

# Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí

Josef Tlustý | Jan Švec | Petr Bannert | Zbyněk Brettschneider |  
Zbyněk Kocur | Petr Mareček | Zdeněk Müller | Tomáš Sýkora





# Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí

Josef Tlustý

Jan Švec

Petr Bannert

Zbyněk Brettschneider

Zbyněk Kocur

Petr Mareček

Zdeněk Müller

Tomáš Sýkora



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 Švec, Petr Bannert, Zbyněk Brettschneider,  
Zbyněk Kocur, Petr Mareček, Zdeněk Müller, Tomáš Sýkora, 2011  
ISBN 978-80-01-04939-6



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>Úvod.....</b>                                                      | <b>10</b> |
| <b>2.</b> | <b>Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích .....</b> | <b>12</b> |
| 2.1.      | Kvalita elektrické energie a EMC .....                                | 12        |
| 2.2.      | Elektromagnetická kompatibilita (EMC) .....                           | 13        |
| 2.2.1.    | Základní pojmy EMC .....                                              | 14        |
| 2.2.2.    | Kompatibilní úroveň.....                                              | 14        |
| 2.3.      | Rušení a rušivé účinky .....                                          | 15        |
| 2.3.1.    | Energetická rušení .....                                              | 15        |
| 2.4.      | Rozdělení elektromagnetických prostředí .....                         | 17        |
| 2.5.      | Literatura .....                                                      | 18        |
| <b>3.</b> | <b>Vyšší harmonické a interharmonické.....</b>                        | <b>19</b> |
| 3.1.      | Fourierova transformace .....                                         | 19        |
| 3.1.1.    | Analytické vyjádření Fourierovy transformace .....                    | 19        |
| 3.1.2.    | Diskrétní Fourierova transformace .....                               | 20        |
| 3.2.      | Analýza složkových soustav vyšších harmonických .....                 | 22        |
| 3.2.1.    | Obecně o složkových soustavách .....                                  | 22        |
| 3.2.2.    | Složkové soustavy vyšších harmonických .....                          | 24        |
| 3.3.      | Analýza harmonického periodického průběhu .....                       | 25        |
| 3.3.1.    | Obecné odvození výkonu harmonického periodického průběhu .....        | 25        |
| 3.3.2.    | Analýza harmonického periodického průběhu v třífázové soustavě .....  | 27        |
| 3.4.      | Analýza harmonického periodického průběhu .....                       | 30        |
| 3.4.1.    | Neharmonický periodický průběh.....                                   | 30        |
| 3.4.2.    | Neharmonický periodický průběh v třífázové soustavě.....              | 33        |
| 3.5.      | Poměrné hodnoty a celkové činitele zkreslení .....                    | 37        |
| 3.6.      | Zdroje vyšších harmonických a jejich šíření v elektrické síti.....    | 38        |
| 3.6.1.    | Zdroje vyšších harmonických napětí a proudu .....                     | 38        |
| 3.6.2.    | Vliv nelinearit na kmitočtové spektrum .....                          | 39        |
| 3.6.3.    | Šíření vyšších harmonických v elektrické soustavě.....                | 40        |
| 3.7.      | Interharmonické.....                                                  | 41        |
| 3.7.1.    | Matematický model napětí .....                                        | 42        |
| 3.7.2.    | Zdroje interharmonických .....                                        | 43        |
| 3.7.3.    | Metody analýzy .....                                                  | 44        |
| 3.8.      | Literatura .....                                                      | 45        |
| <b>4.</b> | <b>Filtrační zařízení pro potlačení vyšších harmonických.....</b>     | <b>46</b> |
| 4.1.      | Pasivní filtry .....                                                  | 46        |
| 4.1.1.    | Návrh pasivního filtru.....                                           | 48        |
| 4.1.2.    | Statický VAr kompenzátor SVC .....                                    | 51        |
| 4.1.3.    | Vliv řídicího úhlu TCR na kmitočtové spektrum proudu .....            | 54        |
| 4.1.4.    | Účinnost pasivních filtrů .....                                       | 58        |
| 4.1.5.    | Výhody a nevýhody pasivních filtrů.....                               | 59        |
| 4.2.      | Aktivní filtry .....                                                  | 59        |
| 4.2.1.    | Aktivní výkonové filtry .....                                         | 60        |

|           |                                                                                  |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.2.    | Paralelní aktivní filtr .....                                                    | 61         |
| 4.2.3.    | Sériový aktivní filtr .....                                                      | 62         |
| 4.2.4.    | Hybridní aktivní filtry .....                                                    | 62         |
| 4.3.      | Literatura .....                                                                 | 64         |
| <b>5.</b> | <b>Vznik kolísání napětí v síti, jeho vyhodnocování a měření.....</b>            | <b>65</b>  |
| 5.1.      | Základní pojmy a názvosloví.....                                                 | 67         |
| 5.2.      | Hodnocení míry vjemu blikání.....                                                | 68         |
| 5.3.      | Problematika měření flickeru.....                                                | 70         |
| 5.4.      | Prostředky pro omezení kolísání napětí .....                                     | 72         |
| 5.5.      | Napěťová nesymetrie .....                                                        | 74         |
| 5.5.1.    | Zdroje napěťové nesymetrie .....                                                 | 75         |
| 5.5.2.    | Měření a posuzování vlivů napěťové nesymetrie .....                              | 75         |
| 5.5.3.    | Přípustné hodnoty napěťové nesymetrie .....                                      | 77         |
| 5.5.4.    | Opatření ke snížení vlivů napěťové nesymetrie.....                               | 77         |
| 5.6.      | Literatura .....                                                                 | 78         |
| <b>6.</b> | <b>Šíření kolísání napětí v síti.....</b>                                        | <b>79</b>  |
| 6.1.      | Šíření kolísání napětí mezi sítěmi VVN, VN a NN .....                            | 79         |
| 6.2.      | Šíření kolísání napětí ze sítě směrem k pasivní zátěži.....                      | 80         |
| 6.3.      | Šíření kolísání napětí ze sítě k aktivní zátěži.....                             | 82         |
| 6.4.      | Šíření kolísání napětí od zátěže.....                                            | 85         |
| 6.5.      | Šíření kolísání napětí v paprskové síti .....                                    | 87         |
| 6.6.      | Modelový příklad na šíření flickeru .....                                        | 88         |
| 6.7.      | Literatura .....                                                                 | 91         |
| <b>7.</b> | <b>Práce elektráren do soustavy .....</b>                                        | <b>92</b>  |
| 7.1.      | Dvoustrojový problém .....                                                       | 93         |
| 7.1.1.    | Konstrukce ekvivalentního schématu .....                                         | 93         |
| 7.2.      | Elektrárny a provoz soustavy .....                                               | 105        |
| 7.2.1.    | Účast elektráren v podpůrných a systémových službách .....                       | 105        |
| 7.2.2.    | Systémové služby (SyS) .....                                                     | 106        |
| 7.2.3.    | Podpůrné služby (PpS) .....                                                      | 107        |
| 7.2.4.    | Podpůrné služby elektráren v řízení P, Q bilancí.....                            | 111        |
| 7.2.5.    | Regulace P, f.....                                                               | 112        |
| 7.2.6.    | Rozdělení skokové změny činného výkonu .....                                     | 120        |
| 7.2.7.    | Regulace napětí .....                                                            | 124        |
| 7.3.      | Literatura .....                                                                 | 129        |
| <b>8.</b> | <b>Synchrofázorová měření a systémy WAMS (Wide Area Monitoring System) .....</b> | <b>130</b> |
| 8.1.      | Úvod .....                                                                       | 130        |
| 8.2.      | Měřicí řetězec a přesnosti při měření fázorů.....                                | 131        |
| 8.3.      | Aplikační možnosti synchrofázorových měření.....                                 | 137        |
| 8.3.1.    | Stabilita provozního stavu .....                                                 | 137        |
| 8.3.2.    | Takensova věta o rekonstrukci atraktoru .....                                    | 150        |
| 8.3.3.    | Monitoring oscilací .....                                                        | 152        |
| 8.3.4.    | Možnosti určování matice popisující vedení, estimace parametrů vedení ..         | 153        |
| 8.3.5.    | Měření a stavové veličiny .....                                                  | 157        |

|            |                                                                  |            |
|------------|------------------------------------------------------------------|------------|
| 8.3.6.     | Lineární model měření .....                                      | 159        |
| 8.3.7.     | Hierarchické uspořádání estimací s PMU .....                     | 163        |
| 8.3.8.     | Spínání oblastí .....                                            | 173        |
| 8.3.9.     | Detekce ostrovního režimu .....                                  | 175        |
| 8.4.       | Architektura systému WAMS .....                                  | 175        |
| 8.4.1.     | Sběr dat, síť WAN .....                                          | 177        |
| 8.4.2.     | Práce s daty, ukládání .....                                     | 178        |
| 8.4.3.     | Výměna dat s ostatními systémy .....                             | 178        |
| 8.4.4.     | Lokální automatiky .....                                         | 180        |
| 8.5.       | Literatura .....                                                 | 182        |
| <b>9.</b>  | <b>Smart Grids .....</b>                                         | <b>184</b> |
| 9.1.       | Právní rámec smart grids sítí v ČR a EU .....                    | 184        |
| 9.1.1.     | Státní energetická koncepce .....                                | 184        |
| 9.1.2.     | Aktualizace státní energetické koncepce .....                    | 184        |
| 9.1.3.     | Legislativa vztahující se k smart grids sítím v EU .....         | 186        |
| 9.2.       | Smart Grids .....                                                | 187        |
| 9.2.1.     | Elektroměry .....                                                | 190        |
| 9.2.2.     | Systém HDO a jeho další využití .....                            | 193        |
| 9.3.       | Elektromobilita .....                                            | 194        |
| 9.4.       | Ukládání energie .....                                           | 195        |
| 9.4.1.     | Elektrochemické akumulátory .....                                | 195        |
| 9.4.2.     | Superkondenzátory .....                                          | 198        |
| 9.4.3.     | Setrvačníky .....                                                | 198        |
| 9.4.4.     | Systém uchování stlačeného vzduchu .....                         | 199        |
| 9.4.5.     | Palivový článek .....                                            | 199        |
| 9.5.       | Literatura .....                                                 | 203        |
| <b>10.</b> | <b>Telekomunikační sítě pro elektroenergetické systémy .....</b> | <b>204</b> |
| 10.1.      | Komunikace energetických systémů .....                           | 204        |
| 10.2.      | Průmyslová síť v oblasti energetických systémů .....             | 204        |
| 10.3.      | Kvalitativní parametry komunikačních sítí .....                  | 207        |
| 10.3.1.    | Spolehlivost datové sítě .....                                   | 207        |
| 10.4.      | Problematika bezpečnosti datových sítí .....                     | 208        |
| 10.4.1.    | Bezpečnostní hrozby v průmyslovém prostředí .....                | 209        |
| 10.5.      | Datová komunikace v koncepci smart grid .....                    | 211        |
| 10.5.1.    | Standardizace .....                                              | 212        |
| 10.6.      | Topologie komunikačních sítí .....                               | 213        |
| 10.6.1.    | Pátevní segment sítě - WAN .....                                 | 214        |
| 10.6.2.    | Distribuční segment sítě - MAN .....                             | 215        |
| 10.6.3.    | Přístupový segment sítě - LAN .....                              | 216        |
| 10.6.4.    | Domácí síť - HAN .....                                           | 217        |
| 10.6.5.    | Osobní síť - PAN .....                                           | 217        |
| 10.6.6.    | Propojení komunikační sítě s energetickou soustavou .....        | 218        |
| 10.7.      | Přehled komunikačních technologií .....                          | 219        |
| 10.7.1.    | Systémy přenosu dat po optických vláknech .....                  | 220        |
| 10.7.2.    | Systémy přenosu dat po metalických vedeních .....                | 221        |
| 10.7.3.    | Bezdrátové přenosové systémy .....                               | 224        |
| 10.8.      | Přehled dostupných standardů .....                               | 227        |

|            |                                                         |            |
|------------|---------------------------------------------------------|------------|
| 10.8.1.    | Technologie a protokol Ethernet .....                   | 227        |
| 10.8.2.    | Rodina protokolů TCP/IP .....                           | 231        |
| 10.8.3.    | Průmyslové komunikační standardy .....                  | 233        |
| 10.8.4.    | IEEE 2030 .....                                         | 234        |
| 10.9.      | Literatura .....                                        | 235        |
| <b>11.</b> | <b>Dodatky .....</b>                                    | <b>236</b> |
| 11.1.      | Přehled základních principů elektrotechniky .....       | 236        |
| 11.1.1.    | Koncepce volby kladných směrů .....                     | 236        |
| 11.2.      | Ekvivalence mezi zdroji .....                           | 239        |
| 11.2.1.    | Princip superpozice .....                               | 240        |
| 11.2.2.    | Zkratový výkon .....                                    | 241        |
| 11.2.3.    | Úbytek napětí .....                                     | 242        |
| 11.3.      | Souřadnicové a složkové systémy v energetice .....      | 243        |
| 11.4.      | Reprezentace poruch ve složkovém systému .....          | 243        |
| 11.4.1.    | Složková schémata základních typů příčných poruch ..... | 247        |
| 11.5.      | Matice v energetických vztazích .....                   | 250        |
| 11.5.1.    | Maticové vyjádření stavu .....                          | 250        |
| 11.5.2.    | Viděná impedance mezi branami .....                     | 251        |
| 11.5.3.    | Impedanční změny systému .....                          | 252        |
| 11.6.      | Literatura .....                                        | 253        |



# 1. Úvod

Jedním ze základních předpokladů udržitelného rozvoje lidské civilizace je její zabezpečení spolehlivými dodávkami elektrické energie s respektováním ekonomických a ekologických aspektů. Elektroenergetický systém obsahuje rozsáhlý soubor zařízení výroby, přenosu, distribuce a užití elektrické energie, který musí vyhovovat velmi vysokým nárokům na kvalitu řízení, bezpečnost a spolehlivost provozu a eliminaci případných nepříznivých doprovodných jevů. Funkční parametry systému musí být rovněž na odpovídající úrovni a musí se trvale přizpůsobovat novým poznatkům, technologiím, výrobním a distribučním možnostem, skladbě a charakteru odběrů.

Problematickou spojenou s rozvojem systému, spolehlivostí a bezpečností provozu a adaptabilitou rozsáhlých elektrizačních soustav lze strukturovat z různých hledisek, vzniklé skupiny však nebudou přísně separovány a v řadě aspektů se mohou silně prolínat. Jedná se například o inovaci stávajících zdrojů, hledání a využívání zdrojů alternativních, zvyšování provozních parametrů silových, ovládacích a zabezpečovacích zařízení, modelování, simulaci a vyhodnocování statických a dynamických dějů v systému a zajišťování kvality a spolehlivosti dodávek elektrické energie na bázi mikroelektroniky, výkonové elektroniky a polovodičových technologií a to vše ve světle ekologie a ekonomie.

V podmínkách deregulace, liberalizace trhu s elektrickou energií se v současné době rozvíjí aplikování nových progresivních prostředků a strategií pro komplexní rozvoj a zvyšování spolehlivosti, bezpečnosti a optimalizaci provozu elektrizačních soustav, nabývá na důležitosti nová koncepce řízení toků činné a jalové energie a regulace napětí. V elektroenergetických soustavách se zvyšuje podíl distribuovaných zdrojů s kolísající dodávkou elektrické energie, čímž se stává důležitější také problematika negativních zpětných vlivů.

Technické aspekty integrace distribuované výroby představují celou oblast problémů, které lze rozčlenit na problematiku různých provozních variant ustáleného chodu, vlivy zařízení na krátkodobou a střednědobou dynamiku, stabilitu provozu a jejich regulovatelnost a vlivy na dlouhodobou dynamiku, regulaci a predikci výroby a spotřeby v regionu. Zvýšení podílu zdrojů distribuované výroby vyvolává potřebu sledování přenosových kapacit jednotlivých linek a napájecích transformátorů, produkce vyšších harmonických proudů, napěťové nesymetrie, interharmonických proudů, kolísání napětí, flickeru a rušení signálu HDO. Z výše uvedených důvodů je nutno zlepšit technologie distribuovaných výrobních jednotek, resp. instalovat filtro kompenzační zařízení.

Celkově lze konstatovat, že s rozvojem zdrojů rozptýlené výroby vzniká po technické stránce potřeba nové koncepce struktury sítě a řízení, která by respektovala různorodost a variabilitu zdrojů i odběrů a částečně „globalizovala“ zdroje distribuované výroby (zejména v oblasti řízení). Hovoří se o tzv. inteligentních rozvodných systémech (Power Operation and Power Quality Management System – POPQMS). Požadavky kladené na tyto systémy jsou následující: sběr dat o aktuální topologii sítě a kvalitě elektrické energie v regulované části sítě, poskytování provozních strategií pro bezpečnost provozu a dodávky elektrické energie v požadované kvalitě v lokální oblasti působení, vytváření hlášení o dosavadním provozu, jeho vyhodnocení a optimalizace technicko-ekonomických ukazatelů, predikce

odběrů a zdrojů, ve střednědobé a dlouhodobé časové oblasti eliminace podpětí a přepětí pomocí regulace činného a jalového výkonu zdrojů, v krátkodobé oblasti zajištění všech nezbytných kroků k odstranění poruch a k minimalizaci jejich nepříznivých důsledků, komunikace (informace o všech zásazích do provozních parametrů sítě) s nadřazeným systémem distribuční soustavy. Splněním posledního požadavku by měl POPQMS globální charakter.

V předchozím textu bylo nastíněno mnoho ne zcela vyřešených témat, která jsou klíčová pro další rozvoj rozptýlené výroby se zajištěním všech standardů dodávky elektrické energie a která se nalézají v poli působnosti výzkumné činnosti.

Nedávný pozoruhodný pokrok v parametrech a rychlosti spínání výkonových polovodičových součástek podnítl zájem o aktivní filtry pro zlepšení kvality elektrické energie. S vývojem koncepcí flexibilních střídavých přenosových systémů (FACTS) a systémů flexibilní, spolehlivé a inteligentní dodávky elektrické energie (FRIENDS) v přenosu a distribuci budou aktivní filtry hrát důležitou roli v kompenzaci, provozních parametrech a kvalitě energie v elektrizačních systémech.

V distribučních systémech se rozvíjejí nové technologie Smart grids, které umožňují nejen řídit a měřit toky energií, hlídat klíčové parametry sítě, chránit a zajistit vysokou spolehlivost a kvalitu dodávky elektrické energie, ale i zajistit efektivní oboustrannou komunikaci distributor-zákazník a tím zefektivnit celý distribuční systém. Smart grids technologie zahrnují širokou škálu technicko-ekonomických procesů, které povyšují distribuci elektrické energie na inteligentní službu zajišťující optimální využití elektrické energie, vysokou efektivnost distribuce energie a ohleduplné chování k životnímu prostředí.

V přenosových systémech jsou aplikovány pokročilé technické prostředky, které směřují k realizaci nových systémů sběru dat o elektrizační soustavě a jejich vyhodnocování v řídicím centru. Jedná se především o jednotky měření fázorů elektrických veličin (PMU = Phasor Measurement Unit), instalované v rámci pilotních projektů v mnoha soustavách včetně české. Cílem je dosáhnout systému všeobecného a širokého monitorování, řízení a chránění soustav (WAMS = Wide Area Monitoring System, WACS = WA Control S, WAPS = WA Protection S), což umožní identifikovat specifické stavy lokálních částí i soustavy jako celku a činit příslušná opatření, aby bylo možné předejít rozsáhlým poruchám i vážným škodám na zařízení soustavy či rozpoznat příčiny vzniku mimořádných stavů.



## 2. Energetická rušení v distribučních a průmyslových sítích

Od okamžiků, kdy byla elektrická energie vyrobena nejen pro vlastní spotřebu výrobců, ale i pro další odběratele, stala se elektrická energie zbožím, pro které bylo třeba stanovit měřítka pro posuzování její kvality. Zpočátku byly jako kvalitativní parametry považovány: stabilita dodávaného napětí a kmitočet. Postupný rozvoj techniky a s ním spojené zvyšování hospodárnosti ve využití elektrické energie, směřoval spotřebitele k používání úspornějších zařízení a přístrojů. Většina těchto zařízení má však buď nelineární nebo proměnlivou provozní charakteristiku. Používáním těchto zařízení a přístrojů se stále více projevovaly zpětné vlivy na elektrické rozvodné sítě. Zpětné vlivy mohou za určitých podmínek vést k rušivému ovlivnění činnosti jiných přístrojů a zařízení. Z hlediska fyzikálního charakteru rušení lze provést rozčlenění do jednotlivých kmitočtových pásem, a to na: energetické, akustické a rádiové rušení a dále mezipásma akustické a mezipásma rádiové. Energetické rušení lze dále rozdělit na oblast subharmonickou a interharmonickou. Tato práce se věnuje pásmu energetického rušení se zaměřením na vyšší harmonické, kolísání napětí a flickeru. Aby bylo možné posoudit úroveň rušení, je třeba stanovit, do jaké míry smí být zařízení zdrojem rušení, které proniká do distribuční sítě a zároveň jakému rušení musí zařízení odolávat.

Vzhledem k trvalým trendům zvyšování spotřeby elektrické energie, ochraně životního prostředí, volného trhu s elektřinou a připojování zařízení s citlivou elektronikou do elektrických sítí nabývá na stále větší důležitosti zajištění dostatku kvalitní elektrické energie.

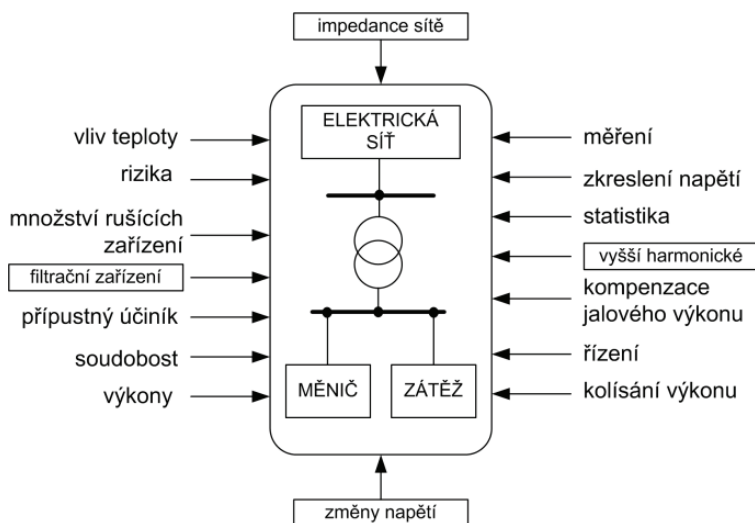
### 2.1. Kvalita elektrické energie a EMC

Kvalita elektrické energie byla posuzována až s její distribucí. Jelikož se elektrická energie stala zbožím, se kterým se obchoduje, bylo nutné stanovit určitá pravidla pro posuzování její kvality. Zpočátku byla kvalita elektrické energie posuzována pouze z hlediska stabilního napětí a kmitočtu. Postupem času, společně s vývojem techniky, byly snahy o rozšíření těchto hledisek. O hledisko zvyšování hospodárnosti při spotřebě elektrické energie. Tyto snahy vedly k používání úspornějších zařízení a přístrojů, která však mají nelineární či proměnlivou provozní charakteristiku. Používáním těchto zařízení a přístrojů se stále více projevovaly zpětné vlivy na elektrické rozvodné sítě. Zpětné vlivy mohou za určitých podmínek vést k rušivému ovlivnění činnosti jiných přístrojů a zařízení.

Z fyzikálního hlediska lze rušení rozdělit podle charakteru do kmitočtových pásem (energetická, akustická, rádiová rušení a mezipásma akustického a rádiového rušení). Základní typy rušení lze rozdělit do 5 oblastí:

- a) nízkofrekvenční rušení spjaté s napájením sítě,
- b) rušení zavlečené do systému z vnějšku (blesk) a vf rušení (přechodné jevy na vedeních),
- c) elektrostatické rušení (výboje),
- d) magnetické rušení (síťového kmitočtu a impulsní magnetické pole),

- e) elektromagnetické rušení (rozhlasové, televizní a telekomunikační vysílače, vř rušení VN vedeními).



**Obr. 2.1: Přehled problematiky EMC v oblasti nf rušení**

Tato rušení jsou způsobena určitým rušením, které je buď stochastické nebo deterministické. Mezi stochastické zdroje rušení řadíme zejména úder blesku a přepětí impulsního charakteru, která vznikají v rozsáhlých řídicích systémech vlivem indukčností spínaných mechanickými kontakty relé a stykačů. Deterministickými zdroji jsou zejména složky vyšších harmonických v síti, které jsou způsobeny zejména spotřebiči s nelineární V-A charakteristikou. Oba dva druhy rušení, stochastické a deterministické, se v elektrické síti šíří venkovními vedeními, kabely, vnitřními rozvody anebo volným prostorem (rušení způsobené elektromagnetickým vlněním). Toto rušení úzce souvisí s elektromagnetickou kompatibilitou tzv. EMC [3].

## 2.2. Elektromagnetická kompatibilita (EMC)

Při posuzování rušivých vlivů je nutné stanovit, do jaké míry smí být zařízení zdrojem rušení pronikajícího do rozvodné sítě a do okolí, a zároveň jakému rušení musí toto zařízení odolávat. Přijetím určitých opatření lze omezit tento vliv elektromagnetického rušení na řídicí, monitorovací, přenosová a další elektronická zařízení. Posuzování rušivých vlivů je předmětem oboru nazvaného elektrická kompatibilita (elektrická slučitelnost) a je označována zkratkou EMC [3].

Elektromagnetická kompatibilita je schopnost zařízení nebo systému vyhovujícím způsobem fungovat ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení čehokoliv v tomto prostředí.

Převzato z normy ČSN IEC 1000 – 2 –1.

### 2.2.1. Základní pojmy EMC

**Úroveň rušení** - úroveň daného elektromagnetického rušení.

**Úroveň vyzařování** - úroveň elektromagnetického rušení vyzařovaného konkrétním přístrojem, zařízením nebo systémem.

**Mez vyzařování** - maximální dovolená úroveň vyzařování.

**Úroveň odolnosti** - maximální úroveň elektromagnetického rušení působícího na konkrétní přístroj, zařízení nebo systém, při kterém se nevyskytuje zhoršení provozu.

**Mez odolnosti** - nejnižší požadovaná úroveň odolnosti, po překročení se u zařízení mohou objevit poruchy.

**Kompatibilní úroveň** - předepsaná úroveň rušení, při které by měla být přijatelně vysoká pravděpodobnost elektromagnetické kompatibility.

**Rezerva vyzařování** - rozdíl úrovně elektromagnetické kompatibility a meze vyzařování.

**Rezerva odolnosti** - rozdíl meze odolnosti a úrovně elektromagnetické kompatibility.

**Rezerva kompatibility** - poměr meze odolnosti a meze vyzařování. (Rezerva kompatibility je součinem rezervy odolnosti a rezervy vyzařování.)

