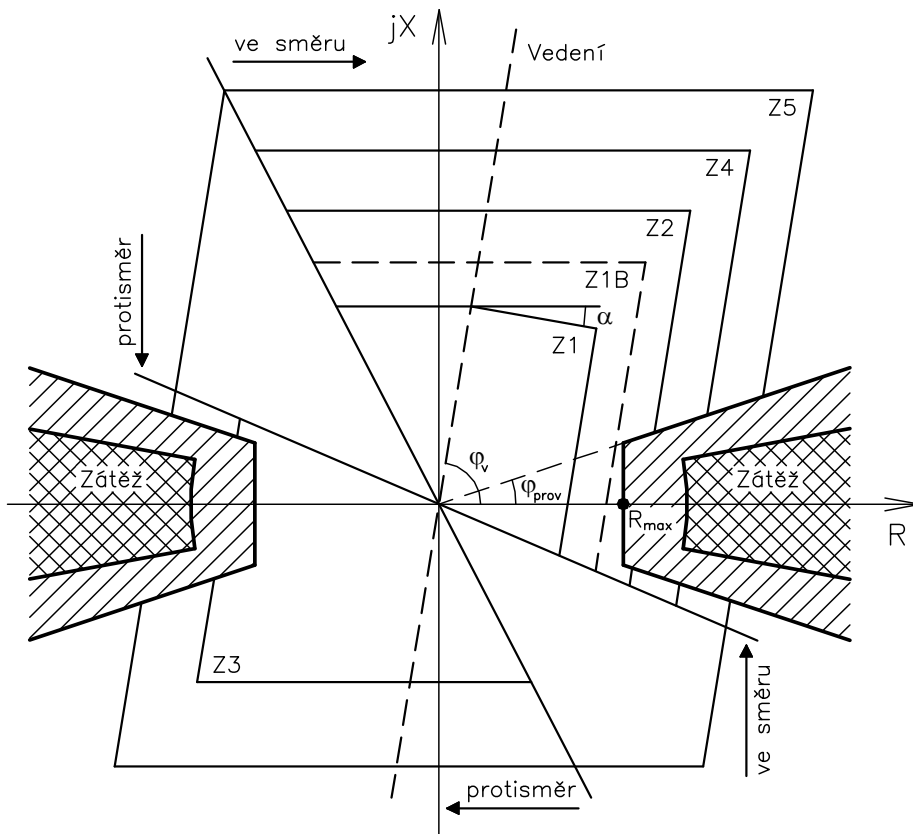
**Obr. 10.7: Vysunutá kruhová charakteristika „offset-mho“**



**Obr. 10.8: Další běžné charakteristiky analogových distančních ochran**

### 10.3.2. Charakteristika digitálních ochran

Hlavní výhodou digitálních distančních ochran je možnost tvorby charakteristiky bez omezení na kruhové nebo elipsovité tvary. Impedanční charakteristiku digitální ochrany lze bez problémů nastavit s ohledem na impedanci zátěže a impedanci případného oblouku nezávisle pro všechny zóny (obr. 10.9).



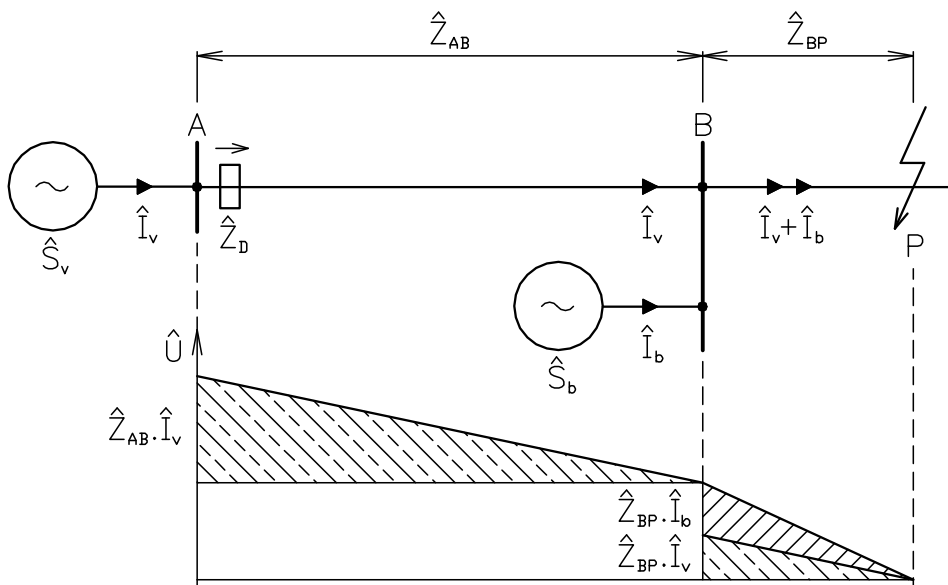
Obr. 10.9: Příklad charakteristiky digitální ochrany

## 10.4. Specifické vlivy

Nyní se podíváme na problematiku lokalizace poruch zejména v sítích vvn. Na této napěťové úrovni jsou poruchy lokalizovány buď samostatnými poruchovými lokátory, nebo distančními ochranami s integrovaným poruchovým lokátorem. Vzhledem k důležité funkci distančních ochranných a lokátorů poruch v přenosu a distribuci bylo již vyvinuto nemalé množství energie na realizaci technicky optimálních postupů a metod vedoucích k přesnému stanovení parametrů chráněných zařízení, které tvoří podklady pro správné nastavení distančních ochranných a lokátorů. Tyto parametry jsou však v reálném provozu ovlivňovány značným množstvím negativních specifických vlivů, které často správnou funkci ochranných komplikují a mohou obecně snižovat spolehlivost dodávky elektrické energie. Tyto vlivy a velikosti chyb lokalizace poruch jsou zde blíže rozebrány. Některé z prezentovaných chyb jsou způsobeny tím, že algoritmy ochranných a lokalizačních zařízení vycházejí ze složkových hodnot.

### 10.4.1. Boční napájení

Na obr. 10.10 je zachycen případ zkratu na vedení s bočním napájením.



**Obr. 10.10: Zkrat na vedení s bočním napájením**

Bez bočního napájení „vidí“ distanční ochrana  $Z_D = Z_l + Z_{zkrat}$  a vyměřuje správně vzdálenost zkratu.

S bočním napájením „vidí“ distanční ochrana :

$$\hat{Z}_D = \hat{Z}_l + \hat{Z}_{zkrat} \left( 1 + \frac{\hat{S}_b}{\hat{S}_v} \right) = \hat{Z}_l + \hat{Z}_{zkrat} \left( 1 + \frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_v} \right) \quad (10.8)$$

čili ochrana vidí zkrat o  $\hat{Z}_{zkrat} \cdot \frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_v}$  dále.

$$\hat{Z}_{ochr.A} = \hat{Z}_v + R_p \cdot \left( 1 + \frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_a} \right) = \hat{Z}_v + R_p + \frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_a} \cdot R_p \quad (10.9)$$

Uvedené vztahy jsou odvozeny dále.