**Elektromagnetická interference (EMI)** je proces, při kterém se signál generovaný zdrojem rušení, přenáší do rušených systémů. EMI se tedy zabývá především identifikací zdrojů rušení, popisem a měřením rušivých signálů. K dosažení kompatibility je zapotřebí stanovit technické limity. EMI se tak týká hlavně příčin rušení a jejich odstraňování.

**Elektromagnetická susceptibilita (EMS)** vyjadřuje míru odolnosti zařízení pracovat bez zhoršení charakteristik při určité úrovni rušení. EMS se tedy zabývá především technickými opatřeními, které zvyšují u objektu jeho elektromagnetickou imunitu. EMS se tak týká spíše odstraňování důsledků rušení, bez odstraňování jejich příčin.

### 2.2.2. Kompatibilní úroveň

Z definice elektromagnetické kompatibility můžeme stanovit vztažnou kompatibilní úroveň jako hodnotu, která slouží ke koordinování a určení úrovně rušení v sítích a úrovni odolnosti různých typů zařízení. Kompatibilní úroveň by měla pokrýt alespoň 95 % případů rušení a je uvažována jako referenční hodnota, která by měla sloužit k bezproblémové funkci rozvodné sítě, na níž jsou připojeni jednotliví nezávislí odběratelé. Přístroje a zařízení by měly však mít tuto úroveň odolnosti nejméně rovnou, lépe však větší, než je kompatibilní úroveň.

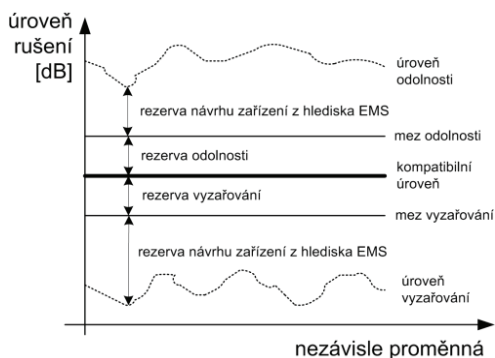
Úrovně rušení lze rozdělit na:

- statistické rozložení úrovně rušení (sčítání i několika druhů rušení),
- určená kompatibilní úroveň (pokrytí alespoň 95 % případů rušení),

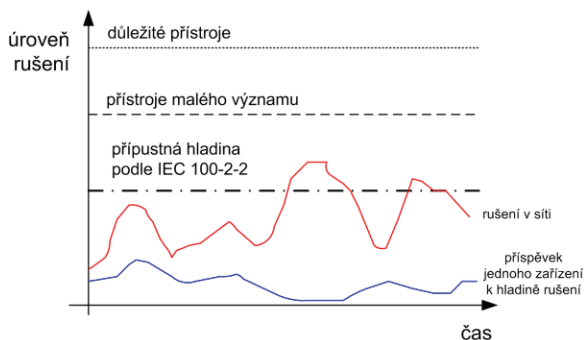
- úroveň odolnosti,
- statické rozložení úrovně citlivosti na rušení.

## 2.3. Rušení a rušivé účinky

Veličinu, která nežádoucím způsobem ovlivňuje elektrické zařízení, nazýváme rušivá veličina. Pomocí této rušivé veličiny je definována kompatibilní úroveň a přípustná hladina. Přípustná hladina je výchozí hodnotou pro určení mezní velikosti odolnosti proti rušení a meze vyzařování. Grafické znázornění vysílání rušení je uvedeno na *obr. 2.2* a schéma elektromagnetického prostředí je uvedeno na *obr. 2.3*.



**Obr. 2.2: Rušení a přípustné hladiny**



**Obr. 2.3: Schéma elektromagnetického prostředí**

### 2.3.1. Energetická rušení

Z definice elektromagnetické kompatibilní úrovně můžeme stanovit vztažnou hodnotu, která slouží ke koordinování a určování úrovní rušení v sítích a úrovní odolnosti různých typů zařízení. Pro praktické účely si určíme „mez rušení“ jako nejvyšší úroveň rušení vyskytující se s určitou pravděpodobností v elektromagnetickém prostředí přístroje, zařízení nebo sítě. Je to hodnota, ke které se mají vztahovat ostatní úrovně rušení tak, aby bylo zamezeno vzniku interferencí. V někte-

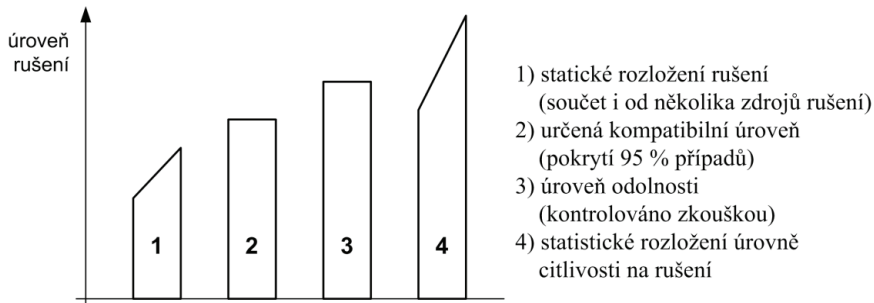
rých případech je úroveň rušení výsledkem superpozice od více různých zdrojů (např. harmonické), v jiných je naopak produkována pouze jediným zdrojem (např. neopakující se pokles napětí). Na tomto místě je nutné říci, že všeobecná úroveň rušení není jediná hodnota, ale mění se s časem i polohou. V praxi je nutné uvažovat statistické rozložení rušení. Maximální úroveň rušení může být určena z hodnot získaných síťovým měřením nebo případně z teoretické studie.

Díky proměnlivosti je často velice obtížné nebo dokonce nemožné určit skutečné nejvyšší hodnoty úrovně rušení, která se mohou vyskytnout jen velice zřídka. Bylo by také neekonomické definovat kompatibilní úroveň jako nejvyšší hodnotu, které valná většina zařízení nebude vystavena po většinu času provozu.

Jako optimální se jeví zvolení takové velikosti kompatibilní úrovně, která by byla překročena jen v malém nebo velmi malém počtu případů - záměrem kompatibilních úrovní je pokrýt alespoň 95 % případů.

Přístroje a zařízení by měly mít úroveň odolnosti nejméně rovnu, lépe však větší než je kompatibilní úroveň. Velikost této úrovně se má kontrolovat při odpovídající zkoušce. Za určení této hodnoty a postupu zkoušky odpovídá příslušný technický výbor (nebo je předmětem dohody mezi zainteresovanými partnery).

Při stanovování citlivosti na vlivy rušení by měl výrobce brát v úvahu určené meze odolnosti a provozní podmínky, ve kterých má zařízení pracovat. Kompatibilní úroveň je uvažována jako referenční hodnota, která by měla sloužit k bezproblémové funkci veřejné rozvodné sítě, na níž jsou připojeni jednotliví nezávislí odběratelé. Vztah mezi jednotlivými úrovněmi rušení při respektování statistických rysů je znázorněno na obr. 2.4.



**Obr. 2.4: Vztah mezi jednotlivými úrovněmi rušení**

Energetické rušení lze hodnotit i z pohledu vztahu k základnímu kmitočtu síťového napětí 50 Hz. Zpětné vlivy na napájecí síť lze potom rozdělit do tří oblastí:

- **podsynchronní oblast** s kmitočtem rušení pod 50 Hz, kdy rušení napájení se projevuje jako kolísání napětí, krátkodobá podpětí, přepětí, výpadky napětí a flicker.
- **synchronní oblast** představuje rušení v oblasti změn základních veličin ( $U$ ,  $I$ ,  $P$ , aj.) napájecí sítě s kmitočtem 50 Hz. Nelineární zátěže mohou celkovou bilanci jalového a činného výkonu měnit skokem během jedné periody a tím pak ovlivnit hlavní kritéria pro posuzování kvality odběru elektrické energie od dodavatele. Tyto vlivy mají dopad

i pro podsynchronní i nadsynchronní oblasti.

- **nadsynchronní oblast** představuje interferenční jevy s kmitočtem nad 50 Hz. Energetické rušení je omezeno shora hodnotou 2500 Hz a tak je nadsynchronní oblast přesně definována. Do této oblasti jsou zahrnuty vyšší harmonické napětí a proudy a i interharmonické napětí a proudy.

## 2.4. Rozdělení elektromagnetických prostředí

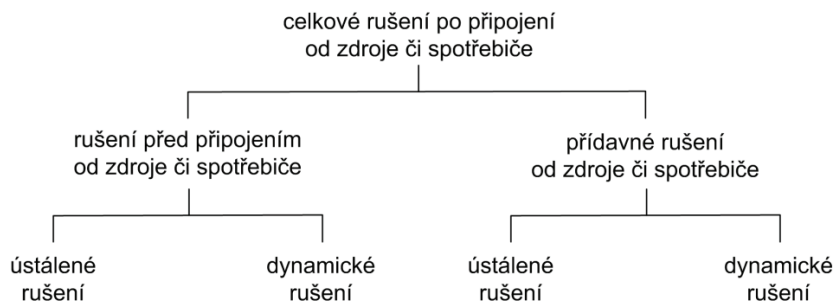
Rozdělením kompatibilních úrovní do tříd se optimalizuje návrh elektromagnetického prostředí a vyloučí se tak zbytečné a nákladné předimenzování systému.

**Třída I:** Tato třída se týká chráněných napájení a má kompatibilní úrovně nižší než úrovně pro veřejné rozvodné sítě. Týká se to zařízení velmi citlivého na rušení z rozvodné sítě, např. přístrojového vybavení technologických laboratoří, některých automatizačních a ochranných zařízení, některých počítačů apod.

**Třída II:** Tato třída se týká soustav se společným napájecím bodem (PCC), napájecím bodem uvnitř závodu (IPC) a všeobecně v průmyslovém prostředí. Kompatibilní úrovně této třídy jsou identické s úrovněmi pro veřejné rozvodné sítě, a proto mohou být v této třídě průmyslového prostředí navrhovány prvky pro použití ve veřejných rozvodných sítích.

**Třída III:** Tato třída se týká pouze soustav s napájecím bodem uvnitř závodu (IPC) v průmyslovém prostředí a má pro některé rušivé jevy vyšší kompatibilní úroveň než třída II. Tato třída by měla být uvažována v případech, kdy je splněna jakákoliv z následujících podmínek:

- a) převážná část zatížení je napájena prostřednictvím měničů,
- b) v provozu jsou používány svařovací agregáty,
- c) dochází k častému rozebírání velkých motorů,
- d) dochází k velmi rychlé změně zatížení.



**Obr. 2.5: Schéma superpozice rušení**

Celkové rušení můžeme definovat jako souhrn několika veličin, které jsou závislé na čase, prostoru a i vzájemně. V okamžiku připojení zdroje či spotřebiče dochází k větším, či menším změnám poměrů v síti. Míra rušení se mění o přídavné rušení připojením nebo odpojením zdroje nebo spotřebiče (viz obr. 2.5).

## 2.5. Literatura

- [1] ČSN EN 61000-4-1 Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 4-1: Zkušební a měřicí technika - Přehled o souboru IEC 61000-4
- [2] ČSN EN 50160 (33 0122): Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, Český normalizační institut, Praha 2011
- [3] Kůs V.: Rušivé vlivy měničů a jejich omezení, ZČU Plzeň 1996
- [4] ČSN IEC 50(161) Mezinárodní elektrotechnický slovník. Kapitola 161: Elektromagnetická kompatibilita
- [5] ČSN IEC 1000-1-1 Elektromagnetická kompatibilita (EMC). Část 1: Všeobecně. Díl 1: Použití a interpretace základních definic a termínů

### 3. Vyšší harmonické a interharmonické

Periodický ustálený stav v elektrických obvodech se vyznačuje tím, že všechny obvodové veličiny se mění v čase periodicky s konstantní amplitudou a se stejnou periodou. Toto se děje v lineárních obvodech, které jsou buzeny z periodických zdrojů napětí a proudů. U nelineárních obvodů se při periodickém buzení mohou vlivem nelinearit vyskytnout samobuzené periodické kmity. Základem analýzy periodického ustáleného stavu je vyjádření periodických veličin pomocí harmonických složek. Základem popisu periodických harmonických a neharmonických průběhů je skládání harmonických průběhů se stejným kmitočtem. Harmonické signály jsou popsány kmitočtovým spektrem, kdy jednotlivé kmitočty jsou celistvým násobkem základního kmitočtu a naopak interharmonické signály jsou tvořeny kmitočtovým spektrem s kmitočty, které jsou necelistvým násobkem základního kmitočtu.

#### 3.1. Fourierova transformace

##### 3.1.1. Analytické vyjádření Fourierovy transformace

Fourierova transformace slouží pro převod signálů z časové oblasti do oblasti frekvenční. Jedná se o vyjádření časově závislého signálu pomocí harmonických signálů, tj. pomocí funkcí sinus a cosinus, obecně tedy funkce komplexní exponenciály. Signál může být buď ve spojitém, či diskrétním čase.

Obraz funkce  $f(t)$  ve Fourierově exponenciálním tvaru lze definovat vzorcem:

$$F\{f(t)\} = G(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

$F\{f(t)\}$ ..... Fourierova transformace

$G(j\omega)$ ..... Fourierův obraz funkce  $f(t)$

Jestliže je funkce  $f(t)$  definovaná jen pro  $t > 0$  a pro  $t < 0$  je nulová, můžeme definovat dvě Fourierovy transformace:

kosinová Fourierova transformace funkce  $f(t)$ :

$$G_1(j\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot \cos(\omega t) dt, \text{ pro } t > 0 \quad (3.2)$$

sinová Fourierova transformace funkce  $f(t)$ :

$$G_2(j\omega) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot \sin(\omega t) dt, \text{ pro } t > 0 \quad (3.3)$$



Zpětná Fourierova transformace je obecně definována vztahem:

$$F^{-1}\{G(j\omega)\} = f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} G(j\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (3.4)$$

$F^{-1}\{f(t)\}$ .....zpětná Fourierova transformace

Zpětná Fourierova transformace bude u funkcí definovaných pro  $t > 0$  definovaná obdobně:

$$F^{-1}\{G_1(j\omega)\} = f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} G_1(j\omega) \cdot \cos(\omega t) d\omega, \text{ pro } t > 0 \quad (3.5)$$

$$F^{-1}\{G_2(j\omega)\} = f(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} G_2(j\omega) \cdot \sin(\omega t) d\omega, \text{ pro } t > 0 \quad (3.6)$$

Pro usnadnění výpočtu obrazů často používaných funkcí, byly sestaveny příslušné dvojice (originál – obraz), tzv. slovníky operátorového počtu např. [1], str. 547.

### 3.1.2. Diskrétní Fourierova transformace

Diskrétní Fourierova transformace ( Discrete Fourier Transform – DFT) vznikla pro potřeby techniků a fyziků a zažila od svého vzniku poměrně bouřlivý rozvoj. DFT je úzce spjata s Fourierovou řadou a Fourierovou transformací. V současné době představuje DFT jednu z metod diskrétního zpracování signálů. Pro zjištění průběhu a frekvenčního spektra měřeného signálu je třeba provést vzorkování vzorkovací periodou  $T_v$ , tzv. ekvidistantní vzorkování. Cílem je transformovat posloupnost diskrétních hodnot  $f(t_n)$ , kde  $n = 0, 1, 2, \dots N-1$  do kmitočtové oblasti.

$$X_k = \text{DFT}\{(f_k)\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \cdot e^{-jn \frac{2\pi}{N} k}, \text{ pro } n = 0, 1, 2, \dots N-1 \quad (3.7)$$

$X_k$  .....posloupnost vzorkovaných hodnot

$N$ .....počet vzorků

Pro transformaci z kmitočtové oblasti do časové oblasti slouží zpětná Fourierova transformace ve tvaru:

$$f(t_n) = \text{DFT}^{-1}\{(f_k)\} = \sum_{n=0}^{N-1} F(f_n) \cdot e^{jn \frac{2\pi}{N} k}, \text{ pro } n = 0, 1, 2, \dots N-1 \quad (3.8)$$

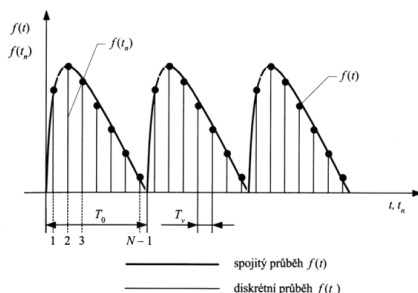
Numerické metody harmonické analýzy nahrazují rovnice v integrálním tvaru (3.5) a (3.6). Je možné použít určitého zjednodušení jako u výpočtu Fourierovy řady (3.1), kdy se sčítá pouze mocninná řada, a proto je nutné zavést proměnnou

$W = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$ . Potom lze vztahy pro diskrétní a zpětnou diskrétní Fourierovu transformaci napsat:

$$X_k = \text{DFT}\{(f_k)\} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(t_n) \cdot W^{kn}, \text{ pro } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.9)$$

$$f(t_n) = \text{DFT}^{-1}\{(f_k)\} = \sum_{n=0}^{N-1} F(f_n) \cdot W^{-kn}, \text{ pro } n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.10)$$

Při výpočtech DFT je počet násobení úměrný  $2N$ , proto při velkém počtu vzorků  $N$  je doba výpočtu dlouhá a i pro výkonné počítače časově náročná. Z tohoto důvodu se často používá tzv. rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transform - FFT), která je založena na principu podobnosti mnoha prvků v matici  $W^{kn}$ . Potom pro výpočet je třeba pouze  $(N/2) \cdot (\log_2 N)$  násobení, čímž se výrazně zkrátí čas výpočtu [2].



**Obr. 3.1: Diskrétní Fourierova transformace**

V případě digitálního zpracovávání signálu je velmi důležitou součástí správná volba vzorkovacího kmitočtu. Z hlediska volby vzorkovacího kmitočtu  $f_v$  mohou nastat dva případy:

- 1) při volbě vzorkovacího kmitočtu  $f_v$  je třeba splnit Shannonův teorém, který určuje potřebný vzorkovací kmitočet vzhledem k nejvyššímu kmitočtu  $f_m$  spektra vzorkovacího signálu, pro který platí:  $f_v \geq 2 \cdot f_m$
- 2) pokud není podmínka Shannonova teorému splněna, dochází k překrytí sousedních period spektra, což má za následek znehodnocení vzorkovacího signálu, což má za následek tzv. aliasing efekt:  $f_v \leq 2 \cdot f_m$

Aby bylo možné zamezit vzniku tzv. aliasing efektu (překrytí sousedních period spektra), doporučuje se použití antialiasing filtru, který filtruje měřený signál.

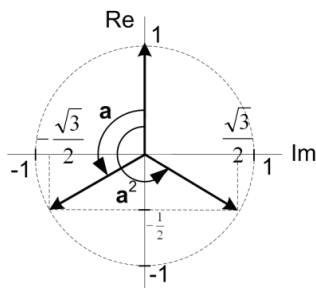
Použití filtru je doporučeno normou, avšak naskytá se otázka, zda nedojde k ovlivnění naměřených výsledků při použití tohoto filtru [5].

## 3.2. Analýza složkových soustav vyšších harmonických

### 3.2.1. Obecně o složkových soustavách

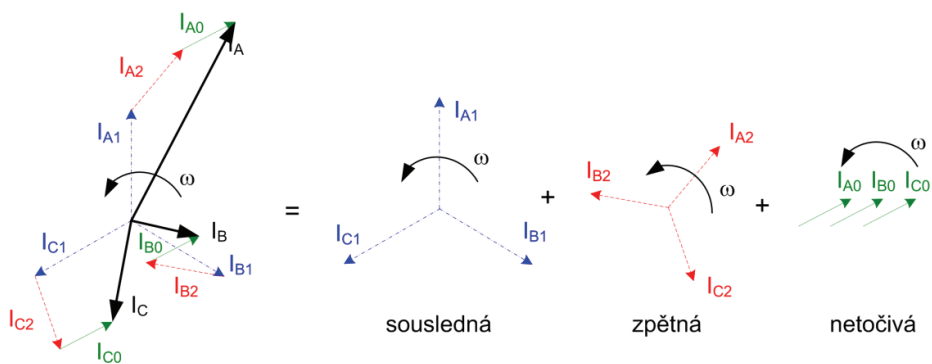
Třífázové sítě bývají většinou nesouměrně zatíženy jednofázovými spotřebiči, ať jsou to svařovací transformátory, elektrické pece nebo drobný odběr, tím se také zvyšují ztráty ve vedeních, transformátorech i generátorech. Nesouměrné zatížení také vzniká při zkratech, při zemním spojení, při dvoufázovém provozu třífázové sítě atd. Výpočetní rozbor těchto jevů je značně ulehčen použitím souměrných složkových soustav, jimiž lze rozložit nesouměrnou soustavu vektorů na několik souměrných soustav, které se potom snadno počítají samostatně.

Souměrnými složkami se tedy složitý jev rozloží na několik jednoduchých, početně snáze ovladatelných jevů. Lze ovšem namítnout, že sledováním jednoduchých jevů zaniká původní celek. Složkové soustavy mají fyzikální význam, protože je lze naměřit. Teoreticky je zpracovalo mnoho autorů, z nich nejznámější jsou Stokvis (1914) a Fortescue (1918).



Obr. 3.2: Natočení fázorů

Příkladem použití složkových soustav je jejich využívání se pro řešení nesymetrické poruchy, kdy se fázory třífázové soustavy rozloží do složkových soustav (1 - sousledná, 2 - zpětná a 0 - netočivá) a porucha se vyřeší. Poté se provede zpětná transformace zpět do třífázové soustavy.



**Obr. 3.3: Rozklad nesymetrie do složkových soustav**

Pro základní kmitočet platí následující transformační vztahy:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \hat{a}^2 & \hat{a} \\ 1 & \hat{a} & \hat{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$[\hat{U}_{ABC}] = [\hat{T}] \cdot [\hat{U}_{120}] \quad (3.12)$$

$$\hat{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \hat{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3.13)$$

$\hat{U}_A, \hat{U}_B, \hat{U}_C$  ...fázory napětí v třífázové soustavě

$\hat{a}^2, \hat{a}$  .....úhlové natočení fázoru (viz. obr. 3.2)

$\hat{U}_1, \hat{U}_2, \hat{U}_0$  .....fázory napětí složkových soustav

$[\hat{T}]$  .....transformační matice

V třífázové soustavě nemusí mít základní harmonická v jednotlivých fázích stejnou velikost a může tak způsobit nesymetrii. Hlavními příčinami nesymetrií jsou rozdílné velikosti zátěží v jednotlivých fázích. Tato nesejná velikost je možná i u nelineárních zátěží, které pak produkují nesymetrické vyšší harmonické proudy nebo napětí. Pro řešení této problematiky lze použít rozkladu do souměrných složek.

### 3.2.2. Složkové soustavy vyšších harmonických

Aby bylo možné přehledně analyzovat vliv nesymetrií v systému ABC k-té harmonické, je třeba definovat:

- symetrický (referenční) stav vyšší harmonické,
- odchylky od tohoto stavu.

Referenční stav pro k-tou harmonickou označme  $[\hat{R}_{ABC}](k)$  pro jednotlivé fáze a referenční fázor do roviny k-té harmonické získáme pomocí následujících vztahů:

$$[\hat{R}_{ABC}](k) = [S(k)]_d \cdot [\hat{F}_{R,ABC}] \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{R}_A \\ \hat{R}_B \\ \hat{R}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{a}^{2k} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{a}^k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{F}_{R,A} \\ \hat{F}_{R,B} \\ \hat{F}_{R,C} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$[\hat{R}_{ABC}]$  .....matice referenčního stavu v jednotlivých fázích

$[S(k)]_d$  .....diagonální komplexní transformační matice

k .....řád vyšší harmonické, kde  $k \in \mathbb{N}$

$[\hat{F}_{R,ABC}]$  .....matice referenčních fázorů v jednotlivých fázích

Analýza jednotlivých harmonických složek ukazuje, že referenční složkovou soustavou pro danou harmonickou je následující složková soustava:

- sousledná složková soustava  $3k+1$
- zpětná složková soustava  $3k+2$
- netočivá složková soustava  $3k$

Poměr mezi symetrickým a nesymetrickým stavem k-té harmonické je obecně vyjádřen pomocí komplexního čísla, které respektuje odchylku modulů fází B a C vůči fázi A v symetrickém stavu:

$$[\Psi]_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & (1 + \Delta\Psi_B) \cdot e^{j\beta} & 0 \\ 0 & 0 & (1 + \Delta\Psi_C) \cdot e^{j\gamma} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$\Delta\Psi_B, \Delta\Psi_C$  ..... modul odchylky od referenční fáze A

$\alpha, \beta, \dots$ ..... fázový úhel odchylky od referenční fáze A

Fourierovým rozkladem průběhu získáme veličinu  $G_A^k(t)$ , kterou můžeme vyjádřit v exponenciálním tvaru:

$$G_A^k(t) = g_A^{(k)} \cdot \sin(\omega^{(k)}t + \varphi_A^{(k)}) \quad (3.17)$$

$$G_A^k(t) = g_A^{(k)} \cdot e^{j\varphi_A^{(k)}} \quad (3.18)$$

$G_A^k(t)$  ..harmonické spektrum časového průběhu veličiny G ve fázi A

$g_A^{(k)}$  ..... amplituda veličiny G

$\omega$  ..... úhlová rychlost otáčení

$\varphi$ ..... počáteční fázový posun

Rozkladem třífázové veličiny G a transformací do složkových soustav popsanou výše získáme:

$$[G]_{ABC}^{(k)} = [T] \cdot [G]_{120}^{(k)} = [T] \cdot [\Psi]_d [S]_d^{(k)} \cdot [G_R] \quad (3.19)$$

$[S]_d^{(k)}$  .... diagonální komplexní transformační matice

$[G]_{120}$ ..... veličina G ve složkovém tvaru

$[G]_{ABC}$  .... veličina G v souřadnicích ABC

$[T]$ ..... transformační matice ze souřadnic ABC do složkového tvaru

$[\Psi]_d$  ..... poměr mezi sym. a nesym. stavem k-té harmonické

$[G_R]$ ..... referenční matice veličiny G

Odchylky modulů a úhlů se mohou vyskytovat v různých vzájemných kombinacích. Z toho vyplývá, že při symetrii 4. harmonické je dominantní netočivá složka, při velkých nesymetriích může být dominantní složka sousledná, případně zpětná.

### 3.3. Analýza harmonického periodického průběhu

#### 3.3.1. Obecné odvození výkonu harmonického periodického průběhu

Při odvození elektrického výkonu budeme vycházet z matematické představy napětí a proudu rozloženého na dvě složky (reálnou a imaginární) [6].

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U_M \cdot \cos \omega t \quad (3.20)$$

$$i_e(t) = \sqrt{2} \cdot I_M \cdot \cos \omega t \cdot \cos \varphi \quad (3.21)$$

$$i_j(t) = \sqrt{2} \cdot I_M \cdot \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin \varphi \quad (3.22)$$

$$i(t) = i_e(t) + i_j(t) = \sqrt{2} \cdot I_M \cdot \cos(\omega t - \varphi) \quad (3.23)$$

$u(t)$ ,  $i(t)$ ...okamžité hodnoty napětí a proudu

$U_M, I_M$ .....amplituda napětí (proudu)

$\varphi$  .....fázový rozdíl mezi napětím a proudem

$\omega$  .....úhlový kmitočet základní harmonické

Okamžité hodnoty činného  $p_e(t)$  a jalového  $q(t)$  výkonu na základě rovnic (3.20) až (3.22) můžeme definovat jako:

$$p_e(t) = u(t) \cdot i_e(t) = U_M \cdot I_M \cdot \cos \varphi \cdot (1 + \cos 2\omega t) \quad (3.24)$$

$$q(t) = u(t) \cdot i_j(t) = U_M \cdot I_M \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (3.25)$$

Střední hodnoty činného  $p_{\text{č stříť}}(t)$  a jalového  $q_{\text{stříť}}(t)$  výkonu získáme integrací okamžitých hodnot výkonů přes jednu periodu:

$$p_{\text{č stříť}}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T U_M \cdot I_M \cdot \cos \varphi \cdot (1 + \cos 2\omega t) \cdot dt = P \quad (3.26)$$

$$q_{\text{stříť}}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T U_M \cdot I_M \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \cdot dt = 0 \quad (3.27)$$

Na základě rovnic (3.24) a (3.25) můžeme definovat okamžitou hodnotu výkonu  $p(t)$  nebo přímo součinem rovnic (3.20) a (3.23):

$$\begin{aligned} p(t) &= p_e(t) + q(t) = U_M \cdot I_M \cdot (\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)) = \\ &= S \cdot (\cos \varphi + \cos(2\omega t - \varphi)) = P + S_{\text{kmit}} \end{aligned} \quad (3.28)$$

Kde okamžitá hodnota výkonu  $p(t)$  v rovnici (3.28) tvoří součet výkonů činného  $P$  a kmitavého  $S_{\text{kmit}}$ .

Činný výkon má stálou v čase neměnnou hodnotu:

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (3.29)$$

Kmitavý výkon s frekvencí  $2\omega$  a jeho střední hodnota je nulová:

$$S_{\text{kmit}} = S \cdot \cos(2\omega t - \varphi) \quad (3.30)$$

$$S_{\text{kmit střední}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_M \cdot I_M \cdot \cos(2\omega t - \varphi) \cdot dt = 0 \quad (3.31)$$

Zdánlivý výkon můžeme napsat jako součet čtverců amplitud okamžitých hodnot činného  $p(t)$  a jalového  $q(t)$  výkonu:

$$S = \sqrt{(U_M \cdot I_M \cdot \cos \varphi)^2 + (U_M \cdot I_M \cdot \sin \varphi)^2} = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.32)$$

Fyzikální význam činného výkonu lze chápat jako nevratnou přeměnu elektrické energie na jiný druh energie (tepelnou, mechanickou, aj.). Přenos činného výkonu od zdroje ke spotřebiči je možný pouze za současného přenosu kmitavého výkonu. Jalový výkon má charakter kmitavého výkonu se střední hodnotou rovnou nule. Tento výkon nevykonává žádnou činnou práci, avšak představuje přídavné zatížení. Tento výkon je třeba respektovat při dimenzování elektrických zařízení a rozvodů. Při rozboru energetických jevů v síti je nutné sledovat nejen změnu elektromagnetické energie v tepelnou, ale i energie (tepelnou, elektrickou a magnetickou), které jsou vzájemně svázané a neustále se mění. Proto není dostačující omezit se na určení středních hodnot výkonu, ale je nutné sledovat i okamžité hodnoty výkonu. Tato situace se výrazně projevuje, pokud předpokládáme ideální odběr tj. souměrný a vyvážený odběr elektrické energie. V praxi je tento odběr narušen vyššími harmonickými, napětovou nesymetrií a nevyvážeností odběru.

### 3.3.2. Analýza harmonického periodického průběhu v třífázové soustavě

Úvahy, ze kterých jsme vycházeli při odvození obecného harmonického průběhu, lze rozšířit i na třífázovou soustavu. V literatuře [6] byl na str. 48 odvozen vztah pro okamžitou hodnotu jednofázového výkonu jako:

$$p_1(t) = u(t) \cdot i(t) = \frac{1}{2} [\hat{U} \cdot \hat{I} + \hat{U} \cdot \hat{I}^* + \hat{U}^* \cdot \hat{I} + \hat{U}^* \cdot \hat{I}^*] \quad (3.33)$$



$\hat{U}, \hat{I}$  .....fázory napětí a proudu

$\hat{U}^*, \hat{I}^*$  ...komplexně sdružené fázory napětí a proudu

Okamžitou hodnotu třífázového výkonu můžeme pro fáze ABC potom napsat jako:

$$\begin{aligned} p_3(t) &= [u_A(t) \cdot i_A(t) + u_B(t) \cdot i_B(t) + u_C(t) \cdot i_C(t)] = \\ &= [p_A(t) + p_B(t) + p_C(t)] \end{aligned} \quad (3.34)$$

Analýzu provedeme pro nesouměrně zatíženou třífázovou soustavu za předpokladů nesouměrné proudové zatížitelnosti (sousledná a zpětná  $\neq 0$ , netočivá soustava = 0) a souměrnou napěťovou soustavu (sousledná  $\neq 0$ , zpětná a netočivá soustava = 0). Pro zápis jednotlivých napětí a proudů využijeme rozklad do složkových soustav. Potom okamžité hodnoty výkonu v jednotlivých fázích můžeme psát jako:

$$p_A(t) = \frac{1}{2} \left[ (\hat{U}_1 + \hat{U}_1^*) \cdot (\hat{I}_1 + \hat{I}_1^* + \hat{I}_2 + \hat{I}_2^*) \right] \quad (3.35)$$

$$p_B(t) = \frac{1}{2} \left[ (\hat{a}^2 \hat{U}_1 + \hat{a} \hat{U}_1^*) \cdot (\hat{a}^2 \hat{I}_1 + \hat{a} \hat{I}_1^* + \hat{I}_2 + \hat{I}_2^*) \right] \quad (3.36)$$

$$p_C(t) = \frac{1}{2} \left[ (\hat{a} \hat{U}_1 + \hat{a}^2 \hat{U}_1^*) \cdot (\hat{a} \hat{I}_1 + \hat{I}_2 + \hat{I}_2^* + \hat{a}^2 \hat{I}_1^*) \right] \quad (3.37)$$

Dále definujeme napětí a proudy složkových soustav jako:

$$\hat{U}_1 = U \cdot e^{j\omega t}, \quad \hat{U}_1^* = U \cdot e^{-j\omega t} \quad (3.38)$$

$$\hat{I}_1 = I \cdot e^{j(\omega t - \varphi_1)}, \quad \hat{I}_1^* = I \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_1)} \quad (3.39)$$

$$\hat{I}_2 = I \cdot e^{j(\omega t - \varphi_2)}, \quad \hat{I}_2^* = I \cdot e^{-j(\omega t - \varphi_2)} \quad (3.40)$$

Rovnice (3.35) až (3.37) roznásobíme a za jednotlivá napětí a proudy složkových soustav dosadíme do nich podle vztahů (3.38) až (3.40). Tím získáme výkony a potom můžeme okamžitou hodnotu třífázového výkonu napsat jako:

$$\begin{aligned}
p_3(t) &= [p_A(t) + p_B(t) + p_C(t)] = [\hat{S}_1 + \hat{S}_{2K} + \hat{S}_1^* + \hat{S}_{2K}^*] = \\
&= \frac{1}{2} [3 \cdot \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_1^* + 3 \cdot \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_2 + 3 \cdot \hat{U}_1^* \cdot \hat{I}_1 + 3 \cdot \hat{U}_1^* \cdot \hat{I}_2^*] = \\
&= \frac{1}{2} [6 \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + 6 \cdot U \cdot I_2 \cdot \cos(2\omega t + \varphi_2)]
\end{aligned} \tag{3.41}$$

Činný a jalový výkon třífázové soustavy potom můžeme napsat jako:

$$\begin{aligned}
p_{3f} &= \text{Re}[p_3(t)] = [3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 + 3 \cdot U \cdot I_2 \cdot \cos(2\omega t + \varphi_2)] = \\
&= [P_3 + S_{2K} \cdot \cos(2\omega t + \varphi_2)]
\end{aligned} \tag{3.42}$$

$$\begin{aligned}
q_{3f} &= \text{Im}[p_3(t)] = j[3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 + 3 \cdot U \cdot I_2 \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2)] = \\
&= j[Q_3 + S_{2K} \cdot \sin(2\omega t + \varphi_2)]
\end{aligned} \tag{3.43}$$

Na základě rovnic (3.42) a (3.43) můžeme napsat vztah pro zdánlivý výkon jako:

$$\hat{S}_{3f} = p_{3f} + q_{3f} = [\hat{S}_1 + \hat{S}_{2K}] = [P_3 + Q_3 + S_{2K}] \tag{3.44}$$

Výkon jednotlivých fází nesouměrného zatížení si lze přestavit jako součet dvou výkonů a rozložit jej do složek:

- kmitavá složka výkonu, která je odvozena ze sousledné složky výkonu ( $\hat{S}_1, \hat{S}_1^*$ ),
- souměrné složky výkonu, která je odvozena ze zpětné složky výkonu ( $\hat{S}_{2K}, \hat{S}_{2K}^*$ ).

Kmitavá složka výkonu se projevuje v důsledku nesouměrného zatížení. Okamžitá hodnota kmitavého výkonu je  $\neq 0$ , avšak střední hodnota za jednu periodu je 0.

Okamžitá hodnota zdánlivého výkonu nesouměrně zatížené třífázové soustavy má dva polohové vektory  $[P, Q]$  s amplitudami  $[4 \cdot U \cdot I_1]$ , kolem nichž kmitá s frekvencí  $2\omega$  a amplitudou  $[4 \cdot U \cdot I_2]$  složka výkonu  $[\hat{S}_{2K}]$ . V případě souměrného zatížení soustavy (zpětná soustava = 0), bude každá fáze nevyvážená a bude kmitat s frekvencí  $2\omega$  ale v třífázovém propojení se kmitavé složky ( $\hat{S}_1, \hat{S}_1^*$ ) eliminují a výkon soustavy je stálý a vyvážený. Potom lze okamžitou hodnotu třífázového výkonu napsat jako:

$$p_3(t) = [p_R(t) + p_S(t) + p_T(t)] = [\hat{S}_1 + \hat{S}_1^*] = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot [\cos \varphi_1 + j \cdot \sin \varphi_1 + \cos \varphi_1 - j \cdot \sin \varphi_1] \quad (3.45)$$

Činný a jalový výkon můžeme vyjádřit jako:

$$p_{3f} = \operatorname{Re}[p_3(t)] = 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = P_3 \quad (3.46)$$

$$q_{3f} = \operatorname{Im}[p_3(t)] = j \cdot 3 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 = j \cdot Q_3 \quad (3.47)$$

## 3.4. Analýza harmonického periodického průběhu

### 3.4.1. Neharmonický periodický průběh

Každý nesinusový průběh napětí a proudu lze rozložit pomocí Fourierova teoremu [2]:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^q U_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_{U,k}) \quad (3.48)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^q I_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_{I,k}) \quad (3.49)$$

$u(t)$ ,  $i(t)$ ...okamžité hodnoty napětí a proudu

$U_k, I_k$  .....hodnota napětí (proudu) pro  $k$ -tou harmonickou

$U_0, I_0$  .....stejnoseměrná složka napětí (proudu)

$k$  .....harmonická  $k \in \mathbb{N}$

$\omega$  .....úhlový kmitočet základní harmonické  $\omega = 2 \cdot \varphi \cdot f$

Efektivní hodnota bývá často označována indexem RMS (Root Mean Square).  
 Definice efektivní hodnoty proudu: Efektivní hodnota střídavého proudu je hodnota proudu stejnosměrného, který v daném obvodu vykoná za stejný čas stejnou práci jako proud střídavý. Při znalosti harmonického spektra lze vyjádřit efektivní hodnotu pomocí vztahu:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[ \sum_{k=1}^q I_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_{I,k}) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^q I_k^2} \quad (3.50)$$

$I$  .....efektivní hodnota proudu (A)

Tuto definici lze aplikovat i na efektivní hodnotu napětí:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left[ \sum_{k=1}^q U_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t + \psi_{U,k}) \right]^2 dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^q U_k^2} \quad (3.51)$$

U.....efektivní hodnota napětí (V)

Posouzení deformace sinusové křivky se provede na základě znalosti obsahu vyšších harmonických v měřené veličině. Koeficient g vyjadřující obsah základní harmonické proudu lze definovat:

$$g = \frac{I_1}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}} = \frac{I_1}{I} \quad (3.52)$$

Obsah vyšších harmonických proudu lze definovat koeficientem  $k_h$ :

$$k_h = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I} \quad (3.53)$$

Analogicky lze napsat rovnice (3.52) a (3.53) i pro napětí.

Okamžitou hodnotu výkonu lze získat na základě vztahu:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (3.54)$$

p(t)..... okamžitá hodnota výkonu

Činný výkon lze definovat jako střední hodnotu okamžitého výkonu:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} u_k(t) \cdot i_l(t) dt \quad (3.55)$$

Odvozením a výpočtem lze nakonec výkon podle [4] napsat jako:

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} P_k = P_0 + \sum_{k=1}^q U_k \cdot I_k \cos \varphi_k \quad (3.56)$$

Střední hodnota činného výkonu neharmonických napětí a proudů je roven součtu činných výkonů jednotlivých harmonických a stejnosměrné složky. Střední hodnotu jalového výkonu lze vyjádřit obdobně:

$$Q = Q_0 + Q_1 + Q_2 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} Q_k = Q_0 + \sum_{k=1}^q U_k \cdot I_k \sin \varphi_k \quad (3.57)$$

Střední hodnota zdánlivého výkonu je definována jako součin efektivních hodnot napětí a proudu:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2} \quad (3.58)$$

Poměr harmonického spektra činného a zdánlivého výkonu bývá označován jako koeficient  $\lambda$  tzv. faktor výkonu (Power Factor), někdy také označován jako opravdový účinník. Zde je třeba upozornit na rozdílnost opravdového účinníku  $\lambda$  a účinníku  $\cos \varphi$ . Účinník  $\cos \varphi$  vyjadřuje poměr činného a zdánlivého výkonu pouze 1. harmonické, avšak koeficient  $\lambda$  vyjadřuje poměr harmonického spektra. Hodnoty se mohou v případech, kdy napětí a proud obsahují harmonická spektra značně lišit, jako např. u usměrňovačů aj. aplikací, kde jsou použity polovodičové součástky.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{k=0}^{\infty} U_k \cdot I_k \cos \varphi_k}{\sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{l=0}^{\infty} I_l^2}} \quad (3.59)$$

$\lambda$  .....opravdový účinník (-)

U zdánlivého výkonu  $S$  neharmonických průběhů dochází při vyjádření pomocí činného výkonu  $P$  a jalového výkonu  $Q$  k nerovnosti:

$$S^2 \geq P^2 + Q^2 \quad (3.60)$$

Aby byla rovnost zachována, zavádí se pojem tzv. deformačního výkonu  $D$ , který je definován jako součin efektivních hodnot harmonických vyššího řádu včetně stejnosměrné složky. Deformační výkon způsobuje, že pokud není mezi harmonickými veličinami napětí a proudu fázový posun, činitel výkonu  $\lambda < 1$ . Deformační výkon lze vypočítat na základě znalostí rovnic (3.56) a (3.57) a dát do rovnosti podle rovnice (3.58), po matematických úpravách viz. [7] str. 7:

$$D = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} (U_n^2 I_k^2 - P_n P_k - Q_n Q_k)}, \text{ pro } n \neq k \quad (3.61)$$

Na základě znalosti deformačního výkonu lze nerovnici (3.60) přepsat jako rovnici:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.62)$$

Jalový výkon  $Q$  a deformační výkon  $D$  nemají charakter činného výkonu, avšak nepřímo způsobují přídatné ztráty v rozvodu a lze je kompenzovat pasivními nebo aktivními prvky.

### 3.4.2. Neharmonický periodický průběh v třífázové soustavě

Pro analýzu třífázové soustavy budeme předpokládat souměrnou napěťovou soustavu (sousedná soustava  $\neq 0$ , zpětná a netočivá soustava  $= 0$ ) a obecné proudové zatížení, tj. nesouměrná, nevyvážená a s obsahem vyšších harmonických. Na základě těchto předpokladů můžeme vyjádřit vztahy pro napětí a proudy v jednotlivých fázích ABC jako:

$U_A, U_B, U_C$ .....napětí ve fázích ABC

$I_1, I_2, I_0$ .....proud složkových soustav

$i_A, i_B, i_C, i_N$ .....proud ve fázích ABC a nulovým vodičem

$$U_A = \frac{1}{\sqrt{2}} [\hat{U} + \hat{U}^*]$$

$$U_B = \frac{1}{\sqrt{2}} [\hat{a}^2 \hat{U} + \hat{a} \hat{U}^*]$$

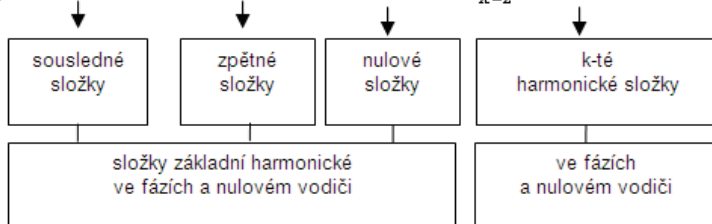
$$U_C = \frac{1}{\sqrt{2}} [\hat{a} \hat{U} + \hat{a}^2 \hat{U}^*]$$

$$i_A = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\hat{I}_1 + \hat{I}_1^*) + (\hat{I}_2 + \hat{I}_2^*) + (\hat{I}_0 + \hat{I}_0^*) \right] + \sum_{K=2}^{\infty} (\hat{I}_{RK} + \hat{I}_{RK}^*)$$

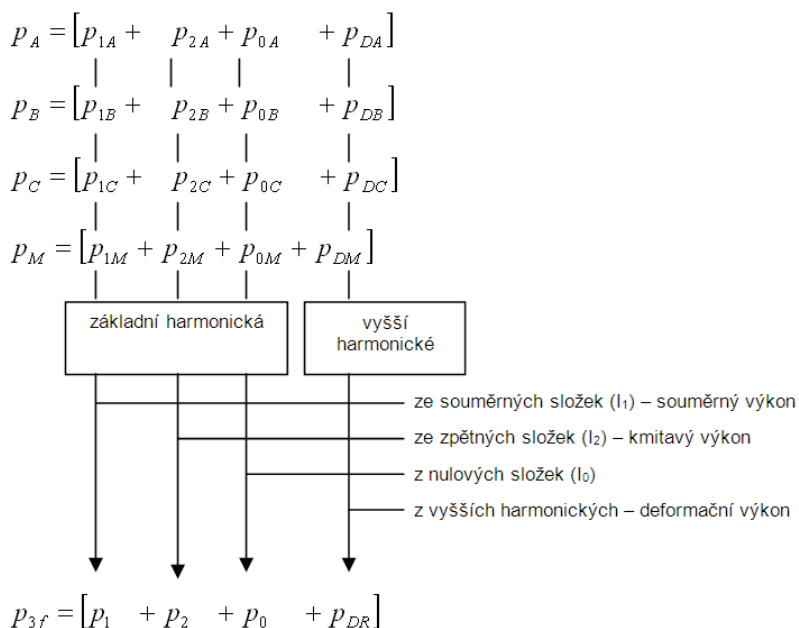
$$i_B = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\hat{a}^2 \hat{I}_1 + \hat{a} \hat{I}_1^*) + (\hat{a} \hat{I}_2 + \hat{a}^2 \hat{I}_2^*) + (\hat{I}_0 + \hat{I}_0^*) \right] + \sum_{K=2}^{\infty} (\hat{I}_{SK} + \hat{I}_{SK}^*)$$

$$i_C = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\hat{a} \hat{I}_1 + \hat{a}^2 \hat{I}_1^*) + (\hat{a}^2 \hat{I}_2 + \hat{a} \hat{I}_2^*) + (\hat{I}_0 + \hat{I}_0^*) \right] + \sum_{K=2}^{\infty} (\hat{I}_{TK} + \hat{I}_{TK}^*)$$

$$i_M = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ 3(\hat{I}_0 + \hat{I}_0^*) + \sum_{K=2}^{\infty} (\hat{I}_{MK} + \hat{I}_{MK}^*) \right]$$



Pokud vynásobíme mezi sebou napětí a proudy v jednotlivých fázích a po provedení matematických úprav, obdržíme v každé fázi čtyři výkony. Výkony složkových soustav (1 – sousledná, 2 – zpětná, 0 – netočivá) a výkon vyšších harmonických, který označujeme jako deformační výkon D.



Souměrný zdánlivý výkon třífázové soustavy je odvozen ze sousledné složky základní harmonické. Dále můžeme ze souměrného zdánlivého výkonu vyjádřit činný a jalový výkon:

$$\hat{S}_1 = [\hat{S}_1 + \hat{S}_{1K} + \hat{S}_1^* + \hat{S}_{1K}^*] = \sqrt{P_{1\ 3f}^2 + Q_{1\ 3f}^2} \quad (3.63)$$

$$P_{1\ 3f} = \text{Re}[\hat{S}_1] = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (3.64)$$

$$Q_{1\ 3f} = \text{Im}[\hat{S}_1] = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (3.65)$$

$\hat{S}_1$  .....třífázový zdánlivý výkon 1. harmonické

$P_{1\ 3f}, Q_{1\ 3f}$  ...třífázový činný a jalový výkon 1. harmonické

Kmitavý výkon třífázové soustavy vzniká nesymetrií třífázového odběru a je odvozen ze zpětné složky základní harmonické. Tento výkon kmitá s frekvencí  $2\omega$  a jeho střední hodnota během jedné periody je podobně jako střední hodnota jalového výkonu roven nule:

$$S_{2K} = 3 \cdot U \cdot I_2 = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \rho_i \quad (3.66)$$



$$\rho_i = \frac{S_{2K}}{S_1} \approx \frac{I_2}{I_1} \quad (3.67)$$

Výkon nulových složek základní harmonické je v každém okamžiku roven nule. Zdánlivý výkon nulových složek můžeme vyjádřit pomocí koeficientu nevyváženosti:

$$\varepsilon_i = \frac{I_0}{I_1} \quad (3.68)$$

$$S_0 = 3 \cdot U \cdot I_0 = 3 \cdot U \cdot I_1 \cdot \varepsilon_i = S_1 \cdot \varepsilon_i \quad (3.69)$$

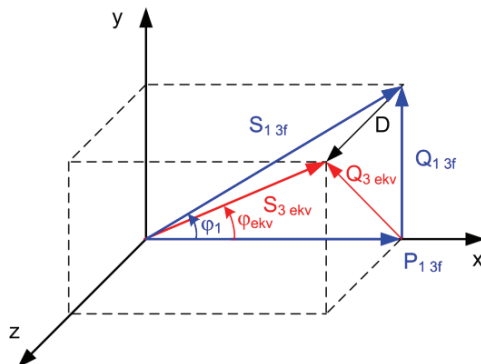
Deformační výkon  $p_D$  je dán existencí jednotlivých vyšších harmonických k-tého řádu:

$$p_D = \left[ U_R \cdot \sum_{K=2}^{\infty} i_{RK} + U_S \cdot \sum_{K=2}^{\infty} i_{SK} + U_T \cdot \sum_{K=2}^{\infty} i_{TK} \right] \quad (3.70)$$

Střední hodnota deformačního výkonu za jednu periodu je nulová, stejně jako u jalového a kmitavého výkonu.

$$p_D = \frac{1}{T} \int_0^T p_D \cdot dt = 0 \quad (3.71)$$

Výkony  $Q_3$ ,  $S_{2K}$ ,  $S_0$  a  $D$  mají společné následující vlastnosti. Hodnoty těchto výkonů lze získat na základě skutečných a efektivních hodnot napětí a proudů. Tyto výkony nemají charakter činného výkonu, a proto je lze kompenzovat a jsou přenášeny společně s činným výkonem a způsobují přídavné ztráty.



**Obr. 3.4: Vektorový diagram složek třífázového výkonu**

Na základě těchto skutečností můžeme definovat tzv. ekvivalentní zdánlivý výkon, který vyjádříme vzorcem:

$$S_{3ekv} = \sqrt{P_{1\ 3f}^2 + Q_{1\ 3f}^2 + S_{2K}^2 + 4.S_0^2 + D^2} = \sqrt{P_{1\ 3f}^2 + Q_{3\ ekv}^2} \quad (3.72)$$

Ve vzorci (3.72) jsme zavedli tzv. ekvivalentní výkon, který obsahuje následující složky výkonů:  $Q_{1\ 3f}^2$  - jalový výkon 1. harmonické,  $S_{2K}$  – kmitavý výkon,  $S_0$  – výkon nulové složky a  $D$  – deformační výkon.

### 3.5. Poměrné hodnoty a celkové činitele zkreslení

Pro posuzování velikosti vyšších harmonických se zavádí pojem poměrná hodnota k-té harmonické, která je definovaná jako poměr efektivní hodnoty k-té harmonické a základní harmonické. Poměrnou hodnotu k-té harmonické lze definovat jak pro napětí, tak pro proudy. Tato poměrná hodnota je udávána buď jako bezrozměrné číslo nebo v procentech:

$$u_k = \frac{U_k}{U_1}, \quad u_{k\ \%} = \frac{U_k}{U_1} \cdot 100 \quad (3.73)$$

$$i_k = \frac{I_k}{I_1}, \quad i_{k\ \%} = \frac{I_k}{I_1} \cdot 100 \quad (3.74)$$

$u_k$  ..... poměrná hodnota k-té harmonické napětí (-)

$i_k$  ..... poměrná hodnota k-té harmonické proudu (-)

$u_{k\ \%}$  ..... procentní poměrná hodnota k-té harmonické napětí (%)

$i_{k\ \%}$  ..... procentní poměrná hodnota k-té harmonické proudu (%)

Pro posouzení obsahu vyšších harmonických v celém spektru se zavádí pojem činitel harmonických (THF – Total Harmonic Factor) a dále častěji používaný činitel harmonického zkreslení (THD – Total Harmonic Distortion), které jsou definované pro napětí a proudy následujícími vztahy:

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} U_k^2}}{U_1}, \quad THDi = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}}{I_1} \quad (3.75)$$

$$THFu = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} U_k^2}}{U}, \quad THFi = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{40} I_k^2}}{I} \quad (3.76)$$

THDu, THDi.....činitel harmonického zkreslení napětí (proudu)

THFu, THFi.....činitel harmonických napětí (proudu)

U<sub>1</sub>, I<sub>1</sub>.....základní harmonická napětí (proudu)

U, I.....spektrum harmonických napětí (proudů)

Součet řad pod odmocninou se podle praxe IEC a dalších norem provádí do řádu  $k = 40$ . Vyšší řady harmonických lze zanedbat, protože významně neovlivní výsledek z hlediska požadované přesnosti.