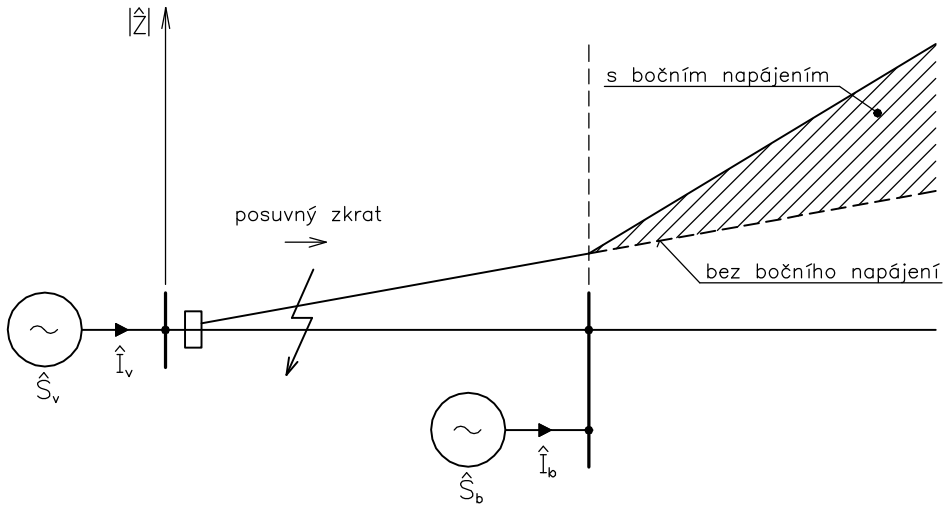
Nyní uvažujme tyto extrémy:

a)  $S_b \ll S_v$ , pak se poměr  $S_b / S_v$  blíží k nule

$Z_D = Z_l + Z_{zkrat}$ , t.j. správné vidění

- b)  $S_b = S_v$ , oba výkony jsou srovnatelné - pak výraz v závorce nabývá hodnoty 2 a ochrana vidí zkrat ve dvojnásobné vzdálenosti od bodu B. Vzniká nebezpečí, že vypne zkrat v příliš dlouhém čase.
- c)  $S_b \gg S_v$ , pak již vůbec nelze ochranu selektivně nastavit.

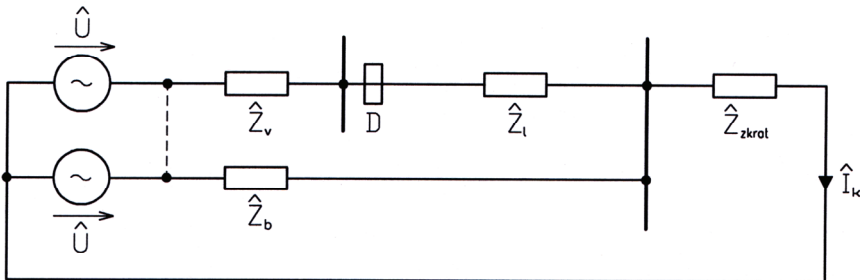
Na obr. 10.11 je průběh měřené impedance ochrany při posuvném zkratu.



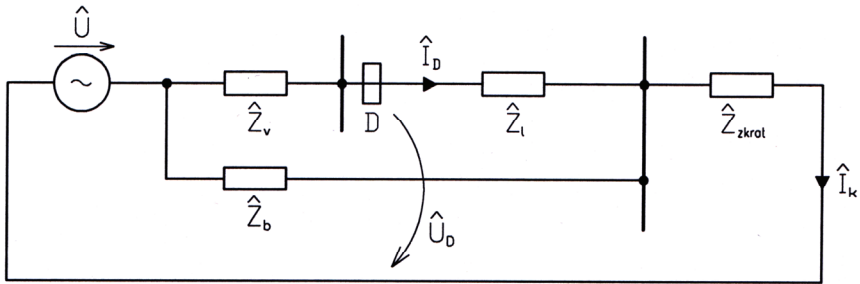
**Obr. 10.11: Průběh impedance měřené ochranou při posuvném zkratu**

Uvedený příklad lze částečně řešit vhodnou úpravou měřicí charakteristiky, nebo kombinací distančních a srovnávacích ochran. Ale výsledky nejsou uspokojivé, neboť poměr  $S_b / S_v$  se může během dne měnit v širokém rozmezí podle různého zapojení elektrizační soustavy.

**Odvození viděné impedance distanční ochranou při bočním napájení:**



**Obr. 10.12**



Obr. 10.13

Jelikož napětí za zdroji je shodné (obr. 10.12), lze tato místa vodivě propojit (obr. 10.13).

$$\hat{I}_K = \frac{\hat{U}}{\left(\hat{Z}_v + \hat{Z}_l\right) \cdot \hat{Z}_b + \hat{Z}_{zkrat} \cdot \left(\hat{Z}_v + \hat{Z}_l + \hat{Z}_b\right)} = \frac{\hat{U}}{\hat{Z}_v + \hat{Z}_l + \hat{Z}_b}$$

$$\hat{I}_D = \hat{I}_K \cdot \frac{\hat{Z}_b}{\hat{Z}_v + \hat{Z}_l + \hat{Z}_b} = \frac{\hat{U} \cdot \hat{Z}_b}{\left(\hat{Z}_v + \hat{Z}_l\right) \cdot \hat{Z}_b + \hat{Z}_{zkrat} \cdot \left(\hat{Z}_v + \hat{Z}_l + \hat{Z}_b\right)}$$

$$\hat{U}_d = \hat{U} - \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_D$$

Impedance viděná ochranou pak je:

$$\begin{aligned} \hat{Z}_D &= \frac{\hat{U}_D}{\hat{I}_D} = \frac{\hat{U} - \hat{Z}_v \cdot \hat{I}_D}{\hat{I}_D} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}_D} - \hat{Z}_v = \\ &= \frac{\left(\hat{Z}_v + \hat{Z}_l\right) \cdot \hat{Z}_b + \hat{Z}_{zkrat} \cdot \left(\hat{Z}_v + \hat{Z}_l + \hat{Z}_b\right)}{\hat{Z}_b} - \hat{Z}_v = \\ &= \hat{Z}_v + \hat{Z}_l + \frac{\hat{Z}_{zkrat}}{\hat{Z}_b} \cdot \left(\hat{Z}_v + \hat{Z}_l + \hat{Z}_b\right) - \hat{Z}_v \end{aligned}$$



$$\hat{Z}_D = \hat{Z}_1 + \hat{Z}_{\text{zkrat}} \cdot \left( 1 + \frac{\hat{Z}_v + \hat{Z}_1}{\hat{Z}_b} \right) \quad (10.10)$$

Jelikož  $(\hat{Z}_v + \hat{Z}_1) \parallel \hat{Z}_b$  platí:

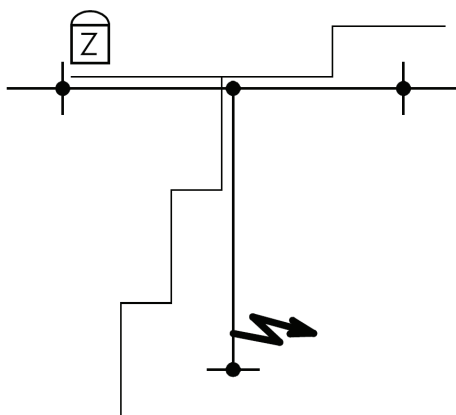
$$\frac{\hat{Z}_v + \hat{Z}_1}{\hat{Z}_b} = \frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_v} \quad (10.11)$$

a tudíž

$$\hat{Z}_D = \hat{Z}_1 + \hat{Z}_{\text{zkrat}} \cdot \left( 1 + \frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_v} \right) = \hat{Z}_1 + \hat{Z}_{\text{zkrat}} \cdot \left( 1 + \frac{\hat{S}_b}{\hat{S}_v} \right) \quad (10.12)$$

### 10.4.2. T-odbočky

S rozvojem elektrizační soustavy vzniká řada nových odběrných míst, která je výhodné z ekonomických důvodů napájet pomocí T-odbočení ze stávajícího vedení. Toto řešení však s sebou nese úskalí spojená s chráněním takto vzniklého vedení. Na *obr. 10.14* je znázorněna schématicky impedančně časová charakteristika, kde nastává problém chránění T-odbočení v optimálním čase z důvodu nestejných impedančních délek vedení.



Obr. 10.14: Impedančně časová charakteristika T-odbočky

### 10.4.3. Impedanční nesymetrie přenosových a distribučních sítí

Velikost impedanční nesymetrie je dána zejména konfigurací vodičů, jejich vzájemnými vzdálenostmi, jejich vzdálenostmi od zemnicích lan a u paralelních

vedení také vzájemnými vzdálenostmi vodičů mezi paralelními potahy. Nesymetrie vedení elektrizačních soustav však neustále narůstá.

Důvody tohoto nepříznivého stavu jsou zejména následující:

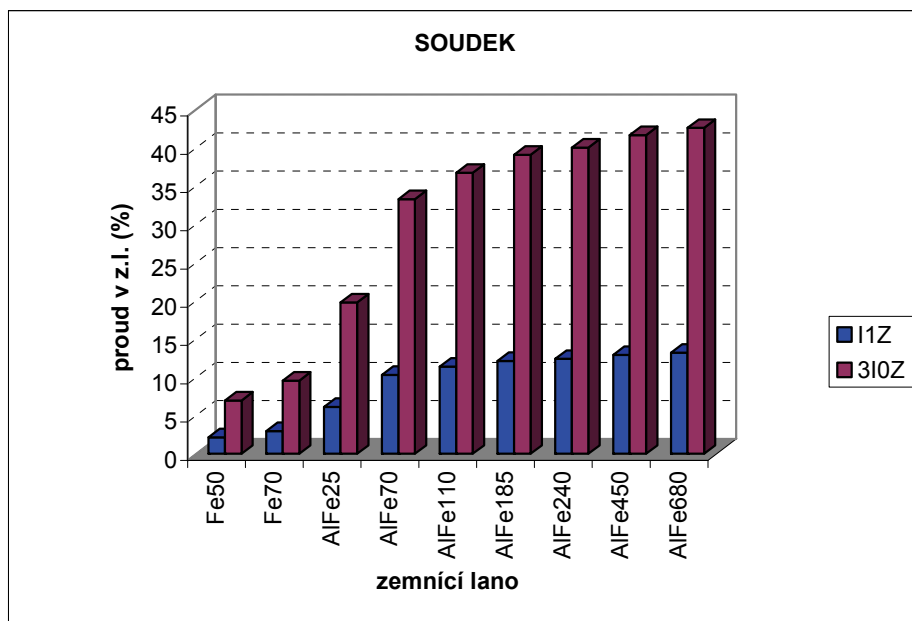
- neprovádění transpozic vodičů
- instalace vodivějších zemnicích lan

Od počátků budování třífázových přenosových a distribučních sítí v elektroenergetice bylo z teoretických a praktických důvodů stanoveno, že je nezbytné provádět na každém vedení mezi dvěma rozvodnami úplné vykřížení (transpozici) vodičů. Znamenalo to vést vodiče v každé 1/3 délky úseku mezi rozvodnami v jiné pozici. Později s další výstavbou sítí se nejen stavěly další rozvodny, ale dlouhá vedení se zkracovala a zasmyčkovávala do nových rozveden. Protože náklady na instalaci transpozičních stožárů jsou vyšší než u normálních stožárů kotevních a nosných, byla snaha ze strany výstavbových organizací z ekonomických důvodů co nejvíce transpozice vodičů omezit. Vlivem zasmyčkování nových rozveden a se vzrůstem jejich množství tak vznikly úseky vedení mezi rozvodnami výrazně kratší. Dnešní nejkratší vedení přenosové soustavy jsou dlouhá cca 20 km. Dále je také běžné, že až do délek vedení cca 70 km není provedena jediná transpozice vodičů. Kromě tohoto procesu zasmyčkovávání stávajících vedení do nových rozveden vznikly někdy poměrně dlouhé smyčky, na kterých také nejsou provedeny transpozice hlavně z důvodů vysokých nákladů na stavbu transpozičních stožárů paralelních vedení.

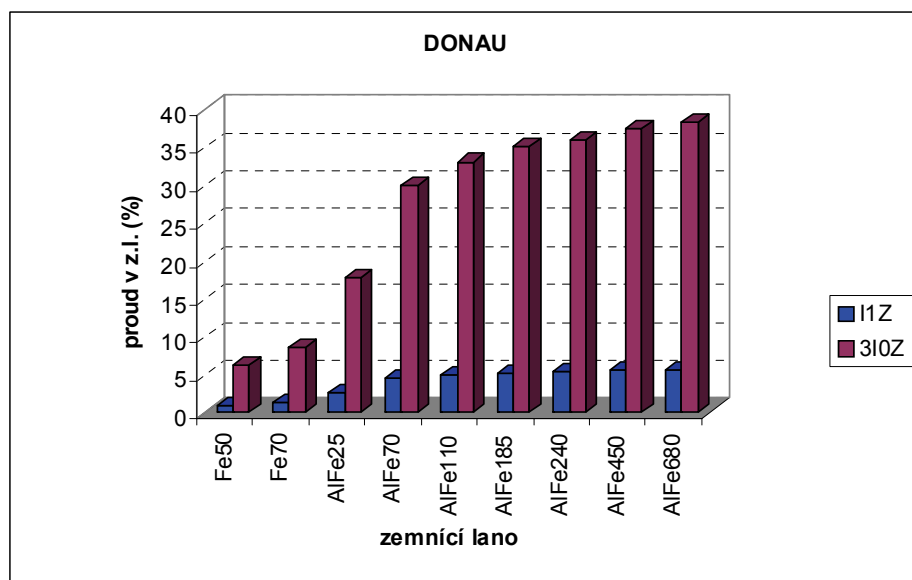
Následkem neprovádění transpozic nabývá na významu vliv, který byl v minulosti zcela zanedbáván a to vzájemný vliv mezi vedeními ve společných koridorech. Důsledkem tohoto jevu může být značná nepřesnost a často i nemožnost primárního měření parametrů vedení, neboť paralelně provozované potahy (které nejde z provozních důvodů vypnout) indukují do měřeného vedení taková rušivá napětí, která již nelze dostupnými prostředky eliminovat.

V minulosti byla na vedeních běžně instalována železná zemnicí lana. Při rekonstrukcích vedení nebo při opravách se železná zemnicí lana nahrazují klasickými zemnicími lany AlFe, nebo kombinovanými zemnicími lany, která jsou zpravidla tvořena lanem AlFe s integrovanými optickými vodiči. Zemnicí lana AlFe či kombinovaná lana mají výrazně menší impedanci než lana železná. Instalaci výrazně vodivějších zemnicích lan AlFe místo lan Fe dochází ke změnám zpětných vodivých zemnicích cest při jednopólových poruchách. To podstatně ovlivňuje parametry vedení a zvyšuje impedanční nesymetrii mezi fázemi.

Na následujících obrázcích je znázorněna procentuální velikost proudu tekoucího zemnicím lanem pro různé typy zemnicího lana. Výpočty jsou prováděny pro konfiguraci vodičů Soudek a Donau. Velikost proudu tekoucího fázovým vodičem je 100 %. Proud  $I_{IZ}$  je proud v zemnicím laně, který je indukován od sousledné složky proudu protékající fázovými vodiči. Proud  $3I_{0Z}$  představuje proud tekoucí zemnicím lanem při jednofázové zemní poruše.



**Obr. 10.15: Velikost proudu v zemnicím laně na stožáru typu Soudek závislý na typu zemnicího lana**



**Obr. 10.16: Velikost proudu v zemnicím laně na stožáru typu Donau závislý na typu zemnicího lana**

V konfiguraci vodičů Donau je vidět, že proudy tekoucí zemnicím lanem jsou menší než v případě „Soudku“. U proudu I1Z je to dáno zejména tím, že konfigurace fázových vodičů je mnohem symetričtější u stožáru typu „Donau“ než u „Soudku“. Proud 3I0Z je menší proto u stožáru typu „Donau“, poněvadž vzdálenost fázových vodičů od zemnicího lana je u stožáru „Donau“ větší než u „Soudku“ a tím pádem je větší i impedance smyčky fáze – zemnicí lana, proto teče více proudu zemí než zemnicím lanem.

Z výše uvedených obrázků je patrné, jak značný je rozdíl ve velikosti proudů mezi starými železnými zemnicími lany a novými AlFe lany. V přehledu nejsou uvedena kombinovaná zemnicí lana, neboť vycházejí z AlFe lan a dosahují obdobných parametrů jako AlFe lana.