## 3.6. Zdroje vyšších harmonických a jejich šíření v elektrické síti

### 3.6.1. Zdroje vyšších harmonických napětí a proudu

Pokud budeme uvažovat, že zdroje soustavy dodávají pouze sinusové napětí základního kmitočtu, pak pro udržení napěťové rovnováhy mezi sítí a jedním z výše uvedených spotřebičů musí protékat proud vyšší harmonické takovou částí obvodu, aby na jeho indukčnostech respektive odporech vybudil rozdílová napětí o kmitočtu vyšší harmonické. Takto vzniklá napětí se superponují na sinusové napětí síťového kmitočtu a jsou pak měřitelná na všech odběrových místech a způsobují přídavné namáhání jiných zařízení připojených do téže sítě. Překročení napětí vyšší harmonické, přes hodnotu odolnosti proti rušení, se u připojeného zařízení projeví následujícími způsoby:

- zkrácením životnosti a tím způsobenými předčasnými výpadky kondenzátorů a motorů v důsledku tepelného přetížení,
- poruchami funkce elektronických zařízení,
- chybou funkcí ochrany,
- nesprávnou funkcí přijímačů HDO (nespínání nebo nadbytečné spínání),
- proudy vyšších harmonických nepříznivě ovlivňují zhášení oblouků zemních spojení.

Z těchto důvodů je provozovatel distribuční sítě nucen dbát na to, aby napětí vyšších harmonických nepřevyšovala určené meze. Zcela nepřipustné je připojit zařízení způsobující stejnosměrný proud v distribuční síti nn (např. usměrňovač s vyvedeným středem připojený přímo bez předřazeného transformátoru), který by mohl způsobit korozi v PEN vodiči. Při hlubším pohledu zjistíme, že pro vyšší harmonické proudy se uplatňují zákony elektrodynamiky (skinefekt, blízkostní jevy). Pokud činné odpory vodičů i vinutí strojů vzrůstají, rostou i jejich činné ztráty. Například i velice malý proud 11. harmonické může být příčinou značných činných ztrát, protože protéká velkým odporem. Odpor roste rychleji u vícevrstvých vinutí (např. transformátory). Vodiče a vinutí strojů, navržených na 50 Hz, většinou nevyhoví z hlediska ztrát od vyšších harmonických proudů, asynchronních motorů, transformátorů i na vedeních, proto se je snažíme uzavřít dokrátka, co možná nejblíže k jejich zdrojům.

Zdroje vyšších harmonických lze rozdělit na dvě skupiny:

- a) Zdroje vyšších harmonických napětí,
- b) Zdroje vyšších harmonických proudů.

Zdroje vyšších harmonických napětí jsou všechny točivé elektrické stroje např. alternátory, synchronní a asynchronní motory. Důvodem vzniku vyšších harmonických je nesinusové rozložení magnetického pole v rotoru, které je způsobeno drážkováním v rotoru.

Zdroje vyšších harmonických proudů jsou v elektrické síti mnohem častější. Jsou to zejména elektrická zařízení, která mají nelineární voltampérovou charakteristiku. Tyto zdroje rušení můžeme dále rozdělit na jednofázové a třífázové.

Jednofázové zátěže:

- elektronické předřadníky kompaktních svítidel tzv. CFL,
- spínané napájecí zdroje,
- malé zdroje pro nepřerušované napájení – UPS,
- zářivky, plynové výbojky a domácí spotřebiče, aj.

Třífázové zátěže:

- transformátory
- usměrňovače a měniče
- velké jednotky záložního napájení – UPS
- elektrické obloukové pece, aj.

Z hlediska rušení a EMC mají větší vliv na elektrickou síť zdroje vyšších harmonických proudů, proto jim bude věnována větší pozornost v následujících kapitolách.

### 3.6.2. Vliv nelinearit na kmitočtové spektrum

Vlivem nelinearit reálných obvodových prvků jako jsou transformátory, aplikace s polovodičovými součástkami, elektrický oblouk aj., vznikají při buzení harmonickou veličinou tzv. nelineární zkreslení. Obecně lze hovořit o zkreslení, je-li spektrum budící veličiny rozdílné od spektra buzené veličiny. Uvažujeme-li obecný nelineární prvek, který je napájen ze zdroje harmonického napětí, lze jeho V-A charakteristiku aproximovat mocninnou řadou:

$$i(t) = \sum_{k=0}^q a_k [u(t)]^k, \quad k \in N \quad (3.77)$$

$$u(t) = U_m \sin \omega t \quad (3.78)$$

$i(t)$  ..... časový průběh proudu

$u(t)$ .....napětí harmonického zdroje

$a_k$ .....koeficient mocninné řady

$U_m$ .....maximální hodnota napětí

$\omega$ .....úhlová rychlost

$t$  .....čas

Na základě znalosti rovnice (3.77) můžeme mocninou řadu aproximovat na:

$$\begin{aligned} i(t) = & a_0 + a_1 U_m \sin \omega t + \frac{1}{2} a_2 U_m^2 (1 - \cos 2\omega t) + \\ & + \frac{1}{4} a_3 U_m^3 (3 \sin \omega t - \sin 3\omega t) + \\ & + \frac{1}{8} a_4 U_m^4 (\cos 4\omega t - 4 \cos 2\omega t + 3) + \\ & + \frac{1}{16} a_5 U_m^5 (\sin 5\omega t - 5 \sin 3\omega t + 10 \sin \omega t) + \dots \end{aligned} \quad (3.79)$$

Na základě znalosti mocninné řady (3.79) lze vyvodit následující závěr. Je-li V-A charakteristika nelineární součástky (3.77) lichou funkcí, kmitočtové spektrum proudu obsahuje pouze liché harmonické (transformátor, usměrňovač). Naopak např. elektrická oblouková pec je zdrojem také i sudých harmonických, protože jeho V-A charakteristika není lichá funkce.

### 3.6.3. Šíření vyšších harmonických v elektrické soustavě

Jednotlivé prvky v elektrické soustavě jsou definovány impedancí, která je frekvenčně závislá. Pro výpočet šíření vyšších harmonických v soustavě lze využít admitanční matici. Pokud budeme uvažovat uzlovou síť, která bude mít  $n$  uzlů a bude obsahovat  $z$  zátěží a  $g$  zdrojů vyšších harmonických, pak pro všechny uzlová napětí a proudy můžeme na základě metody uzlových napětí a Ohmova zákona napsat rovnici:

$$[I] = [Y] \cdot [U] \quad (3.80)$$

$[I]$  .....matice proudů

$[Y]$  .....admitanční matice

$[U]$  .....matice napětí

Maticovou rovnici 3.80 můžeme vyjádřit pomocí submatic:

$$\begin{bmatrix} [I_g] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Y_{gg}] & [Y_{gz}] \\ [Y_{zg}] & [Y_{zz}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [U_g] \\ [U_z] \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

Nyní provedeme roznásobení jednotlivých submatic a dostaneme po menších úpravách:

$$[I_g] = [Y_{gg}] \cdot [U_g] + [Y_{gz}] \cdot [U_z]$$

$$[0] = [Y_{zg}] \cdot [U_g] + [Y_{zz}] \cdot [U_z]$$

$$-[Y_{zg}] \cdot [U_g] = [Y_{zz}] \cdot [U_z]$$

$$-[Y_{zz}]^{-1} \cdot [Y_{zg}] \cdot [U_g] = [U_z]$$

$$[I_g] = \{[Y_{gg}] + [Y_{zz}]^{-1} \cdot [Y_{zg}] \cdot [Y_{gz}]\} \cdot [U_g] \quad (3.82)$$

Rovnici 3.82 můžeme přepsat jako:

$$[I_g] = [Y_{red}] \cdot [U_g] \quad (3.83)$$

$$[Y_{red}] = [Y_{gg}] + [Y_{zz}]^{-1} \cdot [Y_{zg}] \cdot [Y_{gz}] \quad (3.84)$$

Nyní na základě znalosti zdrojů vyšších harmonických dané maticí  $[U_g]$  nebo maticí  $[I_g]$  vypočítáme nejdříve matici  $[Y]$  a potom redukovanou matici  $[Y_{red}]$  a všechny napětí a proudy.

### 3.7. Interharmonické

Obecně se liší tyto signály od síťového kmitočtu délkou periody. Nejedná se o celý násobek (integer) základní harmonické, nýbrž o diskrétní nebo spojitá kmitočtová spektra ohraničenými spolu sousedícími vyššími harmonickými. Jejich existence je spojována se statickými frekvenčními měniči, cyklokonvertory, indukčními motory, obloukovými pecemi a ostatními pulsními systémy s frekvencí odlišnou od síťového kmitočtu, jenž všechny jsou považovány za hlavní zdroj. V *tab. 3.1* jsou definovány jednotlivé názvy, a protože jsou plně respektovány dle IEEE 519, IEC 1000 i ostatními normami, vychází se z nich i v dalších úvahách.

| Kmitočty v elektrizační soustavě |                           |                          |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| f <sub>1</sub> = síťový kmitočet |                           |                          |
| Harmonické                       | f = h.f <sub>1</sub> (Hz) | h > 0, h je celé číslo   |
| Interharmonické                  | f = h.f <sub>1</sub> (Hz) | h > 0, h není celé číslo |
| Subharmonické                    | f = h.f <sub>1</sub> (Hz) | h < 1                    |
| Stejnoseměrný systém             | f = h.f <sub>1</sub> (Hz) | h = 0                    |

**Tab. 3.1: Kmitočty v elektrizační soustavě**

### 3.7.1. Matematický model napětí

Časový průběh napětí:

$$u(t) = \sin(2\pi f t) + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \sin(2\pi f_i t) \quad (3.85)$$

f .....síťový kmitočet

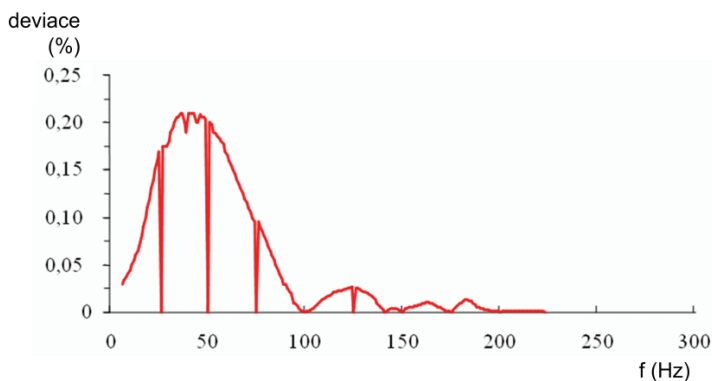
a<sub>i</sub> .....amplituda i-tého interharmonického napětí (amplituda základní harmonické = 1,0)

f<sub>i</sub> .....kmitočet i-té interharmonické

Efektivní hodnota napětí:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)^2 dt} \quad (3.86)$$

kde platí vztah k základnímu kmitočtu  $T = 1/f_1$ . Ze vztahů (3.85) a (3.68) je patrné, že při superpozici základního kmitočtu sítě a interharmonické frekvence se objevuje kolísání napětí. Největší změna napětí neharmonického průběhu napětí pak odpovídá amplitudě přičítané interharmonické. Naopak efektivní hodnota veličiny je závislá na amplitudě i fázi interharmonické frekvence. Je zřejmé, že největší vliv na deformaci křivky mají nižší hodnoty kmitočtu. Lze ověřit, že hraniční bod mezi frekvencemi s výraznými a menšími vlivy je druhá harmonická (viz. obr. 3.5).



**Obr. 3.5: Deviace efektivní hodnoty napětí při celkovém zkreslení 0,2 %**

Harmonické kmitočty se nepodílejí na tomto typu deviace napětí. Jsou synchronizovány se základní harmonickou, fázový rozdíl v ustáleném stavu zůstává konstantní a tedy se ani nemění deformace sinusového průběhu v jednotlivých periodách. Zmiňované vlastnosti jsou charakteristické pro harmonické a interharmonické kmitočty jako elektromagnetické rušení. V některých případech je jejich negativní vliv na elektrizační soustavu totožný (např. jev susceptance a reaktance), v jiných se velmi diametrálně odlišují (flicker – kolísání napětí).

### 3.7.2. Zdroje interharmonických

Jako jeden z nejvýznamnějších zdrojů interharmonických je obecně označován cyklokonvertor. Připojují se do sítí nízkého i vysokého napětí, což vytváří plošný a nerovnoměrný efekt jejich vlivu na energetickou soustavu. Nejsou výjimečné instalace cyklokonvertorů o velkých výkonech (až 10 MVA) ve středním a těžkém průmyslu.

#### Frekvenční spektrum usměrňovače

$$f_i = (p * n \pm 1) f_{\text{fun}} \quad (3.87)$$

i ..... řád harmonické

P ..... počet pulsů usměrňovače

n ..... 0, 1, 2, 3, ...

$f_{\text{fun}}$  ..... síťový kmitočet

#### Frekvenční spektrum cyklokonvertoru

$$f_i = (p_1 * m \pm 1) f_{\text{fun}} \pm p_2 * n * f_0 \quad (3.88)$$

i ..... řád interharmonické



$P_1$  .....počet pulsů vstupního členu cyklokonvertoru

$P_2$  .....počet pulsů výstupního členu cyklokonvertoru

$m, n$  .....0, 1, 2, 3, ...

$f_0$  .....výstupní frekvence cyklokonvertoru

$f_{\text{run}}$  .....síťový kmitočet

### Statické frekvenční měniče

Statický frekvenční měnič se skládá ze dvou základních částí: vstupní p-pulsní usměrňovač a výstupní invertor. Vstupní napájecí proud celého měniče je tedy zřejmě ovlivňován vlastnostmi obou těchto jednotek, jenž jsou vázány stejnosměrnou vazbou. Kvalita stejnosměrného propojení (parametry výkonových jednotek, filtrace) je zároveň spojena se vzájemným prolínáním se rovnic popisujících frekvenční spektra usměrňovače a cyklokonvertoru.

### Obloukové pece a svářečky

Další skupinou zdrojů interharmonických proudů jsou obloukové pece a svářečky. Vyznačují se širokým frekvenčním spektrem, kde výrazně jsou zastoupeny i nižší kmitočty. Právě tyto nižší frekvence jsou spojeny s flickerem. Zařízení je většinou napájeno ze soustavy vysokého napětí, čímž se kladou vysoké požadavky na parametry soustavy v připojovacím bodě systému.

### Indukční motory

Mezi zdroje obdobných vlastností, avšak obecně s menším vlivem patří i indukční motory. Jejich rušící charakter je dán nepravidelným magnetizačním proudem souvisejícím s drážkami ve statoru i rotoru a saturací železa. V ustálených stavech lze analýzou spolehlivě sledovat spojitě frekvenční spektru do dvacáté harmonické.

Uvedené příklady patří mezi nejvýznamnější zdroje harmonických a interharmonických v energetických soustavách. Při jejich instalaci lze s větší pravděpodobností očekávat snížení kvality elektrické energie v dané lokalitě.

### 3.7.3. Metody analýzy

Při analýze interharmonických lze využít následující výpočetní metody:

- Discrete-time Fourier transformation (DTFT)
- Nulování period v časovém okně
- ZOOM transformace
- Kvazi-synchronní algoritmus

Na jednotlivé výpočtové metody nelze pohlížet absolutně. Obecně jejich samostatná aplikace a vzájemná kombinace zvyšuje přesnost, avšak různé rušivé jevy jsou spojeny s různými limitujícími prostředky. Z pohledu analýzy interhar-

nických je důležitá schopnost maximálního zkrácení kroku mezi dvěma sousedícími frekvencemi. Vychází se ze vztahu DFT a vyjádření minimálního intervalu vzorkovací frekvence. Metoda nulování a související vzorce nabízejí další možnosti zvyšování přesnosti. Přirozenou cestou se dosahuje menších frekvenčních intervalů  $f_{\text{fund}}/K$  a analýza se tak přibližuje monitorování spojitého spektra. Dalším ovlivňujícím faktorem jsou technicko-organizační možnosti, obvykle je limitující stav zejména výpočtové techniky. Volba správné měřicí metody je úzce svázána s určením skutečných interharmonických kmitočtů v systému a následnou jejich eliminací. Nevhodnou metodou můžeme identifikovat i neexistující kmitočty v soustavě.

### 3.8. Literatura

- [1] BENDA, V. Výkonové polovodičové součástky a integrované struktury. Praha : Vydavatelství ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01140-2
- [2] DOLEŽAL, J., TLUSTÝ, J., VALOUCH, V. Moderní prostředky na zvýšení kvality elektrické energie. In Aktuální otázky a vybrané problémy řízení elektrizačních soustav [CD-ROM]. Praha : EGÚ Praha Engineering, 2004.
- [3] DRÁPELA, J. Flikr způsobený meziharmonickými složkami napětí. In Konference ČK CIRED. Tábor, 2006.

## 4. Filtrační zařízení pro potlačení vyšších harmonických

### 4.1. Pasivní filtry

Pasivní filtry (PF – passive filter) se používají v sítích, kde je třeba dosáhnout snížení vyšších harmonických a zároveň snížení vlivu jalového výkonu. Tyto pasivní filtry jsou tvořeny vhodným zapojením výkonových kondenzátorů a tlumivek. Výkonový kondenzátor můžeme považovat za zdroj jalového výkonu a lze jej ke spotřebiči připojit buď sériově nebo paralelně. Při připojování výkonových kondenzátorů je třeba dávat pozor, aby nebyly přetěžovány nad povolené hranice. V případě nadměrného přetěžování může dojít ke zrychlenému stárnutí a tím i snížení základní funkce kondenzátoru, což by mohlo vést i k tzv. rozladění celého pasivního filtru pro danou vyšší harmonickou. Pasivní filtr je značně namáhán vyššími harmonickými, a proto je důležité při návrhu filtru znát možnosti přetěžování kondenzátorů. Trvalé přetěžování kondenzátorů je omezeno mezními hodnotami napětí, proudu a náboje podle následujících vztahů:

$$U_C \leq 1,1 \cdot U_{CN} \quad (4.1)$$

$$I_C \leq 1,4 \cdot I_{CN} \quad (4.2)$$

$$Q_C \leq 1,4 \cdot Q_{CN} \quad (4.3)$$

$U_C, I_C, Q_C$ .....hodnoty pro návrh pasivního filtru (napětí, proud, náboj)

$U_{CN}, I_{CN}, Q_{CN}$ .....jmenovité hodnoty (napětí, proud, náboj)

Velmi důležitým činitelem přetížení kondenzátorů jsou jeho tepelné ztráty. Vlivem nárůstu teploty kondenzátoru, resp. dielektrika se urychluje jeho stárnutí, a tím se zkracuje jeho životnost a může dojít i k tepelnému průrazu dielektrika. Ztrátový výkon kondenzátoru způsobený 1. harmonickou a vyššími harmonickými můžeme popsat následující rovnicí:

$$P_Z = U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C \cdot \text{tg} \delta + U_h^2 \cdot h \cdot \omega \cdot C \cdot \text{tg} \delta \quad (4.4)$$

$P_Z$  .....ztrátový výkon kondenzátoru

$\omega_1$  .....úhlová frekvence 1. harmonické

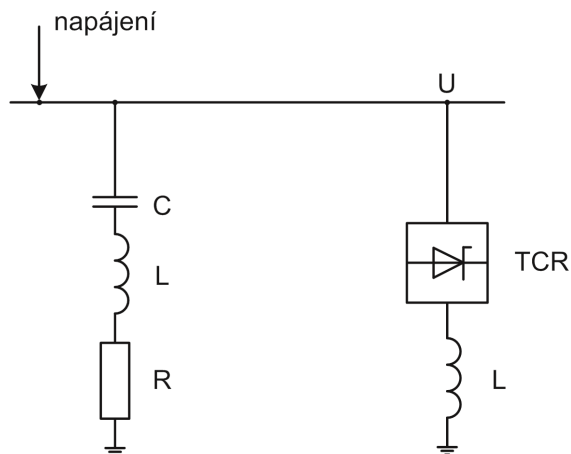
$U_1$  .....napětí 1. harmonické

$U_h$  .....napětí h-té harmonické

$h$  .....řád vyšší harmonické

C.....kapacita kondenzátoru

$\text{tg}\delta$  .....ztrátový úhel



**Obr. 4.1: Připojení pasivního filtru do sítě  
(TCR – Thyristor Controlled Reactor)**

Při výpočtu ztrátového výkonu u vyšších harmonických v rovnici (4.4) zanedbáváme kmitočtovou závislost  $\text{tg}\delta$ , protože v kmitočtové oblasti, ve které provádíme tento výpočet, je chyba velmi malá a tudíž zanedbatelná.

Rovnici (4.1) pro napětí na kondenzátoru s obsahem vyšších harmonických můžeme potom přepsat jako:

$$U_C = U_1 \cdot \sqrt{1 + \frac{\sum_{h=2}^{50} h \cdot U_h^2}{U_1^2}} \leq 1,1 \cdot U_{CN} \quad (4.5)$$

Pro filtraci vyšších harmonických síťového proudu a napětí se nejčastěji používá zapojení jako sériový RLC obvod. Tento rezonanční obvod je nalaďen na kmitočet impedance rovné pouze odporu  $R$ , paralelně připojeného ke zdroji rušení (viz. obr. 4.1). Pro kmitočty nižší než je rezonanční kmitočet se pasivní filtr chová jako kondenzátor a dodává do sítě jalový výkon. Pro kmitočty vyšší než je rezonanční kmitočet se chová pasivní filtr jako cívka a potlačuje rezonanční jevy. V oblasti podrezonančních kmitočtů je jalový výkon dán součtem 1. harmonické a spektra vyšších harmonických.

#### 4.1.1. Návrh pasivního filtru

Pro elektrický obvod podle *obr. 4.1* můžeme vyjádřit fázor proudu jako:

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{\hat{Z}} = \frac{\hat{U}}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad (4.6)$$

$\hat{U}, \hat{I}$  .....fázor napětí a proudu

$\hat{Z}$  .....impedance pasivního filtru

$\omega$  .....úhlová frekvence

$R, L, C$  ...parametry pasivního filtru (rezistence, indukčnost, kapacita)

Amplitudu proudu potom můžeme popsat rovnicí:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (4.7)$$

$U, I$  .....amplituda napětí a proudu

$X_L, X_C$  ...induktivní a kapacitní reaktance

$R$  .....rezistence

Pokud vyjdeme z předpokladu, že každý filtr je zatěžován pouze vyšší harmonickou, na kterou je naladěn a ostatní vyšší harmonické jsou odstraněny jinými filtry, můžeme pro jalový výkon kondenzátorové baterie pro 1. harmonickou  $Q_{C1}$  a vyšší harmonickou řádu  $h$   $Q_{Ch}$  napsat rovnice:

$$Q_{C1} = \frac{U_{C1}}{X_C} \quad (4.8)$$

$$Q_{Ch} = 3 \cdot \frac{I_h^2 X_C}{h} \quad (4.9)$$

$Q_{C1}$  .....kompenzační výkon 1. harmonické

$Q_{Ch}$  .....jalový výkon  $h$ -té vyšší harmonické

$h$  .....řád vyšší harmonické

Pro naladěný rezonanční kmitočet můžeme vyjádřit vztah:

$$h_r^2 = \frac{X_C}{X_L} \quad (4.10)$$

Pokud bude platit rovnost  $h = h_r$ , tj. že řád vyšší harmonické je roven řádu rezonančního kmitočtu, potom celkový kompenzační výkon kondenzátorů můžeme vyjádřit jako:

$$Q_C = Q_{C1} + Q_{Ch} \quad (4.11)$$

Pro napěťový rezonanční obvod, ve kterém je  $R = 0$  dále platí:

$$U_{C1} = U_{R1} - U_{L1} \quad (4.12)$$

$U_{C1}$  .....napětí 1. harmonické na kondenzátoru

$U_{L1}$  .....napětí 1. harmonické na indukčnosti

$U_{R1}$  .....napětí 1. harmonické na rezistoru

Podle schématu na obr. 4.1 můžeme vyjádřit napětí  $U_{C1}$  a  $U_{R1}$  jako:

$$U_{C1} = I_1 \cdot X_C \quad (4.13)$$

$$U_{R1} = I_1 \cdot (X_C - X_L) \quad (4.14)$$

Zavedeme-li činitel zvýšení napětí vlivem kondenzátoru:

$$a = \frac{U_{C1}}{U_{R1}} \quad (4.15)$$

můžeme potom tento činitel  $a$  dále přepsat jako:

$$a = \frac{X_C}{X_C - X_L} = \frac{h_r^2}{h_r^2 - 1} \quad (4.16)$$

Napětí na kondenzátoru podle rovnice (4.15) můžeme pomocí rovnice (4.16) vyjádřit jako:

$$U_{C1} = a \cdot U_{R1} = \frac{h_r^2}{h_r^2 - 1} \cdot U_{R1} \quad (4.17)$$

Výkon kondenzátoru podle rovnice (4.11), který je dán součtem výkonů 1. harmonické a vyšší harmonické řádu  $h$ , můžeme vyjádřit pomocí rovnic (4.8) a (4.9) jako:

$$Q_C = 3 \cdot U_{C1}^2 \cdot \omega \cdot C + \sum_{h=2}^{\infty} \frac{I_{hC}}{h \cdot \omega \cdot C} \quad (4.18)$$

Z rovnice (4.18) vyplývá, že při konstantním napětí se zvyšuje jalový výkon základní harmonické lineárně s kapacitou  $C$  a jalový výkon od vyšších harmonických je nepřímo úměrný kapacitě  $C$ . Aby byl kondenzátor  $C$  plně využit a zabránilo se jeho přetěžování, viz. podmínky (4.1) ÷ (4.3), je nutné dodržet na kondenzátoru následující poměr:

$$\frac{Q_{C1}}{Q_{Ch}} \leq 3 \quad (4.19)$$

Kompenzační výkon filtru se sníží o jalový výkon tvořený indukčnostmi. Výkon filtru potom můžeme popsat rovnicí:

$$Q_{CF} = Q_{C1} - Q_{L1} = 3 \left( U_{C1}^2 \cdot \omega_1 \cdot C - \frac{U_{L1}^2}{\omega_1 \cdot L} \right) \quad (4.20)$$

$Q_{CF}$  .....celkový kompenzační výkon filtru

Rovnici (4.20) můžeme pomocí rovnice (4.15) přepsat jako:

$$Q_{CF} = 3 \left( (a \cdot U_{R1})^2 \cdot \omega_1 \cdot C - (U_1 \cdot (1 - a))^2 \cdot \frac{1}{\omega_1 \cdot L} \right) \quad (4.21)$$

Podmínku rezonance podle, můžeme vyjádřit a následně upravit:

$$X_{Ch} - X_{Lh} = 0; \quad \frac{1}{\omega_1 \cdot L} = h_r^2 \cdot \omega_1 \cdot C \quad (4.22)$$

Na základě rovnic (4.16) a (4.22) můžeme přepsat rovnici (4.21):

$$Q_{CF} = 3 \cdot a \cdot U_R^2 \cdot \omega_1 \cdot C \quad (4.23)$$

Nakonec můžeme vyjádřit rovnici pro minimální kompenzační výkon  $Q_{CFmin}$ :

$$Q_{CFmin} = 3 \cdot \sqrt{\frac{a}{h}} \cdot I_{Ch} \cdot U_1 \quad (4.24)$$

$Q_{CFmin}$  .... minimální kompenzační výkon filtru (VAr)

$a$  ..... činitel zvýšení napětí vlivem kondenzátoru (-)

$h$  ..... řád vyšší harmonické (-)

$U_1$  ..... napětí 1. harmonické (V)

$I_{Ch}$  ..... proud kondenzátorovou baterií  $h$ -té harmonické (A)

Na základě rovnice (4.24) můžeme vyjádřit velikost kapacity  $C$  a indukčnosti  $L$  filtračního obvodu jako:

$$C = \frac{Q_{CF}}{a \cdot U^2 \cdot \omega_1} \quad (4.25)$$

$$L = \frac{a \cdot U^2}{h_r^2 \cdot \omega_1 \cdot Q_{CF}} \quad (4.26)$$

$C$  ..... kapacita filtračního obvodu (F)

$L$  ..... indukčnost filtračního obvodu (H)

$a$  ..... činitel zvýšení napětí vlivem kondenzátoru (-)

$\omega_1$  ..... úhlová frekvence 1. harmonické ( $s^{-1}$ )

$h_r$  ..... rezonanční řád vyšší harmonické (-)

$$Q = \frac{\omega_{REZ} \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_{REZ} \cdot C \cdot R} \quad (4.27)$$

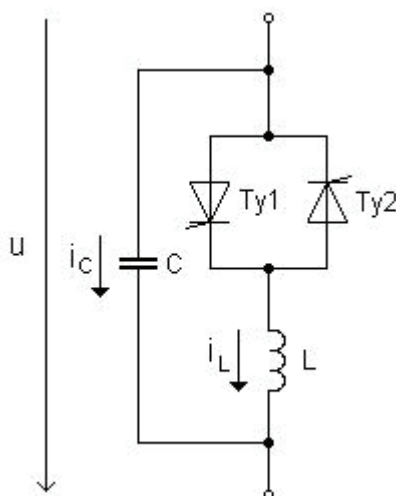
$Q$  ..... činitel jakosti

Rezonanční obvod s poměrně malým odporem  $R$  propustí ze spektra různých kmitočtů jen proudy v určitém úzkém kmitočtovém pásu v okolí rezonančního kmitočtu  $f_{REZ}$ . Poměr indukční nebo kapacitní reaktance při rezonanční frekvenci vzhledem k odporu  $R$  lze vyjádřit činitelem jakosti sériového obvodu viz. rovnice (4.27).

#### 4.1.2. Statický VAr kompenzátor SVC

Základní uspořádání statického VAr kompenzátoru je na *obr. 4.2*. Z hlediska kompenzace jalového výkonu je pro popis statického VAr kompenzátoru důležitá znalost činné a jalové složky proudu.





**Obr. 4.2: Základní obvodové uspořádání 1f statického VAR kompenzátoru**

Fázovým řízením dochází k fázovému posuvu  $\varphi_1$  1. harmonické proudu zátěže  $I_{Z(1)}$  vůči napájecímu napětí. Za předpokladu sinusového napájecího napětí je činný výkon zátěže tvořen 1. harmonickou proudu, pro kterou platí:

$$P_1 = m \cdot U_1 \cdot I_{Z(1)} \cdot \cos \varphi_1 \quad (4.28)$$

Pro jalový příkon můžeme analogicky psát:

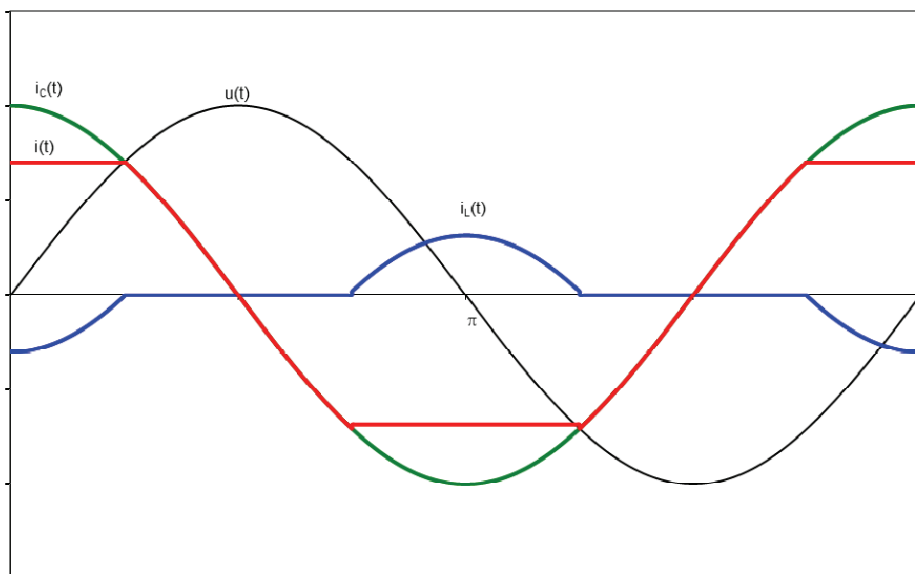
$$Q_1 = m \cdot U_1 \cdot I_{Z(1)} \cdot \sin \varphi_1 \quad (4.29)$$

První harmonická proudu  $i_L$  (viz *obr. 4.3*) je fázově posunuta o  $90^\circ$  proti fázoru napětí v celém rozsahu možné změny řídicího úhlu  $\alpha$  od  $90^\circ$  do  $180^\circ$ . Pro zvolený řídicí úhel v tomto rozsahu má proud  $i_L$  průběh dle *obr. 4.3*. Pro něj platí vztah:

$$i_L = I_{L \max} \cdot \left[ \sin \left( \omega \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) - \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad \omega \cdot t \in \langle \alpha; 2\pi - \alpha \rangle \quad (4.30)$$

kde:

$$I_{L \max} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega \cdot L} \quad (4.31)$$



**Obr. 4.3: Časové průběhy proudů  $i_L$ ,  $i_C$  a  $i$**

Amplitudu 1. harmonické proudu  $i_L$  určíme pomocí Fourierova rozvoje:

$$I_{L(1)} = \frac{2}{\pi} \cdot \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} i_L \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \cdot d(\omega \cdot t) \quad (4.32)$$

Po dosazení z rovnice (4.30) a integraci dostaneme:

$$I_{L(1)} = I_{L\max} \cdot \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)\right) \quad (4.33)$$

Proud kondenzátoru  $i_C$  má konstantní amplitudu  $I_{C\max}$  a kosinusový časový průběh (viz obr. 4.3). Výsledný časový průběh proudu, odebíraného ze sítě, je dán součtem proudu  $i_L$  a  $i_C$ . Pro případ, kdy  $I_{C\max} = I_{L\max}$ , je výsledný časový průběh znázorněn na obr. 4.3. Pro 1. harmonickou tohoto průběhu obecně platí:

$$I_{(1)} = I_{L\max} \cdot \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin(2 \cdot \alpha)\right) - I_{C\max} \quad (4.34)$$

Kompenzátor může dodávat:

- maximální kompenzační proud  $I_{C\max}$  pro  $\alpha = \pi$ ,
- minimální kompenzační proud  $I_{C\min} = (I_{L\max} - I_{C\max})$  pro  $\alpha = \pi/2$ .

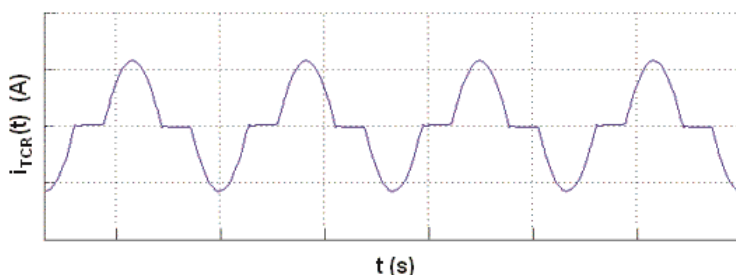
Výhodou tohoto typu kompenzátoru je:

- velký rozsah řídicího úhlu ( $90^\circ$ ),
- omezení proudu i při plném otevření (může dojít při poruše regulátoru),
- nízký obsah vyšších harmonických proudu při velkých zatíženích.

Pro 3f sítě se používá zapojení tří 1f kompenzátorů, zapojených do trojúhelníku. Takto zapojený kompenzátor umožňuje kompenzovat i nesymetrické zatížení jednotlivých fází nastavením různých řídicích úhlů pro každý z kompenzátorů.

#### 4.1.3. Vliv řídicího úhlu TCR na kmitočtové spektrum proudu

Při výpočtu kmitočtového spektra proudu TCR vycházíme z časového průběhu proudu této zátěže, které je uvedeno na *obr. 4.4*. Časový průběh proudu je lichá funkce tzn., že Fourierův rozvoj bude obsahovat pouze *sin* složky. Při dalším rozboru dojdeme k závěru, že jednotlivé harmonické jsou pouze liché násobky základní harmonické proudu 50 Hz.



**Obr. 4.4: Časový průběh proudu TCR**

Pro amplitudu první harmonické proudu platí:

$$I_{\text{TCR}_1} = I_{\text{Lmax}} \cdot \left( 2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{\pi} \right) \quad (4.35)$$

Pro amplitudy vyšších harmonických proudu, platí :

$$I_{\text{TCR}_k} = I_{\text{Lmax}} \cdot \frac{4}{\pi} \left[ \frac{\sin\{(k+1) \cdot \alpha\}}{2 \cdot (k+1)} + \frac{\sin\{(k-1) \cdot \alpha\}}{2 \cdot (k-1)} - \cos(\alpha) \cdot \frac{\sin(k \cdot \alpha)}{k} \right] \quad (4.36)$$

Zpětný výpočet časového průběhu proudu TCR určíme vztahem:

$$i_{\text{TCR}}(t) = \sum_{k=1}^n I_{\text{TCR}_k} \cdot \sin\left((2 \cdot k - 1) \cdot \left(\omega \cdot t - \frac{\pi}{2}\right)\right) \quad (4.37)$$

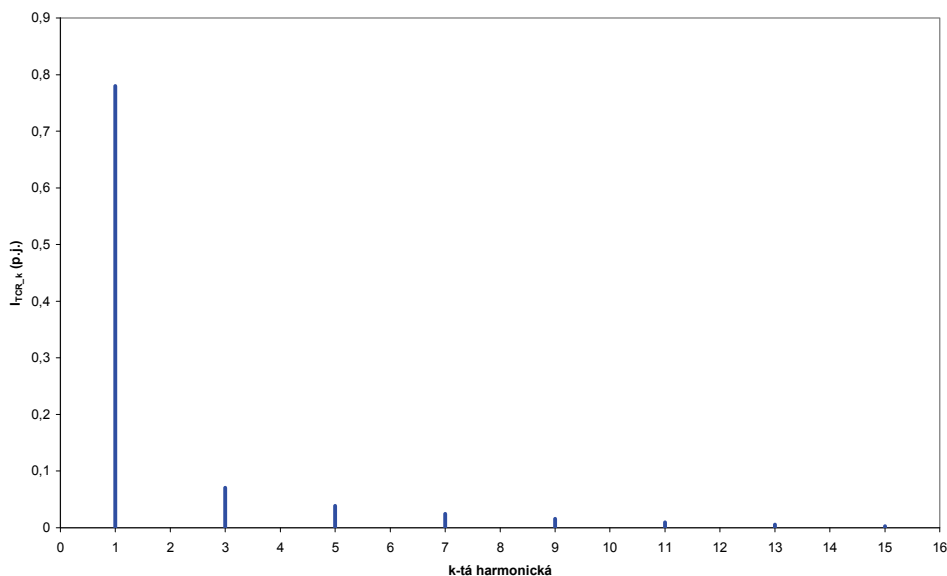
Ze vztahů pro popis kmitočtového spektra můžeme odvodit následující charakteristiky:

- kmitočtové spektrum proudu TCR pro daný řídící úhel;
- závislost amplitudy 1. a vyšších harmonických proudu TCR na velikosti řídícího úhlu;
- závislost činitele harmonického zkreslení proudu na velikosti řídícího úhlu.

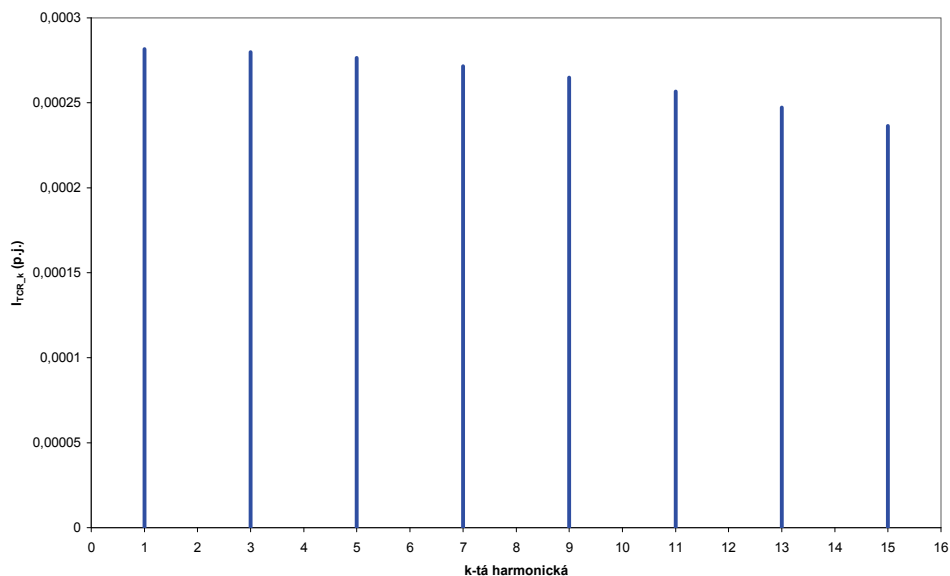
První dvě charakteristiky vyplývají ze vztahů (4.35) a (4.36). Pro určení poslední charakteristiky zavedeme vztah pro výpočet činitele harmonického zkreslení proudu s označením THD (Total Harmonic Distortion). Tento činitel se v normách počítá až do 40. harmonické. Pro tento činitel platí následující vztah:

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (\%) \quad (4.38)$$

Na *obr. 4.5* a *obr. 4.6* jsou uvedena kmitočtová spektra pro dva různé řídící úhly.



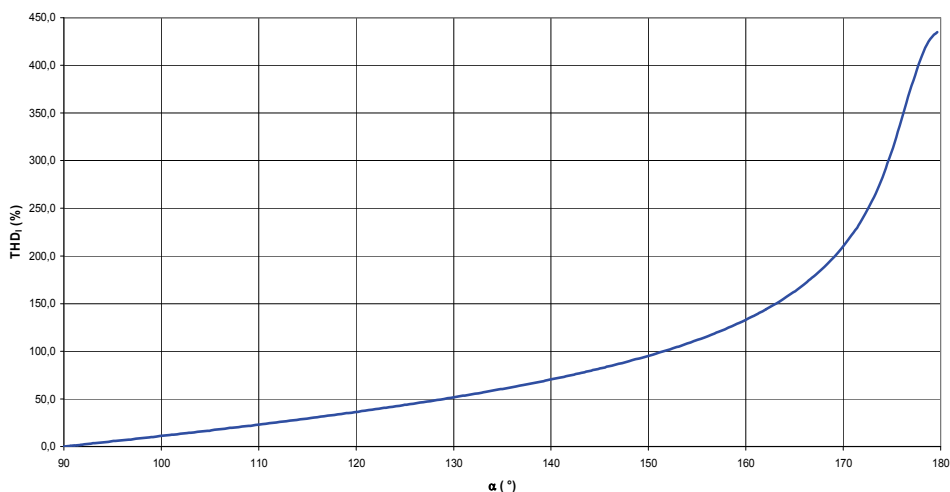
**Obr. 4.5:** Kmitočtové spektrum proudu TCR při řídícím úhlu  $\alpha = 100^\circ$



**Obr. 4.6: Kmitočtové spektrum proudu TCR při řídícím úhlu  $\alpha = 175^\circ$**

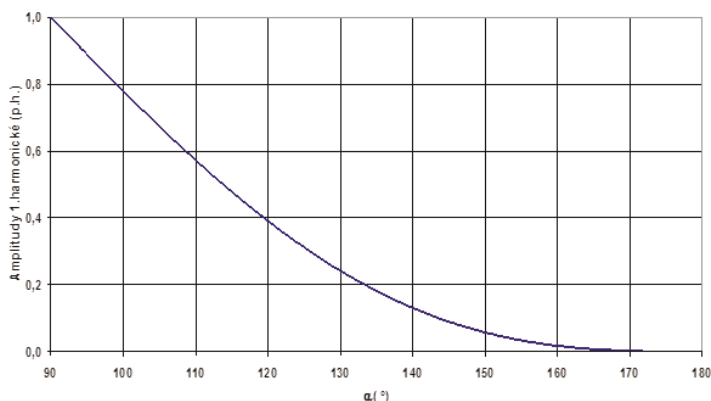
Z uvedených kmitočtových spekter vyplývá, že s narůstající hodnotou řídícího úhlu výrazně rostou amplitudy vyšších harmonických proudu, které při vyšších řídících úhlech mohou dosahovat amplitudy 1. harmonické.

Z předchozího dále vyplývá, že činitel harmonického zkreslení proudu poroste s rostoucím úhlem  $\alpha$ . Tato závislost je uvedena na následujícím obr. 4.7.

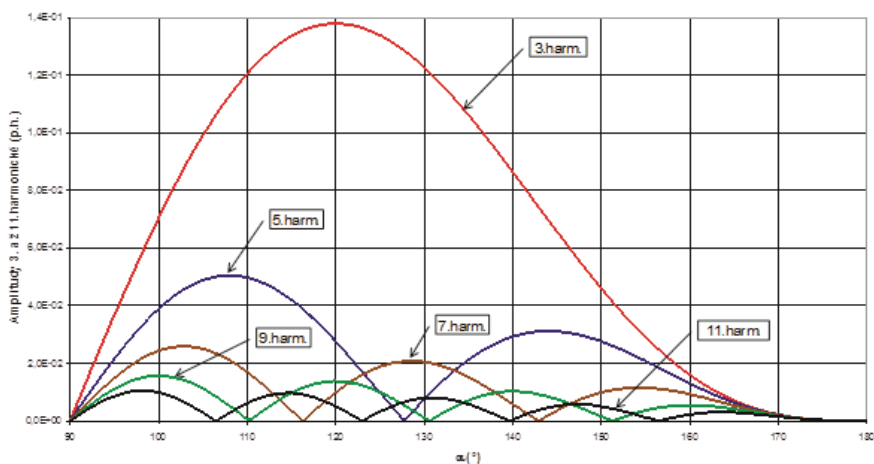


**Obr. 4.7: Závislost THD proudu TCR na velikosti řídícího úhlu**

Na následujících *obr. 4.8* a *obr. 4.9* jsou vyneseny závislosti amplitud jednotlivých harmonických na velikosti řídicího úhlu. Tyto charakteristiky postihnou komplexnějším přehledem kmitočtové spektrum proudu TCR.



**Obr. 4.8: Závislost amplitudy 1. harmonické proudu na velikosti řídicího úhlu**



**Obr. 4.9: Závislost amplitud 3. až 11. harmonické proudu na velikosti řídicího úhlu**

Z charakteristik na *obr. 4.8* a *obr. 4.9* jednoznačně plyne, že od řídicího úhlu s velikostí nad  $170^\circ$  se amplitudy vyšších harmonických začnou vyrovnávat. Tento jev je z hlediska řízení velmi nepříznivý. V případě potlačení nepříznivého vzniku vyšších harmonických proudu je vhodné se pohybovat v rozsahu řídicího úhlu  $\alpha = 90^\circ$  až  $150^\circ$ .

#### 4.1.4. Účinnost pasivních filtrů

V praxi se používají pasivní filtry s činitelem jakosti (viz. kapitola 4.1.1)  $Q < 30$ , protože při větších  $Q$  je ladění příliš ostré, takže při malé změně indukčnosti  $L$  a kapacity  $C$ , které jsou způsobené výrobními tolerancemi, teplotou aj., způsobují značné rozladění filtru a tím i snížení jeho účinnosti. Za pásmo propustnosti považujeme takovou část charakteristiky, kdy proud se nezmenší pod hodnotu  $0,707 I_h$ . Podle rovnice (4.39) vidíme, že změnou indukčnosti  $L$  a kapacity  $C$  je možné změnit rezonanční kmitočet. Pokud změníme indukčnost  $L$  nebo kapacitu  $C$  o 10 % dochází, ke změně rezonančního kmitočtu o 5 %, z čehož se vychází při ladění filtru. V provozu je vhodné doladřovat filtr pomocí indukčnosti  $L$ , která má odbočky  $\pm 10 \div 20$  %, což vyvolá změnu rezonančního kmitočtu o  $5 \div 10$  %.

$$f_{\text{REZ}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (4.39)$$

Při uvádění filtračního zařízení do provozu je třeba změřit křivku propustnosti a případně ji rozšířit pomocí činného odporu  $R$  a tím zmenšit činitel jakosti  $Q$  rezonančního obvodu. Účinnost filtru můžeme definovat jako poměr  $h$ -té vyšší harmonické proudu procházející filtrem k vyšší harmonické proudu v síti:

$$\eta_{\text{PF}} = \frac{I_{\text{hPF}}}{I_h} \cdot 100 \quad (4.40)$$

$\eta_{\text{PF}}$  ..... účinnost filtru

$I_{\text{hPF}}$  .....  $h$ -tá harmonická proudu filtrem

$I_h$  .....  $h$ -tá harmonická proudu v síti

Teoreticky by měl pasivní filtr pro naladěný kmitočet a za předpokladu nulového činného odporu, mít nulovou impedanci. Ve skutečnosti bude mít pasivní filtr určitou impedanci  $Z_F$  (při ideálním naladění  $Z_F = R$ ), a to vlivem činného odporu a nedokonalostí naladění. Vyšší harmonické síťového proudu se potom rozdělí v nepřímém poměru impedancí pasivního filtru a sítě:

$$\eta_{\text{PF}} = \frac{Z_{\text{hSIT}}}{Z_{\text{hPF}} + Z_{\text{hSIT}}} \cdot 100 \quad (4.41)$$

$Z_{\text{hSIT}}$  ..... impedance sítě

$Z_{\text{hPF}}$  ..... impedance pasivního filtru

Z rovnice vidíme, že účinnost filtrace je tím větší, čím menší je impedance pasivního filtru. Z praxe víme, že účinnost filtrace se pohybuje kolem 80 %.

#### 4.1.5. Výhody a nevýhody pasivních filtrů

Na závěr této podkapitoly ještě lze uvést následující výhody a nevýhody pasivních filtrů, pokud provedeme porovnání s dalšími filtračními prostředky jakými jsou aktivní filtry.

- + snadná konstrukce (použita pouze indukčnost  $L$  a kapacita  $C$ )
- + dobré zkušenosti
- + snadné naladění, ale na místě
- + levné oproti jiným způsobům filtrace
- vlastnosti filtrace závisí na parametrech naladění filtru
- vliv na rezonanční kmitočet vlivem změny parametrů filtru
- vliv parametrů zátěže a sítě na vlastnosti filtrace
- nebezpečí rezonancí v elektrické síti při určité konfiguraci sítě

### 4.2. Aktivní filtry

V dnešní době jsou výkonové polovodičové součástky již na takové úrovni, že lze jejich prostřednictvím provádět řízení elektrizační soustavy (sítě VN a VVN). Jedna ze skupin zařízení, která toto řízení umožňuje, je známá pod zkratkou FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) a druhá pod zkratkou CP (Custom Power). Zařízení FACTS jsou zaměřena na užití v přenosových systémech a mají za úkol zlepšit řízení a využití přenosových vedení. Zařízení CP (na straně spotřebitele) mají zvýšit spolehlivost a kvalitu dodávek elektrické energie pro spotřebitele. Oba typy zařízení vycházejí ze stejného principu a mají společnou technologickou koncepci, jejichž účel je však rozdílný:

Systémy FACTS řeší zejména:

- regulaci napětí a jalového výkonu,
- regulaci toku výkonů,
- stabilita a vyšší využití přenosových schopností sítě.

Zařízení CP řeší zejména:

- bezkontaktní spínání velkých zkratových proudů nebo opětovné zapínání do zkratu,
- ochranu citlivých zátěží úpravou křivky napájecího napětí na požadovanou kvalitu,
- regulaci jalové energie, symetrizaci odběrů a aktivní filtraci harmonických nelineárních zátěží (řešení zpětných vlivů zátěží na napájecí rozvodnou síť).

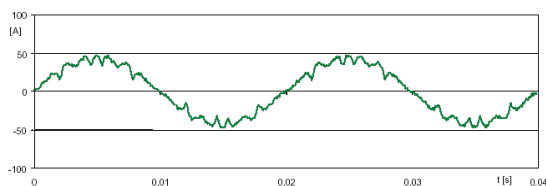


K hlavním zařízením využívajícím výkonové polovodičové součástky a výkonovou elektroniku patří:

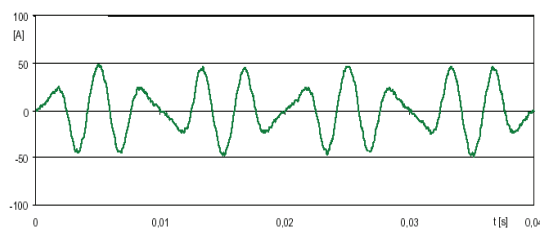
- UPFC (Unified Power Flow Controller) – univerzální regulátor toku výkonu,
- UPQC (Unified Power Quality Conditioner) – univerzální kondicionér kvality elektrické energie,
- SSSC (Static Synchronous Series Compensator) – statický synchronní sériový kompenzátor,
- STATCOM (Static Synchronous Compensator) – statický synchronní kompenzátor.

#### 4.2.1. Aktivní výkonové filtry

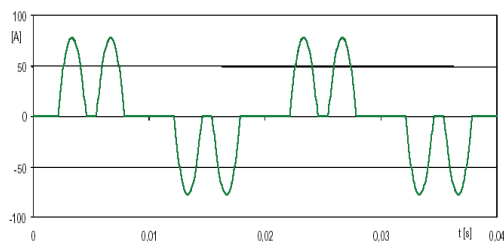
Aktivní výkonové filtry (APF) mohou plnit celou řadu různých funkcí, což je dáno jejich začleněním do systému a dále také způsobem řízení. Podle funkcí, které aktivní filtry plní, se využívají v zařízeních FACTS (Flexible Alternating Current Transmission System) nebo CP (Custom Power). Aktivní filtr lze použít pro kompenzaci vyšších harmonických, jalového výkonu, nesymetrie, flickeru a řízení velikosti napětí a kmitočtu.