Zemnicí lana tvoří běžně část tzv. zpětné zemní cesty při průtoku zkratového proudu při zemních zkratech. Dříve se vzhledem k málo vodivým zemnicím lanům (Fe 50, Fe 70) automaticky předpokládalo, že naprostá většina proudu tekoucího zpětnou zemní cestou při zemních poruchách protéká zemí, která vykazovala mnohem větší vodivost než zemnicí lana. S instalací vodivějších zemnicích lan AlFe nastala podstatná změna v rozdělení proudů ve zpětné zemní cestě. To vede k tomu, že vlastní parametry jednotlivých smyček fáze-zem jsou různé a se zmenšující se impedancí zemnicího lana tyto diference narůstají. To samozřejmě přináší problémy pro distanční ochrany. Distanční ochrany i lokátory poruch pracují se složkovými hodnotami, které předpokládají symetrický systém. Jestliže se vyskytne nesymetrický systém, vlivem nižších impedancí zemnicích lan je výsledek měření distančních ochrany zatížen chybou, která je dána metodou zpracování naměřených hodnot s užitím složkových impedancí.

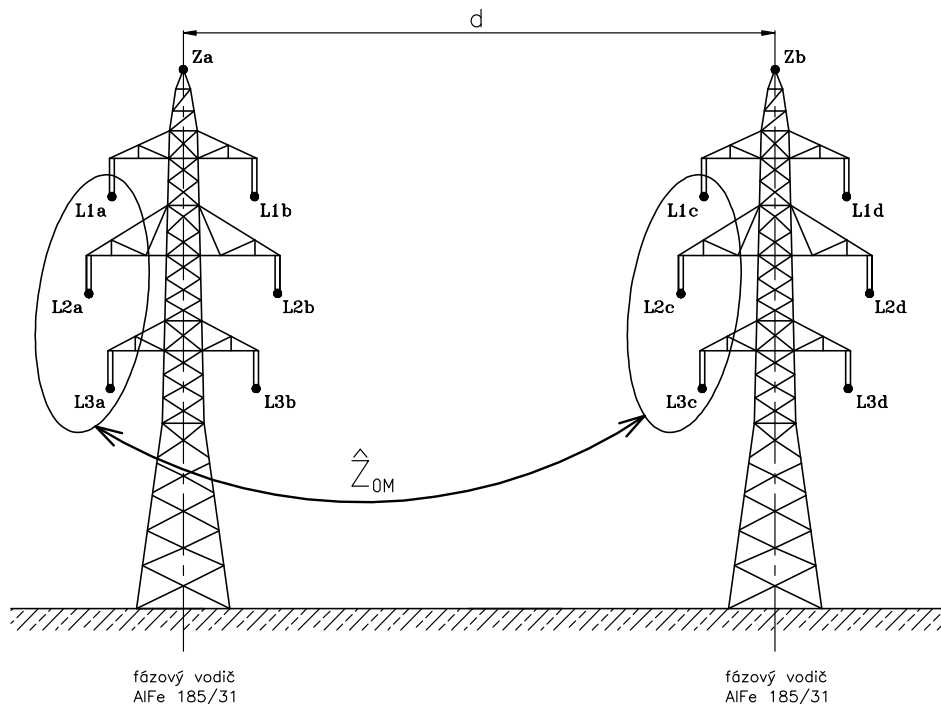
Z uvedených závislostí je patrné, že vzhledem k impedanční nesymetrii vedení jsou výsledky měření distančních ochrany a lokátorů poruch zatíženy značnou chybou. Často jsou v manuálech distančních ochrany prezentovány maximální chyby měření mezi 2 až 3 %. Tato přesnost však při použití složkových hodnot nemůže být obecně zaručena. Vzhledem ke zvyšující se nesymetrii vedení přenosových a distribučních soustav budou chyby zařízení vycházejících ze složkových hodnot nadále narůstat.

#### 10.4.4. Paralelní vlivy

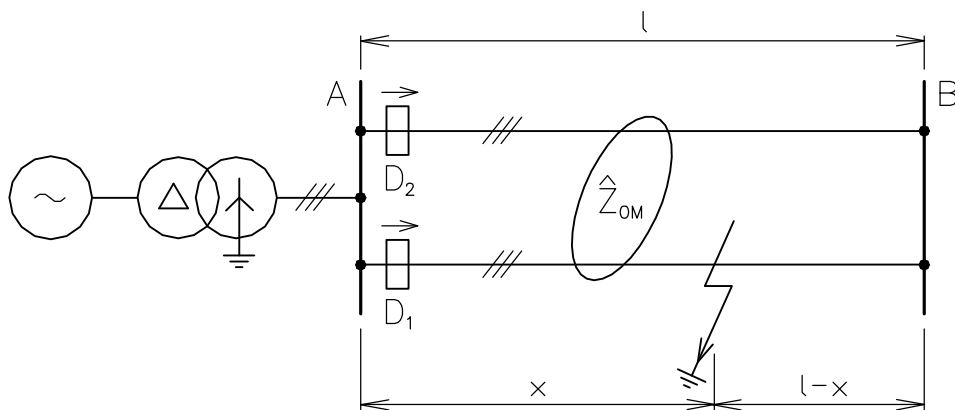
Měření distančních ochrany a lokátorů poruch je značně komplikováno tím, že paralelně provozovaná vedení působí na měřený obvod svojí vzájemnou impedancí. Tím dochází k tomu, že do měřené smyčky jsou indukována přídavná napětí, která mohou podstatně ovlivňovat naměřené hodnoty. Obvykle se počítá s vlivem druhého potahu umístěného na stejném stožáru. Ale pouze tato korekce však nemusí být dostatečná.

Magnetický tok vyvolaný proudem tekoucím v zemnicím laně působí totiž proti magnetickému toku vyvolanému proudy ve fázových vodičích. Tyto toky se vzájemně odčítají. Čím je tedy impedance zemnicího lana menší, tím je větší proud, který jím teče a tím je větší i magnetický tok vyvolaný jeho proudem. Důsledkem magnetického toku vyvolaného proudem v zemnicím laně je pokles vzájemné nulové reaktance  $X_{0M}$ . Důležité je, že pokles vzájemné nulové reaktance  $X_{0M}$  je velmi pozvolný a vliv paralelního potahu můžeme zanedbat při vzdálenostech d

dosahujících řádově až stovky metrů. Je nutno poznamenat, že stávající ochranná zařízení dovolují částečnou kompenzaci paralelního vedení umístěného zpravidla na stejném stožáru. Nicméně je vidět, že potahy vedlejších stožárů mají na měřené vedení obdobný vliv, jehož kompenzaci dostupná zařízení neumožňují. Rovněž nebývá řešen souběh paralelních vedení jen v části trasy.



**Obr. 10.17: Vzájemná impedance mezi potahy a, c**

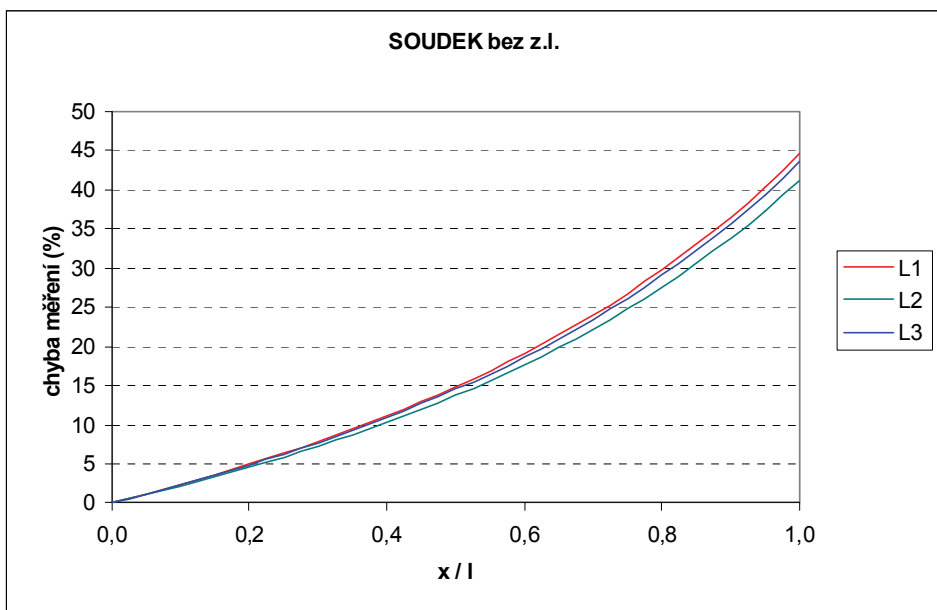


**Obr. 10.18: Paralelní vedení napájené z jedné strany s posuvným zkratem**

Na obr. 10.17 uvažujeme 2 paralelní potahy vedení umístěných na stožáru typu „Soudek“ a vedoucí z rozvodny A do rozvodny B. Vedení je napájeno z jedné