**Obr. 4.10: Proud neřízeného usměrňovače s kapacitní zátěží**



**Obr. 4.11: Proud z aktivního filtru**

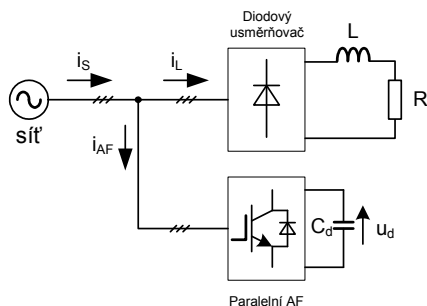


**Obr. 4.12: Proud neřízeného usměrňovače s kapacitní zátěží**

Aktivní filtr je tvořen výkonovými obvody a vícefázovým polovodičovým můstkem se stejnosměrným napětovým meziobvodem, který je řízen pulzně šířkovou modulací (PWM). Tyto filtry lze zapojit jako řízené generátory sériově či paralelně ke spotřebiči, který je zdrojem rušení. Principem funkce aktivního filtru je, že měřicí jednotka provede vzorkování průběhu síťové veličiny (napětí nebo proud), který chceme vyfiltrovat od vyšších harmonických (viz obr. 4.11) a poté provede řízenou injekci této veličiny do sítě (proud – přímo do uzlu, napětí – přes transformátor) stejného frekvenčního spektra jako bylo vzorkované (kromě 1. harmonické) s opačnou fází (viz obr. 4.11). Po sečtení těchto dvou průběhů získáme výslednou veličinu bez obsahu vyšších harmonických (viz obr. 4.12).

#### 4.2.2. Paralelní aktivní filtr

Paralelní aktivní výkonový filtr (APF) je tvořen řízeným generátorem proudu zapojeným paralelně k zátěži. Takto zapojený aktivní filtr je schopen odstranit nežádoucí vyšší harmonické proudy tím způsobem, že generuje shodné složky proudu, ale opačné fáze a ty zavádí do sítě. Výsledný proud je potom zbaven zvolených vyšších harmonických proudů. Tímto způsobem lze filtrovat proud odebíraný ze sítě a také lze provést úpravy napětí způsobené zátěží. Takto zapojený APF umožňuje také v každém okamžiku provést selektivní kompenzaci podle požadovaného výskytu harmonických složek bez nebezpečí, že dojde k nežádoucí rezonanci sítě. Zapojení paralelního aktivního filtru je zobrazeno na obr. 4.13.

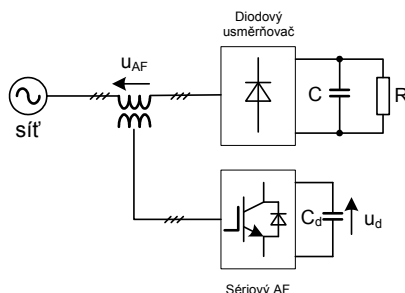


**Obr. 4.13: Zapojení paralelního APF do sítě**

### 4.2.3. Sériový aktivní filtr

Sériový aktivní výkonový filtr je zapojen mezi svorky sítě a spotřebiče a je tvořen generátorem napětí. Podobně jako paralelní aktivní filtr upravuje proud, sériový aktivní filtr upravuje napětí. Sériový aktivní filtr má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy a špičky napětí, odstraňovat vyšší harmonické a zajišťovat symetrické rozložení napětí. Zapojení sériového aktivního filtru je zobrazeno na obr. 4.14.

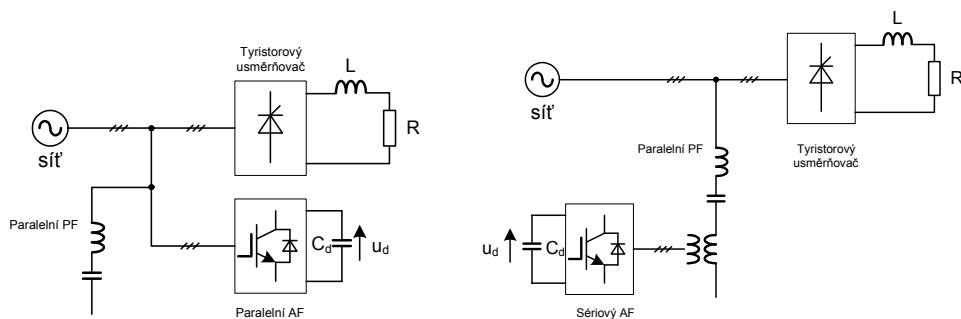
Oba způsoby připojení (paralelní a sériový aktivní filtr) lze kombinovat v jeden celek a tím vznikne systém zajišťující jak vhodné napětí v místě připojení, tak i definovaný průběh odebíraného proudu. Paralelní část aktivního filtru je připojena paralelně k zátěži a slouží pro kompenzaci proudů zátěže, sériová část aktivního filtru je připojena na straně napájecí sítě a pracuje jako blokovací filtr. Sériová část filtru má schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy a špičky, odstraňovat vyšší harmonické, zajišťovat symetrické rozložení napětí. Derivační část kompenzuje harmonické proudy zátěže, reaktivní výkon odebíraný zátěží a nesymetrii zátěže, navíc zajišťuje požadovanou velikost stejnosměrného napětí v meziobvodu.



Obr. 4.14: Zapojení paralelního APF do sítě

### 4.2.4. Hybridní aktivní filtry

Použití samotných výkonových filtrů není zejména pro větší výkony optimální a to z důvodů vyšší ceny a problémy s řízením. Z těchto důvodů se využívá kombinace aktivních filtrů s klasickými pasivními filtry. Tyto sestavy se označují jako kombinované nebo hybridní výkonové filtry (HPF). Principiální schéma zapojení paralelního a sériového APF a pasivního filtru ukazují obr. 4.15.



**Obr. 4.15: Princip zapojení kombinovaného APF**

Nyní můžeme porovnat jednotlivé způsoby filtrací pomocí pasivních, aktivních a hybridních výkonových filtrů:

Nevýhody pasivních filtrů:

- vysoké náklady inženýrského řešení
- problémy interakce sítě
- nutné naladění na místě
- menší účinnost
- choulostivé na spínací operace v síti

Vlastnosti aktivních filtrů:

- malé náklady inženýrského řešení
- vyšší harmonické vyvolané pulzně šířkovou modulací (PWM) mohou téci do ostatních pasivních filtrů
- možné paralelní řazení pro větší výkony

Vlastnosti hybridních aktivních filtrů:

- střední náklady inženýrského řešení
- změna impedance sítě neovlivní kompenzaci vyšších harmonických
- vyšší harmonické jiných spotřebičů nejsou interaktivní s pasivním filtrem
- možné modifikace aplikace
- zabudovaný pasivní filtr umožňuje kompenzaci jalového výkonu
- výkonové dimenzování HPF je jen 5 ÷ 8 % jmenovitého výkonu zátěže
- cena vazebního transformátoru zvyšuje cenu filtru
- je třeba naladit na místě

Na závěr je uvedena *tab. 4.1* popisující možné rozdělení aplikace pasivních, aktivních nebo hybridních filtrů podle výkonu zátěže.

| Výkon zátěže     | Pasivní filtr             | Paralelní aktivní filtr | Kombinovaný sériový a pasivní filtr |
|------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| < 500 kVA        | Nejhorší řešení           | Nejlepší řešení         | Možné řešení                        |
| 500 kVA až 5 MVA | Možné řešení              | Nevhodné velká spotřeba | Nejlepší řešení                     |
| >5 MVA           | Nejlepší řešení min. cena | Nevhodné velká spotřeba | Nevhodné                            |

**Tab: 4.1: Porovnání aplikace různých typů filtrů podle velikosti zátěže**

### 4.3. Literatura

- [1] Angot A.: Užité matematické pro elektroinženýry, SNTL Praha 1971
- [2] Čížek V.: Diskrétní Fourierova transformace a její použití, SNTL Praha 1981
- [3] Sýkora T.: Kvalita elektrické energie v distribučních sítích, Disertační práce, Praha 2011
- [4] ČSN EN 50160 (33 0122): Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, Český normalizační institut, Praha 2011
- [5] Kús V.: Rušivé vlivy měničů a jejich omezení, ZČU Plzeň 1996
- [6] Hodinka M.: Vybrané problémy z elektrizačních soustav, VUT Brno 1988
- [7] Tlustý J.: Energetická rušení v průmyslových a distribučních sítích, Praha 1999
- [8] Douglas F. E.: Handbook of Digital Signal Processing Engineering Applications

## 5. Vznik kolísání napětí v síti, jeho vyhodnocování a měření

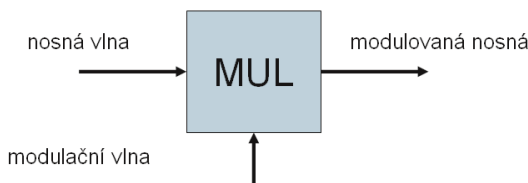
Kombinace velkých změn proudu u spotřebičů a vysoká impedance rozvodné sítě může způsobit velké změny napájecího napětí. Tyto proudy mohou být činné nebo jalové. Jestliže se velké změny opakují v krátkých časových intervalech, způsobují zřetelné kolísání svítivosti. Z fyzikálního hlediska lze kolísání napětí přirovnat k amplitudové modulaci. Nosným signálem je napájecí napětí o síťovém kmitočtu a modulačním signálem je časově proměnný úbytek napětí. Kolísání napětí v elektrické síti může mít periodický, nebo čistě stochastický charakter. V případě periodického charakteru kolísání můžeme dále modulační složku rozdělit na harmonickou a neharmonickou.

Příklady zdrojů kolísání napětí v rozvodné síti:

- a) obloukové pece,
- b) svářecí agregáty (odporové a obloukové),
- c) řízené měniče pro napájení technologických pohonů,
- d) spouštění asynchronních motorů,
- e) spotřebiče s pulzujícím odběrem
- f) spínání a vypínání velkých zátěží.

Amplitudová modulace může být řešena jako součinnová nebo součtová. Součinnová modulace se používá pro modelování signálu testovacího generátoru nebo pro modelování statického kolísání. Součtová modulace je vhodnější pro modelování signálu kolísání napětí, který je ovlivněn i interharmonickými signály.

### Součinnová amplitudová modulace



**Obr. 5.1: Princip součinnové amplitudové modulace**

Pro modulovaný nosný signál harmonickou modulační vlnou platí:

$$u_{AM}(t) = \left[ 1 + \frac{\Delta u}{200} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot t) \right] \cdot \sqrt{2} U \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t) \quad (5.1)$$

$u(t)$ .....amplitudově modulovaný signál sinusovkou (V)

$U$ .....efektivní hodnota napětí sítě o frekvenci 50 Hz (V)

$\Delta u$  .....relativní hodnota modulační složky napětí (%)

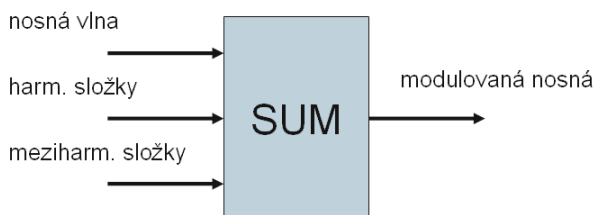
$f_m$  .....frekvence modulační složky napětí (Hz)

Pro modulovaný nosný signál neharmonickou modulační vlnou platí:

$$\begin{aligned} u_{AM}(t) &= \left[ 1 + \frac{\Delta u}{200} \right] \cdot \sqrt{2} U \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t), \\ \text{pro } t &= 0 \div \frac{T_m}{2}, T_m \div \frac{3}{2} T_m, \dots \\ u_{AM}(t) &= \left[ 1 - \frac{\Delta u}{200} \right] \cdot \sqrt{2} U \cdot \sin(100 \cdot \pi \cdot t), \\ \text{pro } t &= \frac{T_m}{2} \div T_m, \frac{3}{2} T_m \div 2 T_m, \dots \end{aligned} \quad (5.2)$$

$T_m$  .....je perioda modulační složky napětí (s)

### Součtová amplitudová modulace



**Obr. 5.2: Princip součtové amplitudové modulace**

$$u_{AM}(t) = u(t) + u_I(t) + u_{IH}(t) \quad (5.3)$$

$u(t)$  .....amplitudově modulovaný signál sinusovkou (V)

$u_H(t)$  .....harmonické složky (V)

$u_{IH}(t)$  .....interharmonické složky (V)

Výraz interharmonická frekvence se používá na označení takových frekvencí v napájecí síti, které nejsou celočíselnými násobky frekvence 50 Hz. Mezi zdroje interharmonických frekvencí patří především:

- a) frekvenční měniče,
- b) velké asynchronní motory,
- c) cyklokonvertory,

- d) obloukové pece,
- e) hromadné dálkové ovládání (HDO).

## 5.1. Základní pojmy a názvosloví

**Kolísání napětí** (*Voltage fluctuations*) definuje třetí část evropské normy EN 60 555. Základní pojmy, ze kterých vychází, jsou:

**Změna napětí** (*Voltage change*) – změna efektivních (případně maximálních) hodnot napětí mezi dvěma sousedními úrovněmi napětí, mezi nimiž stoupá či klesá konečný, ale nespecifikovaný čas.

**Amplituda změny napětí** (*Magnitude of a voltage change*) – rozdíl mezi efektivními (případně maximálními) hodnotami napětí před a po změně napětí.

**Relativní změna napětí** (*Relative voltage change*) – poměr amplitudy změny napětí ku specifikované hodnotě napětí.

**Doba trvání změny napětí** (*Duration of a voltage change*) – interval času, v němž napětí stoupá či klesá z počáteční na konečnou hodnotu.

**Interval změny napětí** (*Voltage change interval*) – interval času, který uplyne od počátku jedné změny napětí do počátku následující změny napětí.

**Kolísání napětí** (*Voltage fluctuation*) – série změn napětí nebo cyklická změna obálky napětí.

**Sinusové kolísání napětí** (*Sinusoidal voltage fluctuation*) – kolísání napětí, u níž je křivka kolísání sinusová.

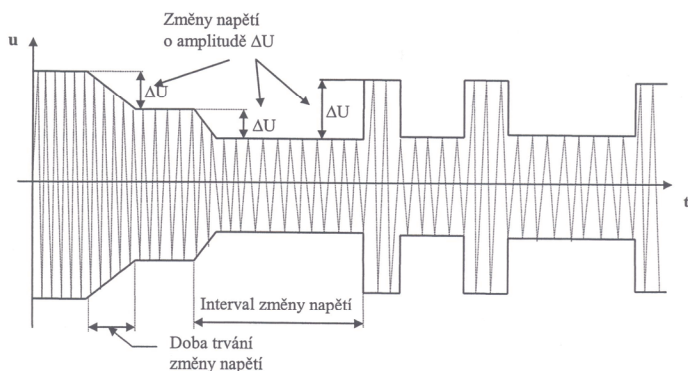
**Amplituda kolísání napětí** (*Magnitude of a voltage fluctuation*) – rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou napětí v průběhu kolísání napětí.

**Četnost výskytu změn nap.** (*Rate of occurrence of voltage changes*) – počet změn napětí za jednotku času.

**Blikání** (*Flicker*) – subjektivní vjem blikání.

**Měřič blikání** (*Flickermetr*) – přístroj určený pro měření veličin spojených s jevem flickeru. Ten je definován jako soubor rychlých změn světelného toku v reakci na kolísání amplitudy napětí.





**Obr. 5.3: Ilustrace k základním pojmům definice kolísání napětí**

Z uvedených pojmů jsou pro popis flickeru důležité opakované změny v napájení, tedy kolísání napětí. Napěťové změny jsou v reálných situacích často pod hranicí citlivosti běžných elektrických přístrojů, takže chyby v jejich činnosti tím způsobené se vyskytují velmi zřídka. I když toto kolísání napětí činí jen několik desetin procenta (pro frekvenci periodického kolísání 8,8 Hz cca 0,25 %), může způsobit velmi nepříjemné změny ve světelném záření světelných zdrojů, které jsou tímto napětím napájeny. Zvláště pokud se jedná o opakované kolísání s frekvencí 5 ÷ 18 Hz. Jelikož je lidské oko velice citlivé na flicker, musí být změny napětí udrženy na velmi úzkých mezích (tímto se zabývají normy pro omezování kolísání napětí a flickeru). U zařízení jednotlivých odběratelů je proto nutné ověřit, zda změny zátěže, vyvolané těmito zařízeními (zapínání, vypínání, střídavá zátěž, atd. ...), nevedou k nepřístupným hodnotám flickeru.

Mezní hodnoty: K dodržení tolerančního pásma dle IEC pro pravoúhlé změny je limitem hodnota 3 %. Pro kolísání napětí s kmitočtem okolí 18 Hz je rozhodujícím kritériem flicker a z hlediska kolísání napětí je mezní hodnota přibližně 0,3 %.

## 5.2. Hodnocení míry vjemu blikání

Postupy hodnocení míry vjemu blikání vycházejí z norem IEC. Kolísání napětí lze určit jednak přímou metodou měřičem blikání nebo analyticky. Cílem měření je zjistit mezní kolísání napětí, která mohou být způsobena jednotlivým spotřebičem při zkoušce za stanovených podmínek. Jsou stanoveny různé typy kolísání napětí, které vyžadují různé metody určování blikání. Třídění do jednotlivých typů přináší jisté obtíže. V jednoduchých případech je obvykle možné určit kolísání napětí výpočtem nebo přímo měřičem blikání. Přitom platí, že dvě nebo více změn ve stejném směru, vyskytující se v celé periodě ne více než 30 ms, jsou považovány za jednu změnu. Tato perioda byla zvolena na základě toho, že lidské oko nerozlišuje odděleně změny, jež se vyskytnou v tomto čase.

Výsledný činitel rušení  $A$  se přibližně určí jako součet trvání účinků flickeru, vztážený na časový interval, ve kterém se kolísání napětí vyskytuje:

$$A_{st} = \frac{\sum t_f}{10 \text{ min}}, \quad A_{lt} = \frac{\sum t_f}{120 \text{ min}} \quad (5.4)$$

| Přípustná velikost rušení   |     | $A_{lt}$ | $A_{st}$ | $P_{lt}$ | $P_{st}$ | $d$   |
|-----------------------------|-----|----------|----------|----------|----------|-------|
| v síti                      | nn  | 0,4      | 1        | 0,75     | 1        | ----- |
|                             | vn  | 0,3      | 0,75     | 0,7      | 0,9      | ----- |
|                             | vvn | 0,2      | 0,5      | 0,6      | 0,8      | ----- |
| zařízení jednoho odběratele | nn  | 0,05     | 0,2      | 0,4      | 0,6      | 0,03  |
|                             | vn  | 0,05     | 0,2      | 0,4      | 0,6      | 0,02  |
|                             | vvn | 0,05     | 0,2      | 0,4      | 0,6      | 0,02  |

**Tabulka 5.1: Přípustné hodnoty relativních změn a činitele flickeru**

Souhrnně jsou přípustné velikosti relativních změn napětí i činitele flickeru uvedeny v následující tabulce, převzaté z IEC a PNE 333430-2, která obsahuje přepočtené a zaokrouhlené hodnoty  $P_{lt}$  a  $P_{st}$  ( $P_{st}$  – hodnota krátkodobé míry vjemu blikání,  $P_{lt}$  – hodnota dlouhodobé míry vjemu blikání).

Vztah mezi  $A_{st}$  resp.  $A_{lt}$  a  $P_{st}$  resp.  $P_{lt}$  je následující:

$$A_{st} = P_{st}^3, \quad A_{lt} = P_{lt}^3 \quad (5.5)$$

Vyšší hodnoty  $A_{st}$  a  $A_{lt}$ , pro jednotlivá zařízení odběratele, jsou možné ve výjimečných případech, když je zjištěno, že pro celou síť není překročena přípustná hladina v době, kdy se svítí. Vyšší hodnoty relativní změny napětí  $d$  jsou výjimečně přípustné, pokud se vyskytnou pouze jednou a méně za den.

Koeficient  $P_{st}$  je zaveden pro určování rušení způsobeného zdroji s krátkým pracovním cyklem. Veličina  $P_{lt}$  slouží k vyhodnocování rušení způsobeného kombinací několika rušících zařízení, pracujících náhodným způsobem (svářecí zařízení, motory), nebo zdroji s dlouhým nebo proměnným pracovním cyklem (obloukové pece). Za tímto účelem se musí z hodnot krátkodobé míry vjemu flickeru  $P_{st}$  odvodit dlouhodobá míra vjemu flickeru  $P_{lt}$  po dobu odpovídající pracovnímu cyklu zatížení nebo periody, po kterou pozorovatel může reagovat na flicker.

V IEC 61000-3-7 se doporučuje  $P_{lt}$  počítat za dobu 2 hodin z dvanácti po sobě následujících hodnot  $P_{st}$ , vyhodnocovaných v desetiminutových periodách:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{sti}^3} \quad (5.6)$$

Bylo zjištěno, že spojování účinků kolísání různých zatížení vyjádřených individuálními mírami vjemu flickeru  $P_{sti}$   $i$ -tého spotřebiče může být vyjádřeno tímto způsobem:

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_i P_{sti}^m} \quad (5.7)$$

Hodnota použitého koeficientu  $m$  závisí na charakteru hlavního zdroje kolísání a může být roztržena do pěti kategorií:

- $m = 4$ : Používá se jen pro sčítání změn napětí způsobených obloukovými pecemi ve zvláštním režimu.
- $m = 3$ : Používá se pro většinu změn napětí, kde je riziko současnosti malé. Převážná většina studií o slučování nezávislých jevů spadá do této kategorie, která by měla být používána všude tam, kde vzniká riziko výskytu současných změn napětí.
- $m = 3,2$ : Což odpovídá sklonu přímkové části křivky  $P_{st} = 1$ .
- $m = 2$ : Používá se při pravděpodobném současném výskytu stochastického šumu, tj. současné tavby na obloukových pecích.
- $m = 1$ : Výsledné  $P_{st}$  se blíží hodnotě dané tímto koeficientem při velké součinnosti změn napětí.

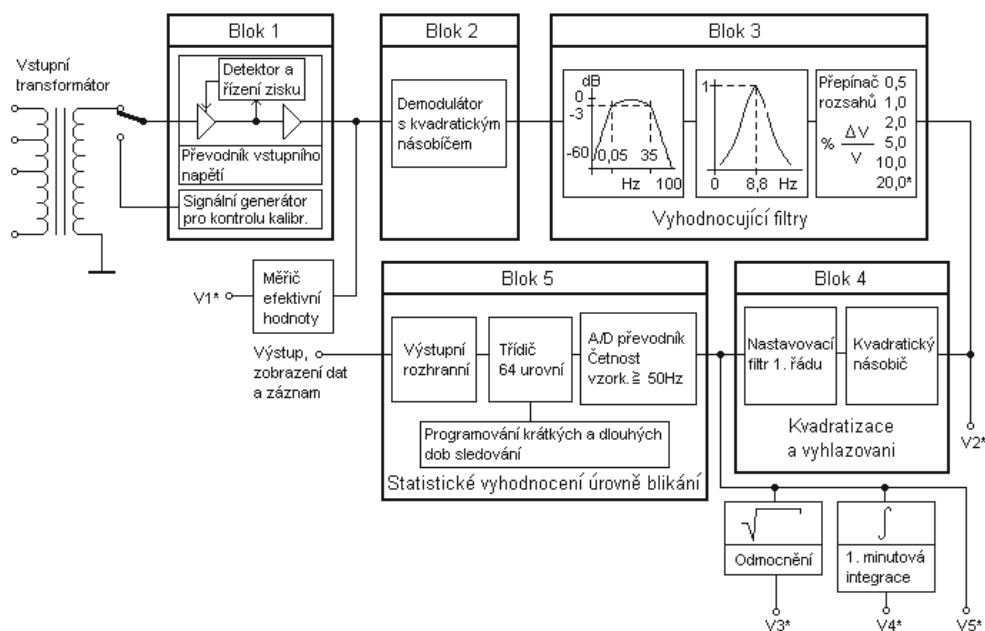
Pro zjednodušení výpočtů je vhodné položit  $m = 3$ , což odpovídá nejreprezentativnější situaci superpozice kolísání. Dlouhodobá míra vjemu flickeru je rovna třetí odmocnině průměru z třetích mocnin hodnot  $P_{sti}$ , které se vyskytly během doby sledování.

$$P_{st} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N P_{sti}^3}{N}} \quad (5.8)$$

### 5.3. Problematika měření flickeru

V případě přímého měření se použije měřič blikání specifikovaný v těchto normách:

- ČSN EN 60868 (Měřič blikání, specifikace funkce a dimenzování),
- ČSN EN 61000-4-15 (EMC – Část 4: Zkušební a měřicí technika – Oddíl 15: Měřič blikání – Specifikace funkce a dimenzování),
- ČSN EN 60868-0 (Měřič blikání, Část 0: Vyhodnocení míry vjemu blikání).



**Obr. 5.4: Blokové schéma přístroje pro měření blikání dle ČSN EN 60868**

Nepovinné výstupy:

V1\* ..... indikace efektivní hodnoty půlvlny napětí,

V2\* ..... vyhodnocené kolísání napětí,

V3\* ..... přepínač rozsahů,

V4\* ..... krátkodobá integrace,

V5\* ..... výstup okamžité hodnoty  $P(t)$ , záznam.

### Blok 1:

Převodník vstupního napětí je přizpůsobovací obvod napětí, který redukuje rozsah efektivní hodnoty vstupního napětí síťového kmitočtu na vnitřní referenční úroveň. Tímto způsobem měření blikání může být provedeno nezávisle na skutečné úrovni vstupního nosného napětí (síťové napětí s kmitočtem 50 Hz) a vyjádřeno v procentech.

### Blok 2:

Kvadratický demodulátor - účelem tohoto bloku je obnovit signál kolísání napětí kvadratickým vstupního napětí odstupňovaně k referenční úrovni a tak modelovat chování světelného zdroje. Světelný tok je totiž úměrný elektrickému výkonu a ten je úměrný kvadrátu napětí.

### Blok 3:

Filtr stejnosměrné složky eliminuje výraznou stejnosměrnou složku, která vzniká umocněním vstupního signálu. Podle doporučení normy je pro eliminaci doporučený filtr typu horní propust 1. řádu s frekvencí řezu 0,05 Hz (tzv. Butterworthův filtr). Pro eliminaci složek vyšších kmitočtů je podle norem doporučen filtr typu dolní propust 6. řádu, s kmitočtem řezu 35 Hz (tzv. Butterworthův filtr šestého řádu). Filtr frekvenčního přenosu žárovky a lidského oka modeluje kmitočtovou odezvu na sinusové kolísání napětí plynem plněné žárovky s cívkově vinutým vláknem (60 W ÷ 230 V) v kombinaci se systémem vidění. Funkce odezvy je založena na prahu citlivosti pro každý kmitočet, který byl sledován u 50 % zkoušených osob.