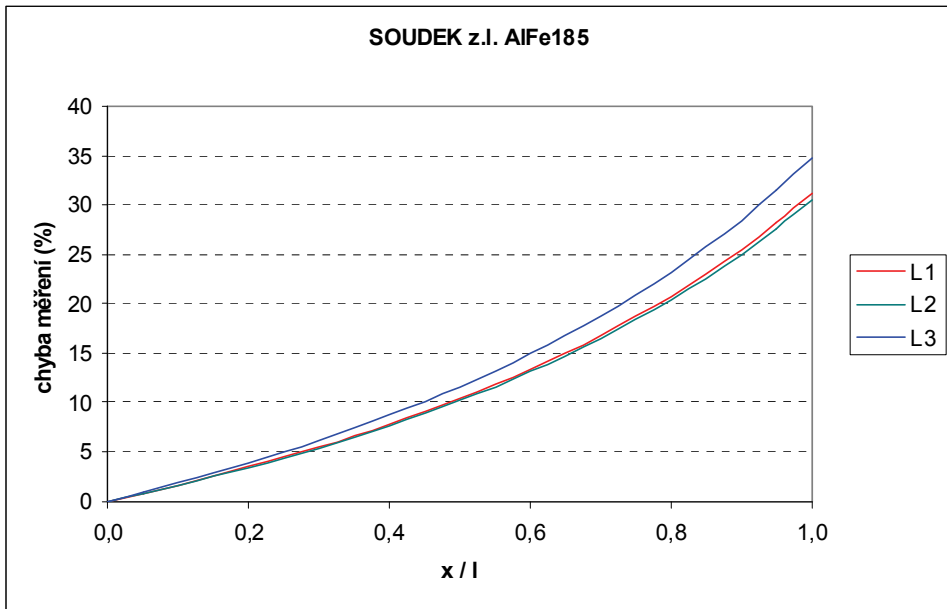
strany. Na vedení je vyznačen posuvný zkrat, jehož vzdálenost od rozvodny A je  $x$ . Délka vedení je  $l$ .

Na *obr. 10.19* je znázorněna chyba vymeření posuvného zkratu distanční ochranou  $D_1$ , která je způsobena vlivem paralelního vedení. Pro vedení na stožáru typu „Soudek“ bez zemnicího lana dosahuje tato chyba až 43,93 % pro zkrat v rozvodně B ( $x = l$ ) a fázi L1. Nejmenší chybu 41,27 % pro zkrat v rozvodně B vykazuje fáze L2, neboť na stožáru typu „Soudek“ jsou fáze L2 obou potahů od sebe nejvíce vzdáleny. Proto je i jejich vzájemná impedance je menší než u fází ostatních a jejich vzájemný vliv není tak velký.



**Obr. 10.19: Chyba vymeření posuvného zkratu distanční ochrany  $D_1$  pro stožár typu „Soudek“ bez zemnicího lana**

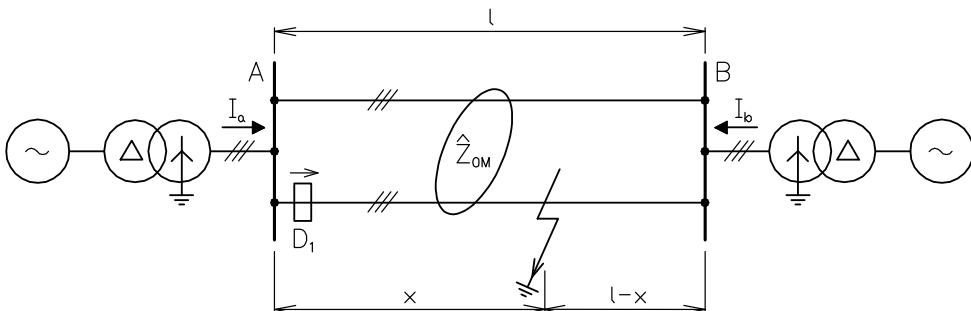
Na *obr. 10.20* je vyneseno stejný jev s tím rozdílem, že vedení jsou umístěna na stožáru typu „Soudek“ se zemnicím lanem AlFe 185/31. Na první pohled je zřejmý vliv zemnicího lana. Maximální chyba pro zkrat v rozvodně B je ve fázi L3 34,85 %, nejmenší pak pro fázi L2 30,60 %. Vlivem zemnicího lana tedy došlo k poklesu chyby vymeření zkratu. To je v souladu s tím, že vlivem zemnicího lana dochází k poklesu vzájemné impedance.



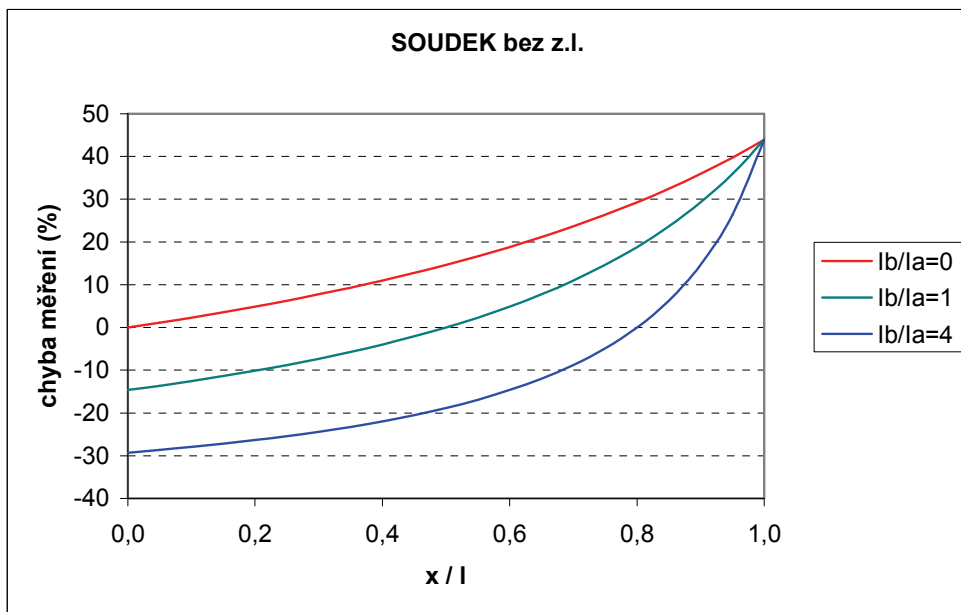
**Obr. 10.20: Chyba vyměření posuvného zkratu distanční ochrany D1 pro stožár typu „Soudek“ se zemnicím lanem AIFe 185/31**

Nepříznivým jevem je zde ovšem to, že vlivem zemnicího lana dochází ke zvětšení rozdílu velikosti chyby měření mezi jednotlivými fázemi. Čím jsou fázové vodiče blíže zemnicímu lanu, tím menší je jejich vzájemná impedance a tím menší je i chyba měření. Názorně je to vidět na příkladu fáze L1, která je nejbližší zemnicímu lanu. Na *obr. 10.19* u vedení bez zemnicího lana vykazovala tato fáze největší chybu ze všech. Na *obr. 10.20* u vedení se zemnicím lanem AIFe 185/31 fáze L1 vykazuje již chybu téměř shodnou s fází L2 a tudíž oproti fázi L3 mnohem menší.

Výše byl uveden rozbor pro paralelní vedení napájené pouze z jedné strany. Vedení přenosových a distribučních soustav jsou ovšem daleko častěji napájena z obou stran (*obr. 10.21*).