### Blok 4:

Kvadratizace slouží pro modelování nelineárního vnímání oko / mozek. V principu se opět jedná o to, že jednotlivé vzorky výstupního signálu z předchozího filtru umocníme na druhou. Vyhlažování - výstup bloku pro vyhlazení představuje okamžitou citlivost na blikání. Spolu s předchozím blokem simuluje vnímání světelného toku v lidském mozku. Je tvořen dolní propustí 1. řádu, které vytváří klouzavou střední hodnotu se střední hodnotou 300 ms.

Z výše uvedené koncepce měřiče blikání vyplývá, že je navržen pro klasickou 60 W žárovku, která byla v minulosti velmi rozšířená. Ta je však i s dalšími vybranými světelnými zdroji stažena (jsou stahovány) z prodejního trhu (nařízení Evropského parlamentu 2005/32/EC, viz *odst. 4.5*). Vzniká tak tedy potřeba navrhnout měřič blikání pro jiný typ světelného zdroj nebo pro několik různých typů světelných zdrojů. Při znalosti parametrů přenosové funkce kolísání světelného toku těchto světelných zdrojů, je pak možné měřicí přístroj blikání modifikovat. Je však otázka, zda toto bude v budoucnu potřeba, když vliv elektronizace světelných zdrojů minimalizuje nebo úplně odstraňuje jejich blikání.

## 5.4. Prostředky pro omezení kolísání napětí

Při omezování kolísání napětí se snažíme o zvětšení zkratových výkonů. Velikost kolísání lze tedy snížit např. tím, že se zařízení vyvolávající kolísání napětí připojí do sítě s dostatečným zkratovým výkonem, nebo se provede zesílení sítě tím, že se zvětší její zkratový výkon. Zvětšením zkratového výkonu lze také omezit kolísání napětí vyvolané změnami činného a jalového výkonu.

Zvětšení zkratového výkonu je možné systémově provést následujícími způsoby:

- a) zvětšením průřezu napájecího vedení (zdvojení přívodů),
- b) zvětšením zkratového výkonu napájecího transformátoru,
- c) připojením nového generátoru, synchronního kompenzátoru,
- d) zmenšením impedance napájecího vedení pomocí sériové kompenzace,
- e) připojením do vyšší napěťové hladiny.

Omezení kolísání napětí lze také řešit přímo u zdrojů, které kolísání nejvíce způsobují:

- a) Napájení z jednoho bodu: snížení vlivu kolísání napětí dosáhneme vhodným časovým rozvržením provozu jednotlivých zařízení, čímž se sníží společný vliv na napájecí síť.
- b) Rozběh motorů: jeho vliv lze omezit například speciálně vinutou kotvou, použitím tračnicku nebo soft startem.
- c) Svářecí agregáty: u nich lze kolísání napětí snížit blokováním překrýváním napěťových pulsů, změnou tvaru svářecího pulsu, použitím DC svářecích agregátů nebo změnou taktu svařování.
- d) Obloukové pece: snížení kolísání napětí se dosáhne použitím kompenzace, změnou regulace elektrod, použitím reaktorů nebo přestavbou na DC obloukové pece.

Doporučuje se, aby se u zařízení s velkými změnami jalového výkonu používala dynamická kompenzace.

Účinky kolísání napětí na flicker světelných zdrojů lze snížit i jejich vhodným výběrem. Obecně platí, že některé typy klasických trubicových zářivek s elektronickým předřadníkem vynikají velmi malou citlivostí na kolísání napětí a je vhodné je použít k omezení flickeru. Na druhou stranu je nutno poznamenat, že některé světelné zdroje mají citlivost na flicker ještě větší než žárovky. Jejich nevážená nebo nahodilá instalace může flicker naopak zdůraznit, a proto je vhodné při návrhu osvětlení věnovat pozornost i předpokládané velikosti kolísání napětí a tomu uzpůsobit i světelné zdroje.

Jako progresivní zařízení sloužící k potlačení kolísání napětí (ale nejen toho) se začínají stále více uplatňovat systémy FACTS (**F**lexible **A**lternating **C**urrent **T**ransmission **S**ystems). FACTS jsou tzv. flexibilní systémy pro přenos střídavého proudu. „Tento termín pokrývá řadu technologií, které zvyšují bezpečnost, kapacitu a flexibilitu systémů pro přenos elektrické energie. Tyto technologie lze instalovat v rámci nového nebo již existujícího přenosového zařízení.“

Vlastnosti aplikace technologie lze shrnout do následujících bodů:

- zvyšuje spolehlivost sítě,
- zvyšuje energetickou propustnost stávajících vedení,
- zlepšuje stabilitu napětí,
- posiluje odolnost sítě proti kolísání a rušivým vlivům,
- zlepšuje provozní hospodárnost,
- menší vliv na životní prostředí,
- minimalizace poklesů napětí způsobené poruchou.

V dalším textu se zaměříme pouze na paralelní a sériovou kompenzaci řešenou prostřednictvím systémů FACTS. V odborné literatuře se většinou setkáváme s jejich idealizovanými modely. Ve skutečnosti však dochází k dalším procesům, které ovlivňují charakter jejich řízení a výskyt energetického rušení. Základním

stavebním prvkem systémů FACTS pro paralelní a sériovou kompenzaci jsou tyristorově řízené reaktory (cívky), kterým se budeme podrobněji věnovat.

### Omezení kolísání napětí kompenzací jalového výkonu

Při úplné kompenzaci jalového výkonu se uplatní jen odporový úbytek napětí, takže klesne hodnota  $P_{st}$ , pokud je ovšem kompenzace dostatečně rychlá. Za rychlý kompenzátor účinníku, který je schopen výraznějším způsobem vyrovnávat kolísání napětí, lze považovat:

- 1) zvláštní druhy synchronních strojů, vybavených i rychlým regulátorem  $Q$ ,
- 2) kompenzační systémy s transduktorovým řízením,
- 3) kompenzační filtry s tyristorovou fázovou regulací,
- 4) stupňové kondenzátorové kompenzátory se synchronními fázovými spínači,
- 5) aktivní filtry pracující na principu pulzně-šířkové modulace PWM s tranzistory IGBT.

Všechny druhy kompenzace se vyznačují dobou zpoždění  $t_d$  o délce několik půlperiod síťového napětí – nejkratší teoretická mez potřebná ke stanovení fázového posunu spotřebiče je 10 ms.

Doba ustálení pro případy 1., 2. a částečně i 4. je asi 10 period (do 200 ms), u zpětnovazebních systémů i více. Kompenzační filtry – 3. mají dobu reakce 1 až 2 periody (do 40 ms). U posledního případu 5. je doba reakce  $< 10$  ms. Přibližné úvahy můžeme provádět např. za předpokladu, že se uplatňuje pouze zpoždění o délce jedné síťové periody, tj.  $t_d = 20$  ms a  $t_r \rightarrow 0$ .

Typickými spotřebiči s rychlými změnami reaktivního odběru jsou:

- svářecí stroje odporové i obloukové,
- obloukové pece,
- tyristorové pohony,
- tvářecí a dělicí stroje (lisy, pily, katry atd.),
- transportní zařízení,
- výrobní linky,
- ale také některé spotřebiče v domácnosti (např. elektrická trouba).

## 5.5. Napěťová nesymetrie

Napěťová nesymetrie je dána nerovnoměrným rozložením zatížení na tři fáze, což má za následek vznik nesymetrických proudů. Tyto nesymetrické proudy vlivem impedance sítě způsobují nesymetrii napětí.

### 5.5.1. Zdroje napěťové nesymetrie

Typickým příkladem nesymetrického zatěžování v sítích nn jsou jednofázové spotřebiče. Nesymetrické odběry na napěťové úrovni vn a vvn mohou být způsobeny:

- indukčními pecemi pracující se sítovou frekvencí 50 Hz
- odporovými tavicími pecemi
- odporovými svářečkami
- obloukovými pecemi (EOP)
- obloukovými ocelářskými tavicími pecemi

Jednofázové zátěže zapojené mezi fází a střední vodič je možné provozovat pouze v sítích nn. Aby bylo zabráněno nárůstu nesymetrie napětí při současném působení více jednofázových spotřebičů, provede se stejnoměrné rozdělení těchto odběrů na jednotlivé fáze. U těchto odběrů není třeba provádět kontrolu z hlediska nesymetrie napětí vzhledem k poměru výkonů  $S_A/S$  ( $S_A$  – zdánlivý výkon jednoho zařízení,  $S$  – celkový připojený zdánlivý výkon), který je většinou menší než 1 % a tudíž zanedbatelné.

### 5.5.2. Měření a posuzování vlivů napěťové nesymetrie

Měřené veličiny jsou buď fázová nebo sdružená napětí. Minimální požadavek na vzorkování je 32 Sample / periodu. Nižší vzorkovací frekvence lze použít při zapojení analogového filtru, který potlačí vyšší harmonické. Měřicí transformátory musí být identické a se stejnou zátěží. Výpočet napěťové nesymetrie podle následujícího vzorce:

$$u_u = \frac{\max[\bar{U} - U_i]}{\bar{U}} \quad (5.9)$$

$$\bar{U} = \frac{U_a + U_b + U_c}{3} \quad (5.10)$$

$u_u$ .....napěťová nesymetrie (-)

$U_a, U_b, U_c$  ...okamžité hodnoty napětí ve fázi a, b, c (V)

$\bar{U}$  .....průměrná hodnota napětí (V)

Tato metoda je nenáročná na měřicí techniku a výpočet, ale můžeme se v ní dopustit až 13 % chyby. Proto metoda vychází přímo z definice stupně napěťové nesymetrie, kdy po vzorkování a odfiltrování vyšších harmonických lze získat fázory  $\hat{U}_a, \hat{U}_b, \hat{U}_c$ , pomocí nichž se spočítá  $u_u$  jako:



$$u_u = \left| \frac{\hat{U}_a + \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_b + \hat{a} \cdot \hat{U}_c}{\hat{U}_a + \hat{a} \cdot \hat{U}_b + \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_c} \right| \quad (5.11)$$

$\hat{a}^2, \hat{a}$  .....úhlové natočení fázoru (-)

Pomocí dvou sdružených napětí lze spočítat napěťovou nesymetrii jako:

$$u_u = \left| \frac{\hat{U}_{ab} - \hat{a} \cdot \hat{U}_{bc}}{\hat{U}_{ab} - \hat{a}^2 \cdot \hat{U}_{bc}} \right| \quad (5.12)$$

Měřená sdružená napětí jsou vzorkována, filtrována a jsou stanoveny jejich moduly  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ . Potom z nich lze napěťovou nesymetrii spočítat jako:

$$u_u = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (5.13)$$

$$\beta = \frac{U_{ab}^4 + U_{bc}^4 + U_{ca}^4}{(U_{ab}^2 + U_{bc}^2 + U_{ca}^2)^2} \quad (5.14)$$

Tyto vzorce se týkaly výpočtu okamžitých hodnot stupně napěťové nesymetrie. Většinou nás ovšem zajímají dlouhodobější účinky napěťové nesymetrie na elektrické stroje a přístroje. Proto je třeba stanovit dlouhodobé hodnoty  $u_u$  v různých intervalech. CIGRE – CIRED Working Group 02 doporučuje intervaly vyhodnocení  $u_u$  3 s, 10 min a 2 hod. Výpočet je naznačen v následujících vztazích:

$$u_{u3s} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m u_{u-i}^2}{m}} \quad (5.15)$$

$$u_{u10min} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{200} u_{u3s-i}^2}{200}} \quad (5.16)$$

$$u_{u2hod} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} u_{u10min-i}^2}{12}} \quad (5.17)$$

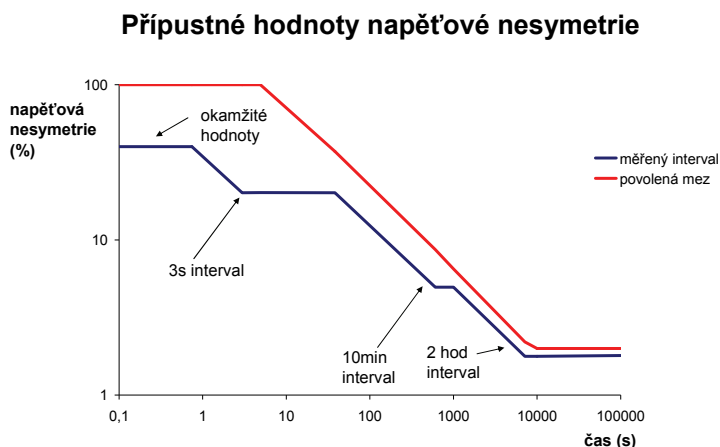
$u_{u3s}$  ..... napět'ové nesymetrie s intervalem vyhodnocení 3 s (-)

$u_{u10\ min}$  ..... napět'ové nesymetrie s intervalem vyhodnocení 10 min (-)

$u_{u2\ hod}$  .... napět'ové nesymetrie s intervalem vyhodnocení 2 hod (-)

### 5.5.3. Přípustné hodnoty napět'ové nesymetrie

Pro dlouhodobě působící napět'ovou nesymetrii lze považovat jako přípustnou hodnotu napět'ové nesymetrie  $u_u = 2\%$ . Tuto přípustnou hodnotu lze v síti zajistit, pokud zařízení jednoho odběratele při všech provozních stavech nevyvolává jednofázové zatížení výsledné rušení v rozsahu minut větší než  $u_u = 0,7\%$ . Přípustné hodnoty závisí i na délce vyhodnocovaného intervalu, které jsou na základě rovnic (5.15) až (5.17) uvedeny na obr. 5.5.



Obr. 5.5: Přípustné hodnoty napět'ové nesymetrie v jednotlivých intervalech

### 5.5.4. Opatření ke snížení vlivů napět'ové nesymetrie

Opatření ke snížení vlivů napět'ové nesymetrie mohou být:

- rozdělení jednofázové zátěže mezi fázové vodiče
- symetrizační zařízení s kondenzátory a tlumivkami
- oddělení měničů
- připojení přes usměrňovač (pozor na vznik vyšších harmonických)
- připojení k místům s vyšším zkratovým výkonem
- transformátor s lomenou hvězdou (u menších výkonů)
- použitím Scottova a nebo Steinmetzova transformátoru

## 5.6. Literatura

- [1] ČSN EN 50160 (33 0122): Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, Český normalizační institut, Praha 2011
- [2] PNE 33 3430-0: Výpočet hodnocení zpětných vlivů odběratelů a zdrojů distribučních soustav
- [3] Tlustý J.: Energetická rušení v průmyslových a distribučních sítích, Praha 1999

## 6. Šíření kolísání napětí v síti

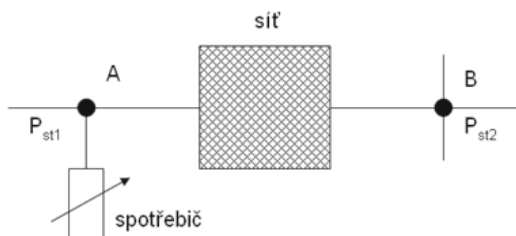
Kolísání napětí se po vedeních šíří z místa svého vzniku všemi směry. Znamená to tedy, že kolísání napětí se šíří:

- směrem k nižším napěťovým úrovním,
- směrem k vyšším napěťovým úrovním,
- ve stejné napěťové hladině, ve které kolísání napětí vzniklo.

Zdroj kolísání napětí se může nacházet na straně sítě nebo na straně zátěže. Máme-li v určitém bodě sítě zdroj kolísání napětí, můžeme v jiném místě sítě, při znalosti její konfigurace a vybraných parametrů, určit transportní změnu velikosti tohoto kolísání. Pro jednotlivé případy můžeme stanovit tzv. transportní koeficienty šíření flickeru  $T_{pst}$ . V následujícím textu se budeme zabývat odvozením těchto koeficientů pro jednotlivé případy. V závěru této kapitoly je uveden modelový příklad výpočtu šíření flickeru, který zároveň doplňuje níže odvozené teoretické poznatky.

### 6.1. Šíření kolísání napětí mezi sítěmi VVN, VN a NN

Na obr. 6.1 je uvedeno modelové schéma sítě, ze kterého určíme transportní koeficient kolísání napětí  $T_{pst}$ , jehož velikost je základním ukazatelem pro posouzení změny kolísání napětí v závislosti na směru šíření mezi sítěmi VVN, VN a NN.



**Obr. 6.1: Modelové schéma sítě pro odvození TML**

Při určování hodnoty  $T_{pst}$  záleží na tom, zda se kolísání bude šířit ve směru A-B, nebo ve směru B-A. Pro tento modelový případ uvádí odborná literatura [25] následující vztah (6.1):

$$T_{pst,A-B} = \frac{P_{st,B}}{P_{st,A}} \quad (6.1)$$

V literatuře se dále udávají typické hodnoty pro šíření z VVN-VN a VN-NN, které byly empiricky zjištěny z reálných naměřených hodnot.

Pro tyto hodnoty platí následující vztahy:

$$T_{pst,VVN-VN} = \frac{P_{st,VN}}{P_{st,VVN}} \approx 0,8 \Rightarrow P_{st,VN} < P_{st,VVN} \quad (6.2)$$

$$T_{\text{pst,VN-NN}} = \frac{P_{\text{st,NN}}}{P_{\text{st,VN}}} \approx 0,95 \div 1 \Rightarrow P_{\text{st,NN}} \leq P_{\text{st,VN}} \quad (6.3)$$

Ze vztahů (6.2) a (6.3) je patrné, že rušení se utlumí v těchto případech:

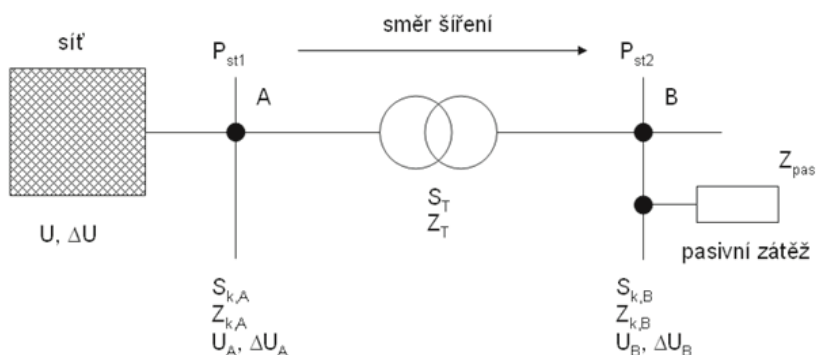
- a) při přenosu rušení ze sítě VN do sítě VVN,
- b) při přenosu rušení ze sítě NN do sítě VN.

Ze vztahů (6.2) a (6.3) dále vyplývá, že rušení se zesílí v těchto případech:

- a) při přenosu rušení ze sítě VVN do sítě VN,
- b) při přenosu rušení ze sítě VN do sítě NN.

## 6.2. Šíření kolísání napětí ze sítě směrem k pasivní zátěži

V tomto případě je zdrojem kolísání napětí sítě. Model šíření je uveden na obr. 6.2. Z tohoto modelu odvodíme vztahy pro stanovení transportního koeficientu.

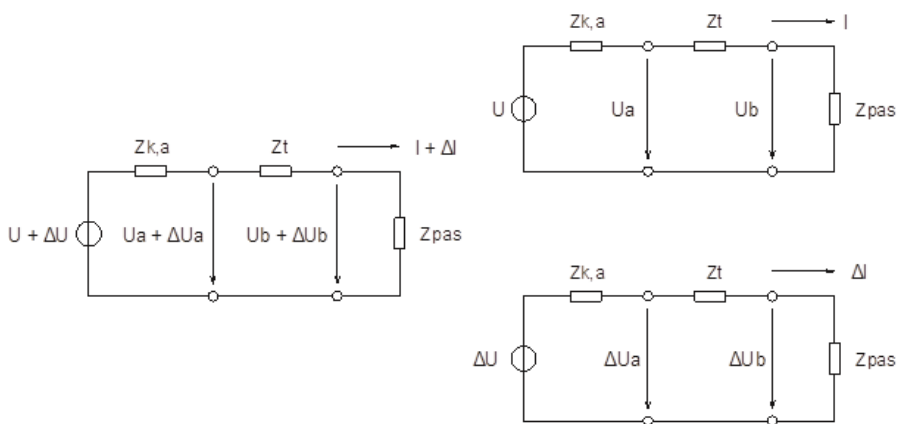


**Obr. 6.2: Model šíření kolísání napětí směrem sítě – transformátor: pasivní zátěž**

Pro stanovení přenosu se na model díváme jako na dělič napětí, který je tvořen impedancí transformátoru  $Z_T$  a impedancí pasivní zátěže  $Z_{\text{pas}}$ . Při řešení tohoto děliče uplatníme princip superpozice napětí (viz obr. 6.3).

Pro přenos napětí  $U$  ve směru A-B platí:

$$U_B = U_A \cdot \frac{Z_{\text{pas}}}{Z_T + Z_{\text{pas}}} \quad (6.4)$$



**Obr. 6.3: Uplatnění principu superpozice (zdrojem kolísání napětí je síť')**

Pro přenos kolísání ve směru A-B platí:

$$\Delta U_B = \Delta U_A \cdot \frac{Z_{pas}}{Z_T + Z_{pas}} \quad (6.5)$$

Po dosazení z rovnice (6.5) do rovnice (6.4) za výraz na pravé straně dostaneme:

$$\frac{\Delta U_B}{U_B} = \frac{\Delta U_A}{U_A} \quad (6.6)$$

Pro činitel míry vjemu blikání platí obecný vztah:

$$P_{st} = fce\left(\frac{\Delta U}{U}\right) \quad (6.7)$$

Ze vztahu (6.6) a následně vztahu (6.7) plyne:

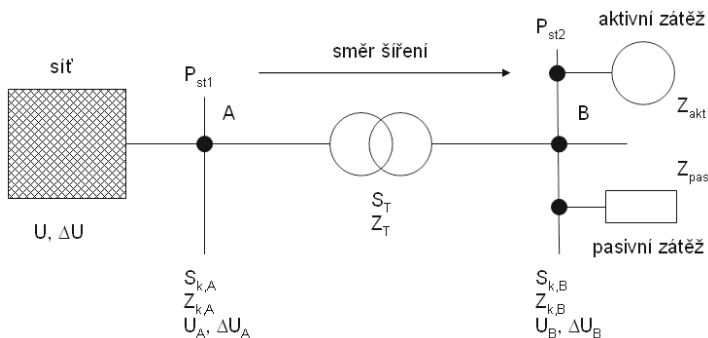
$$P_{st,B} = P_{st,A} \Rightarrow T_{pst,A-B} = \frac{P_{st,B}}{P_{st,A}} = 1 \quad (6.8)$$

Ze vztahu (6.8) je patrné, že činitel míry vjemu blikání se nezmění, tzn. že transportní koeficient kolísání se rovná jedné. Z uvedeného lze vyvodit, že pasivní zátěž nemá žádný vliv na snižování úrovně flickeru.

### 6.3. Šíření kolísání napětí ze sítě k aktivní zátěži

Na síť je v tomto případě pohlíženo opět jako na zdroj kolísání napětí, které se šíří směrem ke skupině spotřebičů. Tato skupina je tvořena paralelním spojením pasivní a aktivní zátěže. Aktivní zátěží máme na mysli zátěž, která je zdrojem elektrické energie. Chování aktivní komplexní zátěže je při těchto jevech (při kolísání napětí sítě) do značné míry ovlivněna vlastnostmi asynchronních motorů (v generátorovém režimu), generátory apod., u kterých se uplatňují jejich rázové reaktance.

Model šíření kolísání směrem ze sítě k aktivní zátěži je uveden na *obr. 6.4*. Z tohoto modelu odvodíme vztahy pro stanovení transportního koeficientu.



**Obr. 6.4: Model šíření kolísání napětí směrem síť – transformátor: aktivní zátěž**

Stejným postupem jako v předchozím případě stanovíme hodnoty napětí a kolísání napětí v bodě B při ustálených poměrech sítě (pokud je síť v ustáleném stavu, neuplatňují se jejich rázové reaktance zátěže). Pro napětí v bodě B platí:

$$U_B = U_A \cdot \frac{Z_{pas}}{Z_T + Z_{pas}} \quad (6.9)$$

Vznikne-li v síti kolísání napětí, začnou se uplatňovat rázové reaktance aktivních zátěží. V tomto případě pak pro kolísání napětí v bodě B vycházíme z paralelního spojení pasivní a aktivní zátěže. Platí tedy:

$$\Delta U_B = \Delta U_A \cdot \frac{Z_{pas,akt}}{Z_T + Z_{pas,akt}} \quad (6.10)$$

Pro přenos z (6.9) a (6.10) platí:

$$\frac{\Delta U_B}{U_B} = \frac{\Delta U_A}{U_A} \cdot \frac{Z_{pas,akt} \cdot Z_T + Z_{pas,akt} \cdot Z_{pas}}{Z_{pas} \cdot Z_T + Z_{pas} \cdot Z_{pas,akt}} \quad (6.11)$$

Po úpravách dále dostáváme zjednodušený tvar:

$$\frac{\Delta U_B}{U_B} = \frac{\Delta U_A}{U_A} \cdot \frac{1 + \frac{Z_T}{Z_{pas}}}{1 + \frac{Z_T}{Z_{pas,akt}}} \quad (6.12)$$

Pro vztah mezi impedancemi pasivní a aktivní zátěže platí:

$$Z_{pas} \gg Z_{akt} \Rightarrow Z_{pas,akt} \cong Z_{akt} \quad (6.13)$$

Při uvážení vztahu (6.13) můžeme vztah (6.12) upravit do následující podoby:

$$\frac{\Delta U_B}{U_B} = \frac{\Delta U_A}{U_A} \cdot \frac{1 + \frac{Z_T}{Z_{pas}}}{1 + \frac{Z_T}{Z_{akt}}} \quad (6.14)$$

S využitím vztahu (6.14) ve vztahu pro transportní koeficient kolísání platí:

$$T_{pst,A-B} = \frac{1 + \frac{Z_T}{Z_{pas}}}{1 + \frac{Z_T}{Z_{akt}}} \quad (6.15)$$

Pro případ, že napětí v bodech A a B jsou vyrovnaná (po přepočtu na stejnou napěťovou hladinu), platí pro impedanci transformátoru a aktivní zátěže:

$$U_A \cong U_B = U \Rightarrow Z_T = \frac{U^2}{S_T}, \quad Z_{akt} = \frac{U^2}{S_{akt}} \quad (6.16)$$

$S_{akt}$ ..... zkratový výkon aktivní zátěže

a) zkratový výkon asynchronního motoru v generátorovém režimu:

$$S_{akt} = S_a = S_{rM} \frac{I_a}{I_N} \quad (6.17)$$

$S_{rM}$ ..... jmenovitý zdánlivý výkon motoru,

$I_a$ ..... záběrný proud motoru (při rozběhu),



$I_{rM}$  .....jmenovitý proud.

b) zkratový výkon generátoru:

$$S_{akt} = S_G = \frac{S_{rG}}{x_G} \quad (6.18)$$

$S_{rG}$  .....jmenovitý zdánlivý výkon generátoru,

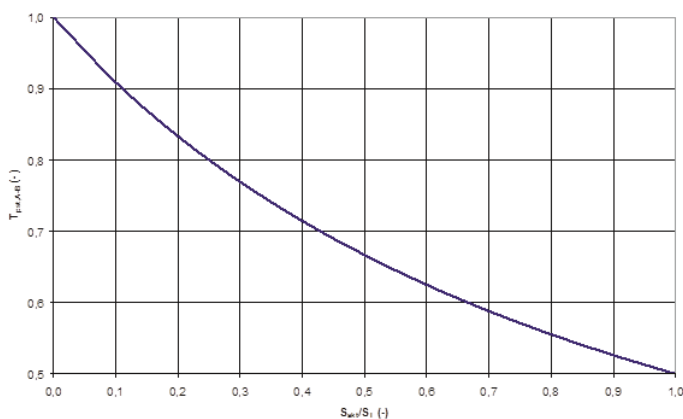
$x_G$  .....poměrná rázová reaktance.