**Obr. 10.21: Paralelní vedení napájené z obou stran s posuvným zkratem**



**Obr. 10.22: Chyba vyměření posuvného zkratu distanční ochrany D1 pro stožár typu „Soudek“ bez zemnicího lana v případě napájení zkratu z obou stran**

Na obr. 10.22 je vidět, že nyní již chyba vyměření posuvného zkratu dosahuje kladných i záporných hodnot a je značně závislá na velikosti poměru zkratových příspěvků z obou stran. Čím menší bude zkratový příspěvek z protější rozvodny, tím více se bude průběh chyby vyměření posuvného zkratu blížit průběhu na obr. 10.19. Konkrétně pro  $I_b / I_a = 4$  se chyba určení posuvného zkratu pohybuje v rozmezí od -29,29 % do 43,93 %, tedy celkové rozpětí je 73,22 %.

Během běžného provozu elektrizační soustavy dochází ke změnám příspěvků zkratových výkonů z jednotlivých směrů. Důvodem mohou být manipulace v síti, poruchy, vyřazení bloků, regulace, apod. To značně ovlivňuje velikost chyby měřené poruchové impedance a komplikuje postup následné korekce. Bez znalosti zapojení celé elektrizační soustavy tedy nelze údaje získané z distančních ochrany a poruchových lokátorů přesně korigovat.

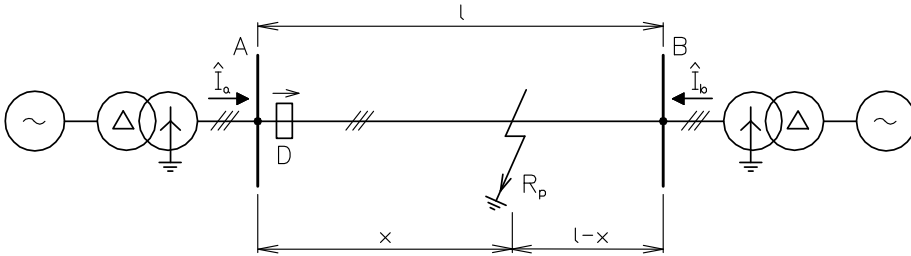
#### 10.4.5. Vliv odporu poruchy

Pokud při poruše vznikne oblouk, je jeho impedance  $R_{obl}$  v sérii se  $\hat{Z}$ . Impedance oblouku  $R_{obl}$  má odporový charakter a celková impedance zkratové smyčky je  $\hat{Z}_{obl}$ .



Obecně lze mluvit o odporu poruchy  $R_p$ , který zahrnuje jak odpor oblouku  $R_{obl}$ , tak například odpor konstrukce a uzemnění stožáru při jednopólových poruchách.

Pokud je chráněné vedení napájeno pouze z jedné strany a distanční ochrana je umístěna na straně zdroje, uvidí ochrana poruchovou impedanci  $R_p$  správně. Pokud je ovšem chráněný objekt napájený z obou stran (viz obr. 10.23), dochází k bočnímu napájení a velikost viděné poruchové impedance se zvětšuje.



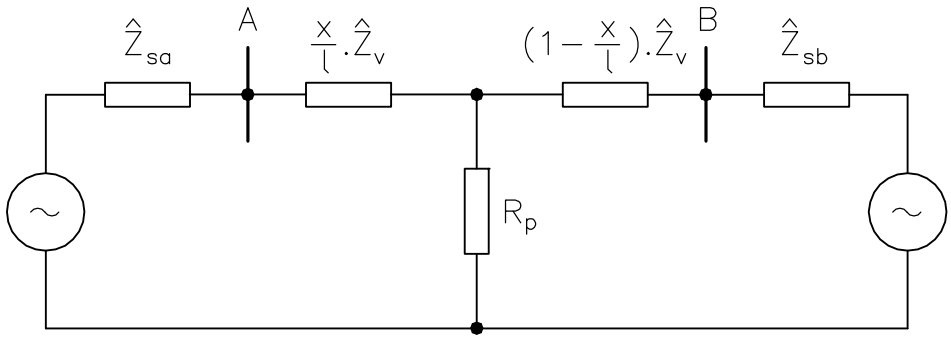
**Obr. 10.23: Schéma ES s poruchovým odporem napájeným ze dvou stran**

S protějším napájením „vidí“ distanční ochrana umístěná v rozvodně A následující impedanci poruchy:

$$\hat{Z}_{\text{ochr.A}} = \hat{Z}_v + R_p \cdot \left( 1 + \frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_a} \right) = \hat{Z}_v + R_p + \frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_a} \cdot R_p \quad (10.13)$$

Správné vidění poruchové smyčky je tedy navýšeno o  $\frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_a} \cdot R_p$ .

V tomto případě dojde k tomu, že poruchová impedance se navýší ve směru osy R, tedy zvětšuje se rezistance viděná ochranou. Jelikož digitální distanční ochrana odvozuje vzdálenost poruchy z viděné reaktance, nedochází v tomto případě k chybě měření, neboť viděná reaktance není tímto jevem ovlivněna. Při tvorbě impedančních charakteristik distanční ochrany je ovšem třeba s tímto jevem počítat a dbát na to, aby dosahy v rezistanční oblasti byly dostatečně veliké.

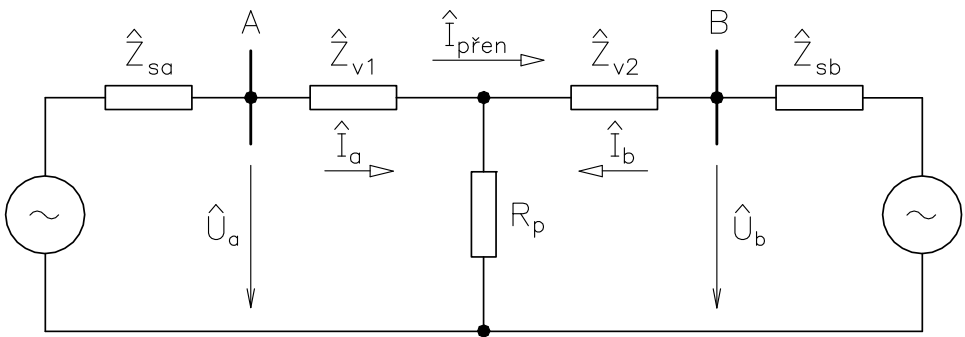


**Obr. 10.24: Náhradní schéma ES s odporem poruchy napájeným ze dvou stran**

Na obr. 10.24 je znázorněno náhradní schéma ES s odporem poruchy napájeným ze dvou stran. Dle tohoto schématu lze určit následující poměr poruchových proudů:

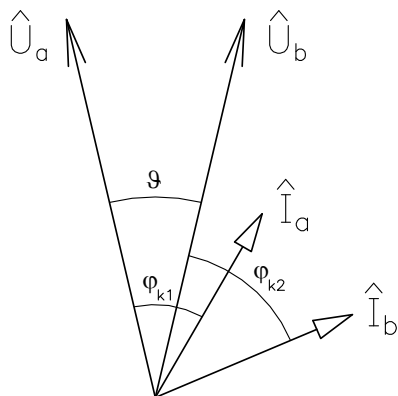
$$\frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_a} = \frac{\hat{Z}_{sa} + \hat{Z}_v \cdot \frac{x}{l}}{\hat{Z}_{sb} + \hat{Z}_v \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right)} \quad (10.14)$$

Výše popsaná optimální situace, kdy jsou poruchové proudy  $\hat{I}_a$  a  $\hat{I}_b$  ve fázi, není běžně zaručena. Přenášením výkonu v ES vzniknou rozdíly napětí mezi rozvodnami, což jsou zejména úhlové posuny napěťových fázorů. Popíšeme si tedy situaci, kdy poruchové proudy  $\hat{I}_a$  a  $\hat{I}_b$  nejsou ve fázi.



**Obr. 10.25: Náhradní schéma ES s poruchovým odporem napájeným ze dvou stran a vyznačeným přenášeným provozním proudem před poruchou**

Pokud tedy je po vedení přenášen provozní proud  $\hat{I}_{\text{pren}}$  (viz obr. 10.25), jsou mezi rozvodnami A a B napětové difference – obr. 10.26. Pokud pak dojde k poruše, jsou poruchové proudy  $\hat{I}_a$  resp.  $\hat{I}_b$  určeny také těmito napětími. Na fázor poruchového proudu má rovněž vliv impedance vedení do místa poruchy. Pokud není vedení homogenní, je třeba rovněž toto uvážit (postačí třeba jen jiný typ či absence zemnicího lana v části trasy).



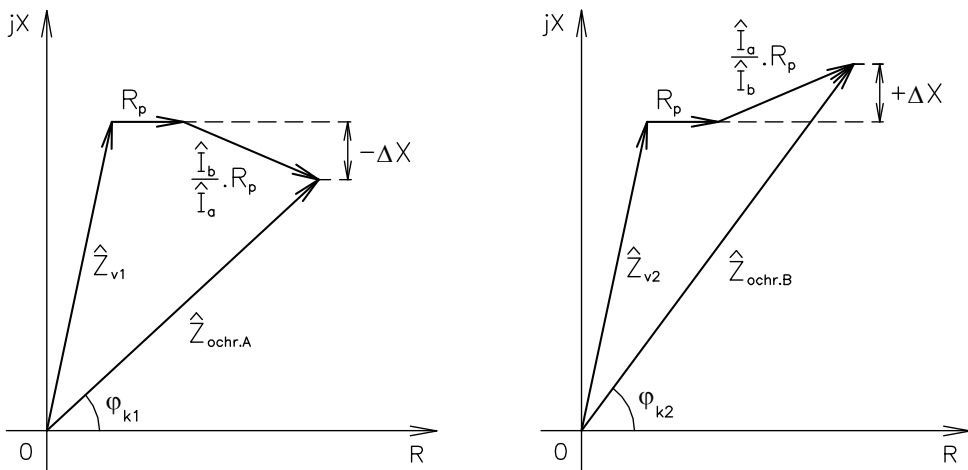
**Obr. 10.26: Fázorový diagram napětí a proudů pro ES na obr. 10.25**

Jelikož nyní má poměr  $\frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_a}$  i imaginární složku, dochází nejen k navýšení odporu poruchy ve směru osy R, ale dojde i k jeho natočení – viz obr. 10.27 a vztah (10.15).

$$\hat{Z}_{\text{ochr.A}} = \hat{Z}_{v1} + R_p + \frac{\hat{I}_b}{\hat{I}_a} \cdot R_p, \quad \hat{Z}_{\text{ochr.B}} = \hat{Z}_{v2} + R_p + \frac{\hat{I}_a}{\hat{I}_b} \cdot R_p \quad (10.15)$$

Zde již dochází k negativnímu ovlivnění vyměření poruchy distanční ochranou, neboť ochrana dostává zkreslenou informaci i o poruchové reaktanci. Konkrétně pokud výkon před poruchou tekl z rozvodny A do rozvodny B, distanční ochrana v rozvodně A vyměří reaktanci menší, než by odpovídalo místu poruchy. Distanční ochrana v rozvodně B naopak vyměří reaktanci větší.

Tento jev může značně zhoršovat selektivitu v systému a lokalizaci poruchy. Vše je komplikováno i tím, že chyba měřené reaktance je dána i odporem poruchy  $R_p$ , což je náhodná veličina.



**Obr. 10.27: Impedance viděná distanční ochranou  $\hat{Z}_{\text{ochr.A}}$  a  $\hat{Z}_{\text{ochr.B}}$  pro oboustranné napájení odporu poruchy a při úhlové diferenci mezi proudy  $\hat{I}_a$  a  $\hat{I}_b$**

## 10.5. Nové směry lokalizace poruch

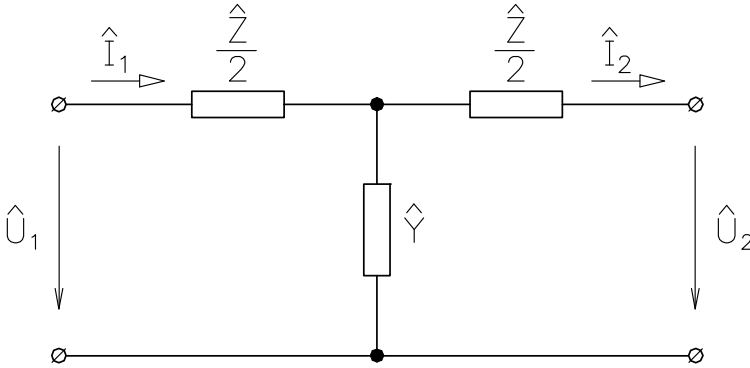
V současné době již existují zařízení, která umožňují synchronní měření žádaných veličin v systému a jejich přenos do centra. Obvykle je jedna část (terminál) umístěna v měřeném uzlu a jsou do něj přivedeny měřené veličiny z přístrojových transformátorů. Pro časovou synchronizaci se používá signál přijatý z družic systému GPS (Global Position System). Naměřená data se přenášejí do centrální části, kde probíhá jejich srovnání a vyhodnocení. Naměřená data lze pak využít např. pro síťové výpočty, estimaci a řízení. Velmi vhodné je využít dat pro záložní chránění, případně lokalizaci místa poruchy. Uplatnění tohoto přístupu je například vhodné v případě vícenásobných dlouhých vedení či dlouhých souběhů dvou vedení, kdy klasický přístup nevede vždy ke správnému určení vzdálenosti poruchy a dokonce v důsledku provázanosti veličin v důsledku magnetických vazeb může být mylně vyhodnocen i potah resp. vedení.

V současnosti se používá k výpočtům sítí především popis pomocí  $Z$  a  $Y$  parametrů (jde o historické důvody, kdy byla volba popisu obvodů přizpůsobena výpočtovým možnostem a technikám). Ovšem použití  $H$  parametrů nabízí možnost přesnější lokalizace poruchy a zároveň pracuje důsledně s vlnovým popisem vedení.

### 10.5.1. Princip užití $H$ parametrů, příklad pro jednofázové vedení

Princip užití  $H$  parametrů pro lokalizaci poruch na chráněném systému je ukázán na modelu jednofázového vedení. Princip ovšem platí obecně a je možno loka-

lizovat tímto přístupem složitou poruchu ve složitém chráněném objektu (nesymetrické vícenásobné vedení se souběhy a poruchou uvnitř systému).



**Obr. 10.28: Úsek jednofázového vedení**

Uvažujme náhradní schéma úseku jednofázového vedení podle *obr. 10.28*, orientace proudů a napětí jsou voleny standardně pro použití H matic k popisu obvodu. Vyřešíme-li obvodové rovnice pro  $\hat{U}_2$  a  $\hat{I}_2$ , s vyloučením napětí na admittanci  $\hat{Y}$ , platí:

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_2 \\ \hat{I}_2 \end{pmatrix} = \hat{H} \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{I}_1 \end{pmatrix} \quad (10.16)$$

kde

$$\hat{H} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\hat{Y} \cdot \hat{Z}}{2} & \hat{Z} + \frac{\hat{Y} \cdot \hat{Z}^2}{4} \\ \hat{Y} & 1 + \frac{\hat{Y} \cdot \hat{Z}}{2} \end{pmatrix} \quad (10.17)$$

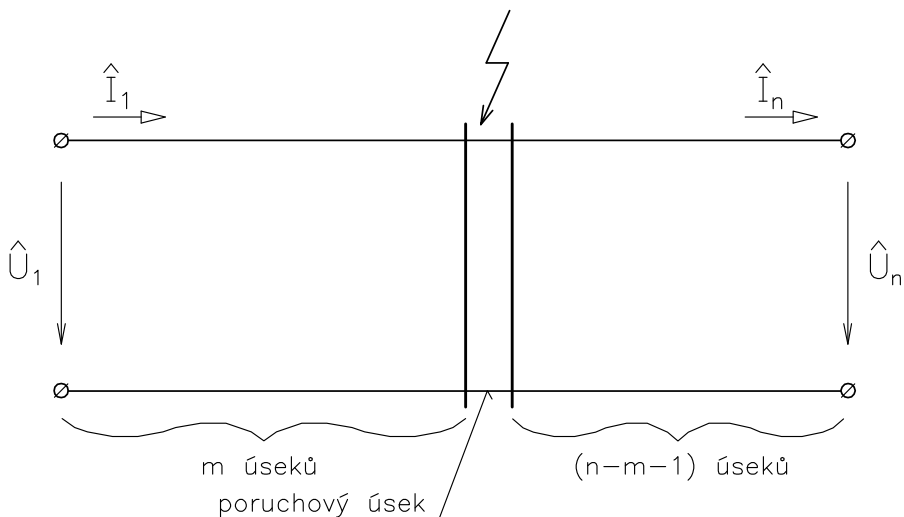
Výhoda užití H popisu spočívá ve snadném popisu kaskádně řazených prvků: Například kaskádní řazení dvou úseků vedení se stejnými parametry, kde proudy a napětí indexované dvojkou jsou výstupy prvního úseku a vstupy druhého úseku a index 3 přiřadíme výstupu druhého úseku, jasně platí:

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_3 \\ \hat{I}_3 \end{pmatrix} = \hat{H} \begin{pmatrix} \hat{U}_2 \\ \hat{I}_2 \end{pmatrix} = \hat{H}^2 \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{I}_1 \end{pmatrix} \quad (10.18)$$

a obdobně n-tá mocnina matice H odpovídá řazení n obvodově stejných úseků za sebou.

Poznamenejme, že limitním přechodem s uvažováním dělení na nekonečně malé diferenciální úseky přejde popis v telegrafní rovnice. Navíc odmocňování matic umožňuje ze znalosti parametrů celého vedení určit korektním způsobem H matici úseku pro zvolené dělení, rozdíl mezi vlnovým popisem vedení a popisem se soustředěnými parametry po dostatečném dělení tedy zaniká. Jde vlastně o jeden způsob numerického řešení telegrafních rovnic.

Uvažme nyní situaci podle obr. 10.29. Vedení je myšlenkově rozděleno na n úseků, přičemž prvních m úseků je bez poruchy, m-tý úsek je porušený a zbylých n-m-1 úseků je opět bez poruchy.



**Obr. 10.29: Vedení s poruchou rozdělené do úseků**

Označme celkovou H matici systému  $\hat{H}_\Sigma$ , pak platí:

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_n \\ \hat{I}_n \end{pmatrix} = \hat{H}_\Sigma \cdot \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{I}_1 \end{pmatrix} = \hat{H}^m \cdot \hat{H}_\downarrow \cdot \hat{H}^{n-m-1} \cdot \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{I}_1 \end{pmatrix} \quad (10.19)$$

a tedy:

$$\hat{H}_{\Sigma} = \hat{H}^m \cdot \hat{H}_{\downarrow} \cdot \hat{H}^{n-m-1} \quad (10.20)$$

Jelikož násobení matic není komutativní, umožní tento vztah nalezení indexu  $m$  pro definovaný typ poruchy, tedy matici  $\hat{H}_{\downarrow}$ .

Výše popsaná metoda je jednoduše realizovatelná, pokud známe matici  $\hat{H}_{\downarrow}$ , což ovšem není obvyklý případ. Použití metody pro známý charakter poruchy (zde spojení fáze se zemí přes admitanci s neznámou reálnou a imaginární částí, tedy zkrat nebo nelegální odběr) vyžaduje použití metod hledání minima funkcí.

Uvažme, že platí:

$$\hat{H}_{\downarrow} = \hat{H}_{\downarrow} \left( \hat{Y}_{\text{por}} \right) = \hat{H}_{\downarrow} \left( \text{Re} \left( \hat{Y}_{\text{por}} \right) + j \cdot \text{Im} \left( \hat{Y}_{\text{por}} \right) \right) \quad (10.21)$$

pak platí

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_n \left( m, \hat{Y}_{\text{por}} \right) \\ \hat{I}_n \left( m, \hat{Y}_{\text{por}} \right) \end{pmatrix} = \hat{H}_{\Sigma} \left( m, \hat{Y}_{\text{por}} \right) \cdot \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{I}_1 \end{pmatrix} = \hat{H}^m \cdot \hat{H}_{\downarrow} \left( \hat{Y}_{\text{por}} \right) \cdot \hat{H}^{n-m-1} \cdot \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{I}_1 \end{pmatrix} \quad (10.22)$$

Zavedme odchylku mezi například naměřenými fázory na konci vedení a vypočítanými při uvažování uvedené poruchy na  $m$ -tém místě. Tato odchylka je zřejmě funkcí místa poruchy, skutečné a uvažované poruchové admitance. Odchylky fázorů proudů a napětí lze váhovat tak, abychom obdrželi srovnatelné hodnoty a využili co nejlépe informace získané měřením.

$$\Delta \left( m, \hat{Y}_{\text{por}} \right) = a \cdot \text{Abs} \left( \hat{U}_n \left( m, \hat{Y}_{\text{por}} \right) - \hat{U}_{\text{nmereni}} \right) + b \cdot \text{Abs} \left( \hat{I}_n \left( m, \hat{Y}_{\text{por}} \right) - \hat{I}_{\text{nmereni}} \right) \quad (10.23)$$

kde  $a, b$  jsou kladné reálné váhy.

Poruchu lokalizujeme hledáním globálního minima  $\Delta \left( m, \hat{Y}_{\text{por}} \right)$  přes celočíselné  $m$ ,  $m \in (1, n - 1)$  a komplexní  $\hat{Y}_{\text{por}}$ .

### 10.5.2. Zobecnění užití H parametrů pro vícenásobná vedení

Matice uvedené v (10.17) jsou snadno získatelné a malý řád matic umožňuje poměrně rychlé výpočty.

Zobecnění pro vícenásobná vedení provedeme následujícím způsobem:

$$\begin{pmatrix} \vec{\hat{U}}_n(m, \hat{Y}_{por}) \\ \vec{\hat{I}}_n(m, \hat{Y}_{por}) \end{pmatrix} = \hat{H}_\Sigma(m, \hat{Y}_{por}) \cdot \begin{pmatrix} \vec{\hat{U}}_1 \\ \vec{\hat{I}}_1 \end{pmatrix} = \hat{H}^m \cdot \hat{H}_\downarrow(\hat{Y}_{por}) \cdot \hat{H}^{n-m-1} \cdot \begin{pmatrix} \vec{\hat{U}}_1 \\ \vec{\hat{I}}_1 \end{pmatrix} \quad (10.24)$$

Zde jsme tedy zaměnili fázory za vektory příslušných fázorů a H matice je čtvercová regulární matice příslušného řádu podle uvažovaného počtu vodičů.

H matici popisující systém získáme následujícím způsobem: Pro zvolené náhradní schéma elementu vedení sestavíme obvodové rovnice, z nichž eliminujeme

napětí mezilehlých uzlů, vyřešíme soustavu pro vektor neznámých  $\begin{pmatrix} \vec{\hat{U}}_n \\ \vec{\hat{I}}_n \end{pmatrix}$ . Pak

vhodným použitím funkce získáme H matici popisující element vedení. H matici porušeného úseku získáme stejným způsobem, ovšem s parametry porušeného úseku.

## 10.6. Literatura

- [1] Bermann, J.: Digitální distanční ochrany a jejich přínos energetice. Praha, ABB 2001.
- [2] Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku. Praha, SNTL 1978.
- [3] Johns, A. T., Salman, S. K.: Digital Protection for Power Systems. London, IEE 1995.
- [4] Hanuš, R., Tlustý, J.: Advanced tools for non-standard states identification in electrical power systems. Control of power systems '04, 2004.
- [5] Ziegler, G.: Numerical Distance Protection. Munich, Siemens MCD 1999.
- [6] Němeček, F.: Přenos a rozvod elektrické energie. Praha, ČVUT 1983.



Prof. Ing. Josef Tlustý, CSc., doc. Dr. Ing. Jan Kyncl,  
Ing. Ladislav Musil, Ph.D., Ing. Jan Špetlík, Ph.D., Ing. Jan Švec, Ph.D.,  
Ing. Petr Hamouz, Ing. Zdeněk Müller, Ing. Miroslav Müller

### **Monitorování, řízení a chránění elektrizačních 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 256

Vydání první. Praha 2011

ISBN 978-80-01-04940-2