Pokud uvažujeme, že impedance transformátoru je podstatně menší než impedance pasivní zátěže, a když zavedeme vztah (6.16) do vztahu (6.15), dostaneme pro transportní koeficient zjednodušený vztah:

$$T_{pst,A-B} = \frac{1}{1 + \frac{S_{akt}}{S_T}} \quad (6.19)$$

Ze vztahu (6.19) můžeme určit závislost velikosti transportního koeficientu na poměru zkratových výkonů aktivní zátěže a transformátoru.

Z následujícího *obr. 6.5* je patrné, že v případě ustáleného stavu sítě je transportní koeficient roven jedné. S rostoucím zkratovým výkonem aktivní zátěže velikost transportního koeficientu klesá. Pro extrémní případ, že zkratový výkon aktivní zátěže je shodný s výkonem transformátoru, je hodnota transportního koeficientu rovna 0,5. Z uvedeného vyplývá, že přítomnost aktivní zátěže tlumí šíření kolísání napětí.



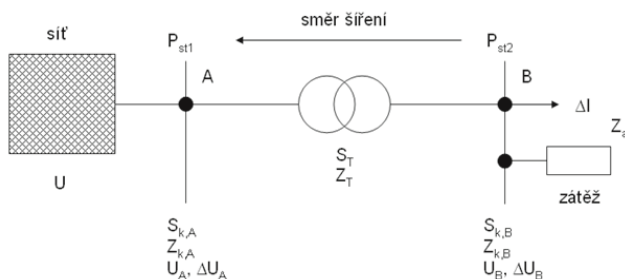
**Obr. 6.5: Závislost  $T_{pst}$  na poměru zkratových výkonů aktivní zátěže a transformátoru**

## 6.4. Šíření kolísání napětí od zátěže

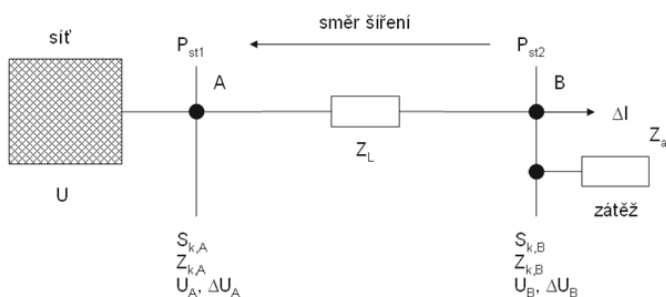
Zdrojem kolísání napětí na nižších napětových úrovních je časová změna odebraného proudu zátěže. Modelové situace šíření kolísání jsou uvedeny na obr. 6.6 a obr. 6.7.

Pro napětí v uzlu připojené zátěže a v uzlu připojení sítě platí vztah, při kterém se uplatňují impedance zátěže a transformátoru nebo vedení – ustálený stav (6.20):

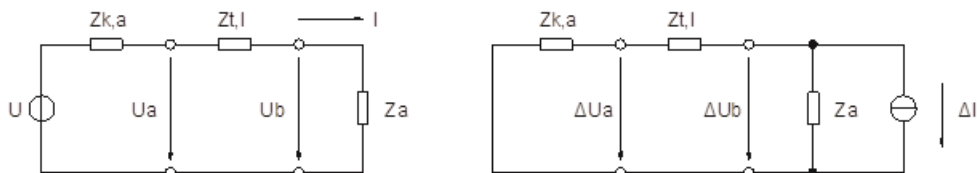
$$U_B = U_A \cdot \frac{Z_a}{Z_T + Z_a} \Rightarrow U_A = U_B \cdot \frac{Z_T + Z_a}{Z_a} \quad (6.20)$$



Obr. 6.6: Model šíření kolísání napětí směrem k vyšším napětovým úrovním přes transformátor (rozdílné napětové úrovně)



Obr. 6.7: Model šíření kolísání napětí směrem k síti přes impedanci vedení (stejně napětové úrovně)



Obr. 6.8: Náhradní schéma (zdrojem kolísání napětí je časová změna odebraného proudu)

Při odvození kolísání napětí  $\Delta U$  v připojovacím bodě sítě vycházíme z toho, že zdrojem kolísání je proud odebíraný časově proměnnou zátěží (viz *obr. 6.8*). Začnou se tedy uplatňovat zkratové impedance. Pro kolísání napětí v bodě A platí:

$$\Delta U_A = \Delta U_B \cdot \frac{Z_{k,A}}{Z_{T,L} + Z_{k,A}} \quad (6.21)$$

Při určení transportního koeficientu vyjdeme ze vztahů (6.20) a (6.21):

$$\frac{\Delta U_A}{U_A} = \frac{\Delta U_B}{U_B} \cdot \frac{Z_{k,A}}{Z_{T,L} + Z_{k,A}} \frac{Z_a}{Z_{T,L} + Z_a} \quad (6.22)$$

Pro transportní koeficient pak platí:

$$T_{pst,B-A} = \frac{Z_{k,A}}{Z_{T,L} + Z_{k,A}} \frac{Z_a}{Z_{T,L} + Z_a} \quad (6.23)$$

Vztah (6.22) platí pro rozdílné napěťové úrovně v bodech A a B. Při stejných napěťových úrovních v bodech A a B (po přepočtení na stejnou napěťovou hladinu u obvodu s transformátorem; v případě obvodu s vedením) můžeme vztah (6.23) upravit za těchto předpokladů:

$$U_A \approx U_B = U, \quad Z_{k,A} = \frac{U^2}{S_{k,A}},$$

$$Z_{k,A} + Z_{T,L} = \frac{U^2}{S_{k,B}}, \quad Z_{T,L} \ll Z_a \quad (6.24)$$

Aplikací předpokladů v (6.24) se vztah (6.22) zjednoduší do podoby:

$$\frac{\Delta U_A}{U_A} = \frac{\Delta U_B}{U_B} \cdot \frac{S_{k,B}}{S_{k,A}} \quad (6.25)$$

Pro činitel míry vjemu blikání v připojovacím bodě sítě platí:

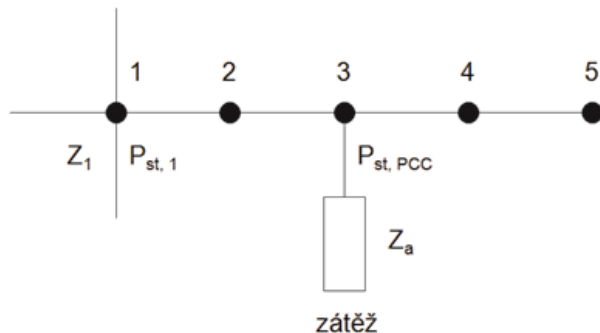
$$P_{st,A} = P_{st,B} \cdot \frac{S_{k,B}}{S_{k,A}} \quad (6.26)$$

S využitím vztahu (6.1) ve vztahu (6.26) pro transportní koeficient pak:

$$T_{pst,B-A} = \frac{S_{k,B}}{S_{k,A}} \quad (6.27)$$

## 6.5. Šíření kolísání napětí v paprskové síti

Model této situace je uveden na následujícím obr. 6.9. Zdrojem kolísání napětí je uzel č. 1.



**Obr. 6.9: Model šíření kolísání napětí v paprskové síti**

Pro činitele  $P_{st}$  v jednotlivých bodech na obr. 6.9 platí:

$$P_{st,1} < P_{st,2} < P_{st,PCC} = P_{st,4} = P_{st,5} \quad (6.28)$$

Pro činitel flickeru v bodě 1 platí:

$$P_{st,1} = P_{st,PCC} \cdot \frac{Z_1}{Z_1 + Z_a} = P_{st,PCC} \cdot \frac{Z_1}{Z_{PCC}} \quad (6.29)$$

Zavedeme-li do vztahu (6.29) zkratové výkony, tak dostáváme:

$$P_{st,1} = P_{st,PCC} \cdot \frac{S_{k,PCC}}{S_{k,1}} \quad (6.30)$$

Pro transportní koeficient kolísání napětí pak platí:

$$T_{pst,PCC-1} = \frac{P_{st,1}}{P_{st,PCC}} \quad (6.31)$$

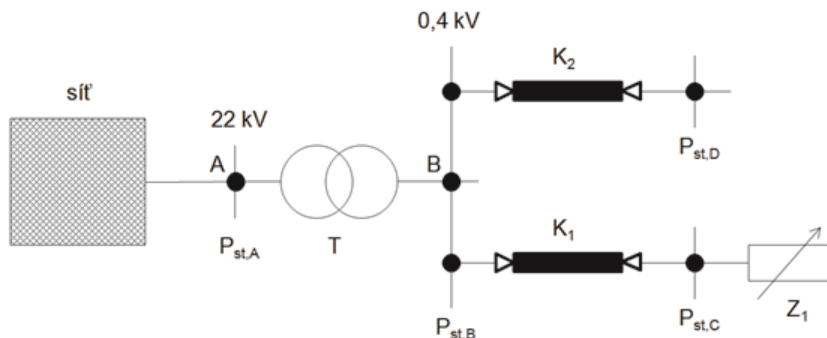
## 6.6. Modelový příklad na šíření flickeru

### Zadání:

Zdroj flickeru s hodnotou  $P_{st,C} = 0,83$  je v bodě C (na obr. 6.10). Úkolem je určit hodnoty flickeru v ostatních bodech.

### Parametry prvků:

|               |   |                                           |                                                                |
|---------------|---|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| Síť           | : | $S_k = 290 \text{ MVA}$ ;                 |                                                                |
| Transformátor | : | $S_t = 0,4 \text{ MVA}$ ;                 | $u_k = 4 \text{ \%}$ ; $u_R = 1,15 \text{ \%}$                 |
| Kabel č. 1    | : | $x_k = 0,076 \text{ } \Omega/\text{km}$ ; | $r_k = 1,02 \text{ } \Omega/\text{km}$ ; $l_1 = 150 \text{ m}$ |
| Kabel č. 2    | : | $x_k = 0,076 \text{ } \Omega/\text{km}$ ; | $r_k = 1,02 \text{ } \Omega/\text{km}$ ; $l_2 = 250 \text{ m}$ |



Obr. 6.10: Modelové uspořádání konfigurace sítě

### Postup řešení:

Zkratová impedance sítě v bodě A (přepočteno na hladinu 0,4 kV):

$$\begin{aligned}
 Z_{k,s} &= \frac{1,1 \cdot U_A^2}{\sqrt{3} \cdot S_{k,s}} \cdot \left( \frac{U_B}{U_A} \right)^2; \\
 X_{k,s} &= 0,995 \cdot Z_{k,s}; \quad R_{k,s} = 0,1 \cdot X_{k,s} \\
 \hat{Z}_{k,s} &= R_{k,s} + j \cdot X_{k,s} = Z_{k,s} \cdot e^{j\varphi_s}; \\
 Z_{k,s} &= |\hat{Z}_{k,s}|; \quad \varphi_s = \arctg \left( \frac{X_{k,s}}{R_{k,s}} \right)
 \end{aligned} \tag{6.32}$$

Parametry transformátoru:

$$\begin{aligned}
 Z_{k,t} &= \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_B^2}{S_t}; \\
 R_{k,t} &= \frac{u_R}{100\%} \cdot \frac{U_B^2}{S_t}; \quad X_{k,t} = \sqrt{Z_{k,t}^2 - R_{k,t}^2} \\
 \hat{Z}_{k,t} &= R_{k,t} + j \cdot X_{k,t} = Z_{k,t} \cdot e^{j\varphi_t}; \\
 Z_{k,t} &= |\hat{Z}_{k,t}|; \quad \varphi_t = \arctg \frac{X_{k,t}}{R_{k,t}}
 \end{aligned}
 \tag{6.33}$$

Parametry kabelu K<sub>1</sub>:

$$\begin{aligned}
 R_{k,k1} &= l_1 \cdot r_k; \quad X_{k,k1} = l_1 \cdot x_k \\
 \hat{Z}_{k,k1} &= R_{k,k1} + j \cdot X_{k,k1} = Z_{k,k1} \cdot e^{j\varphi_{k1}}; \\
 Z_{k,k1} &= |\hat{Z}_{k,k1}|; \quad \varphi_{k1} = \arctg \frac{X_{k,k1}}{R_{k,k1}}
 \end{aligned}
 \tag{6.34}$$

Parametry kabelu K<sub>2</sub>:

$$\begin{aligned}
 R_{k,k2} &= l_2 \cdot r_k; \quad X_{k,k2} = l_2 \cdot x_k \\
 \hat{Z}_{k,k2} &= R_{k,k2} + j \cdot X_{k,k2} = Z_{k,k2} \cdot e^{j\varphi_{k2}}; \\
 Z_{k,k2} &= |\hat{Z}_{k,k2}|; \quad \varphi_{k2} = \arctg \frac{X_{k,k2}}{R_{k,k2}}
 \end{aligned}
 \tag{6.35}$$

Zkratové impedance v přípojných bodech A, B, C:

$$\begin{aligned}
 \hat{Z}_{k,A} &= Z_{k,A} \cdot e^{j\varphi_A} = \hat{Z}_{k,s} \\
 \hat{Z}_{k,B} &= Z_{k,B} \cdot e^{j\varphi_B} = \hat{Z}_{k,s} + \hat{Z}_{k,t} \\
 \hat{Z}_{k,C} &= Z_{k,C} \cdot e^{j\varphi_C} = \hat{Z}_{k,s} + \hat{Z}_{k,t} + \hat{Z}_{k,k1}
 \end{aligned}
 \tag{6.36}$$

Zkratové výkony v přípojných bodech A, B, C (vztahené k napěťové hladině 0,4 kV):

$$\begin{aligned}
\hat{S}_{k,A} &= \frac{U_B^2}{\hat{Z}_{k,A}} = S_{k,A} \cdot e^{j\varphi_{SA}}; \\
\hat{S}_{k,B} &= \frac{U_B^2}{\hat{Z}_{k,B}} = S_{k,B} \cdot e^{j\varphi_{SB}}; \\
\hat{S}_{k,C} &= \frac{U_B^2}{\hat{Z}_{k,C}} = S_{k,C} \cdot e^{j\varphi_{SC}}
\end{aligned} \tag{6.37}$$

Činitelé flickeru v jednotlivých přípojných bodech:

$$\begin{aligned}
P_{st,B} &= P_{st,C} \cdot \frac{Z_{k,B}}{Z_{k,C}} \\
\text{nebo } P_{st,B} &= P_{st,C} \cdot \frac{S_{k,C}}{S_{k,B}} \\
P_{st,A} &= P_{st,B} \cdot \frac{Z_{k,A}}{Z_{k,B}} = P_{st,C} \cdot \frac{Z_{k,B}}{Z_{k,C}} \cdot \frac{Z_{k,A}}{Z_{k,B}} = P_{st,C} \cdot \frac{Z_{k,A}}{Z_{k,C}} \\
\text{nebo } P_{st,A} &= P_{st,B} \cdot \frac{S_{k,B}}{S_{k,A}} = P_{st,C} \cdot \frac{S_{k,C}}{S_{k,B}} \cdot \frac{S_{k,B}}{S_{k,A}} = P_{st,C} \cdot \frac{S_{k,C}}{S_{k,A}} \\
P_{st,D} &= P_{st,B}
\end{aligned} \tag{6.38}$$

Transportní koeficienty flickeru ve směrech C-B, B-A, C-A, B-D:

$$\begin{aligned}
T_{pst,C-B} &= \frac{P_{st,B}}{P_{st,C}} = \frac{Z_{k,B}}{Z_{k,C}} = \frac{S_{k,C}}{S_{k,B}}; \quad T_{pst,B-A} = \frac{P_{st,A}}{P_{st,B}} = \frac{Z_{k,A}}{Z_{k,B}} = \frac{S_{k,B}}{S_{k,A}} \\
T_{pst,C-A} &= \frac{P_{st,A}}{P_{st,C}} = \frac{Z_{k,A}}{Z_{k,C}} = \frac{S_{k,C}}{S_{k,A}}; \quad T_{pst,B-D} = 1
\end{aligned} \tag{6.39}$$

## Výsledky:

Velikosti zkratových impedancí v bodech A, B, C:

$$Z_{k,A} = 3,5038 \cdot 10^{-4} \Omega; \quad Z_{k,B} = 0,0163 \Omega; \quad Z_{k,C} = 0,1599 \Omega$$

Velikosti zkratových výkonů v bodech A, B, C:

$$S_{k,A} = 4,5665 \cdot 10^8 \text{ VA}; S_{k,B} = 9,7895 \cdot 10^6 \text{ VA}; S_{k,C} = 1,0004 \cdot 10^6 \text{ VA}$$

Činitelé flickeru v bodech A, B, C:

$$P_{st,C} = 0,8300; P_{st,B} = P_{st,D} = 0,0848; P_{st,A} = 0,0018$$

Transportní koeficienty:

$$T_{pst,C-B} = 0,1022; T_{pst,B-A} = 0,0214; T_{pst,B-D} = 1$$

Z výsledků je patrné, že činitel flickeru směrem k vyšším napěťovým hladinám klesá.

## 6.7. Literatura

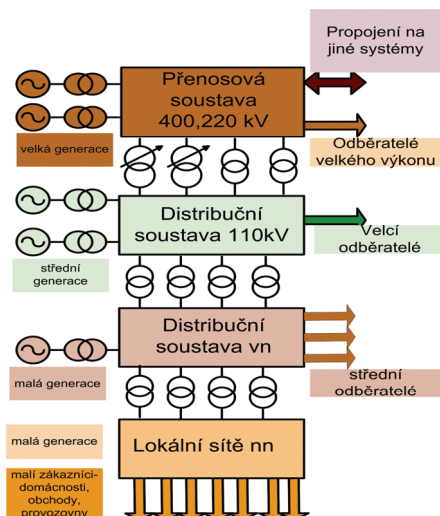
- [1] Angot A.: Užitá matematika pro elektroinženýry, SNTL Praha 1971
- [2] Čížek V.: Diskrétní Fourierova transformace a její použití, SNTL Praha 1981
- [3] Sýkora T.: Kvalita elektrické energie v distribučních sítích, Disertační práce, Praha 2011
- [4] ČSN EN 50160 (33 0122): Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě, Český normalizační institut, Praha 2011
- [5] Kůs V.: Rušivé vlivy měničů a jejich omezení, ZČU Plzeň 1996
- [6] Hodinka M.: Vybrané problémy z elektrizačních soustav, VUT Brno 1988
- [7] Tlustý J.: Energetická rušení v průmyslových a distribučních sítích, Praha 1999
- [8] Douglas F. E.: Handbook of Digital Signal Processing Engineering Applications



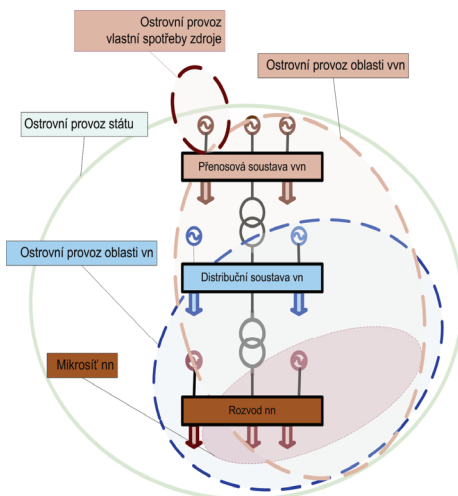
## 7. Práce elektráren do soustavy

Struktura elektrizační soustavy do které pracují ve standardním režimu elektrárny je zobrazena na *obr. 7.1*. Zhruba platí zásada, že napěťová hladina v kV do které zdroj pracuje je řádově ekvivalentní výkonu v MW. Elektrárny dodávají svůj výkon do externího systému ve dvou rozdílných režimech lišících se způsoby regulace:

- režim práce do velké soustavy (limitně nekonečně velké)
- režim práce do ostrovního provozu (dle rozsahu ostrova)



Obr. 7.1: Struktura elektrizační soustavy



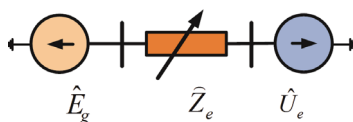
Obr. 7.2: Přehled ostrovních režimů

V režimu práce do velké soustavy se soustava dá aproximovat ideálním zdrojem napětí v sérii s impedancí určenou ze zkratového výpočtu. V tomto režimu se reguluje dle regulačních programů dodávaný výkon na rozdíl od ostrovního provozu, kdy je výstupní regulovanou veličinou frekvence. Ostrov může nabývat různých forem jak je uvedeno v jejich přehledu na *obr. 7.2*. Práce do různých uspořádání externího systému se pro účely vytvoření základních provozních charakteristik dají přetransformovat do režimu práce dvoustrojového problému.

## 7.1. Dvoustrojový problém

### 7.1.1. Konstrukce ekvivalentního schématu

Každý matematický model je zjednodušeným zobrazením reality formulovaným na přijaté úrovni podrobnosti a přesnosti. V souladu se zjednodušením pak existuje množina problémů, které je model schopen uspokojivě řešit. Základním modelem umožňujícím jednoduché a názorné studium režimů dodávek energie z generátoru do složité soustavy je model označovaný jako dvouuzlový model, dvoustrojové uspořádání nebo dvoustrojový problém. Dvoustrojové uspořádání (*obr. 7.3*) je zapojení, ve kterém dvě brány zdrojů (zkoumaného a ekvivalentního) propojuje jediná vazební impedance  $Z_e$  reprezentující aktuální obraz impedancí pasivní části systému a napětí ideálního napěťového zdroje  $U_e$  představující aktuální obraz napětí aktivní části systému. Tvorba ekvivalentu celé sítě je založena na Theveninových větách o náhradě složitěho obvodu v pracovním bodě z hlediska jedné brány schématu.



**Obr. 7.3: Schéma dvoustrojového uspořádání**

Výhodou tohoto přístupu je:

- relativně snadné matematické vyjádření statických i dynamických pracovních charakteristik stroje a jejich názorné grafické vyjádření
- relativně snadná možnost zobrazování poruch v složité síti do hodnot ekvivalentu a následné vyhodnocení podmínek jejich kompenzace. Například ke každé hodnotě vazební impedance lze simulací (nebo při známe parametrizaci vnější charakteristiky matematicky) stanovit kritický vypínací čas síťových ochran.

Ekvivalentní zdroje se dají modelovat více úrovněmi podrobnosti:

- 1) idealizovaně jako zdroje nekonečného výkonu
- 2) realističtěji jako zdroje s ekvivalentním napětím a ekvivalentní mechanickou časovou konstantou
- 3) detailně jako reálné zdroje s příslušnými parametry.

Provozní charakteristiky studovaného generátoru s respektováním regulačních obvodů napětí lze pro všechny reprezentující hodnoty vazební impedance a režimů zatížení znázorňovat vnější charakteristikou závislosti činného výkonu  $P$  na zátěžném úhlu  $\theta$ .

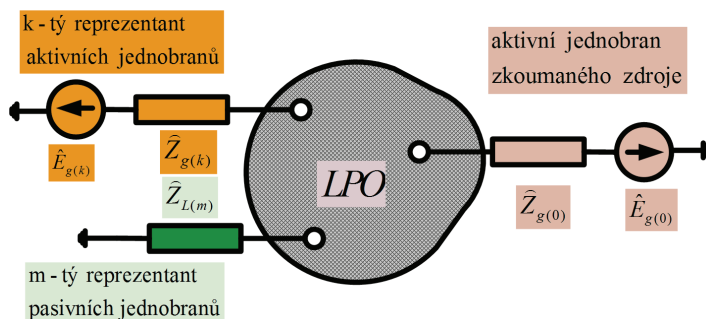
Elektrické poměry práce zdrojů do soustavy se dají modelovat opojením aktivních a pasivních jednobranů. Jestliže se všechny napěťové zdroje nahradí zdroji proudovými bude v pracovním bodě systému platit rovnice ustáleného stavu systému:

$$\bar{U} = [Z]\bar{I}, \quad \bar{I} = [Y]\bar{U} \quad (7.1)$$

$\bar{I}, (\bar{U})$  .....komplexní vektor uzlových proudů(napětí)

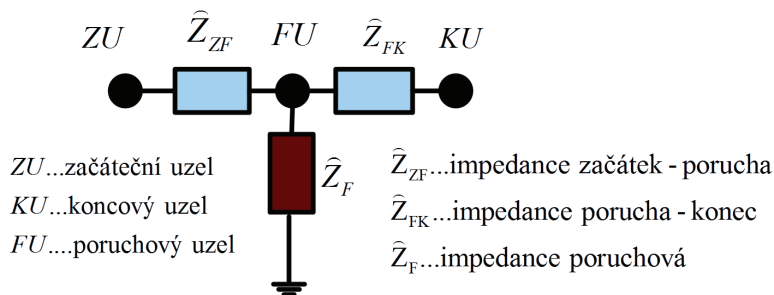
$[Z], ([Y])$  ...impedanční (admitanční) matice sítě

Při tvorbě výrazů pro konstrukci vazební impedance mezi studovaným generátorem a ekvivalentem sítě vyjdeme z předpokladu že celá síť je složena z aktivních a pasivních jednobranů. Zjednodušené schéma sítě je na obr. 7.4, ve kterém LPO označuje lineární pasivní obvod složený jen pasivních jednobranů.



**Obr. 7.4: Struktura schématu soustavy**

V případě vzniku poruchy v síti je třeba do modelu pasivní části sítě implementovat model poruchy dle obr. 7.5. Poruchová impedance k zemi je závislá na typu poruchy.



**Obr. 7.5: Modelové schéma poruchy**

## Stanovení aktuálních hodnot ekvivalentu

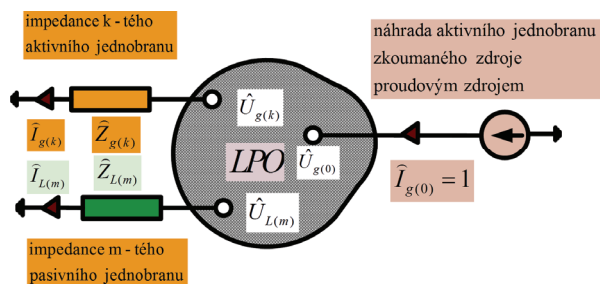
Pro zjištění aktuální hodnoty ekvivalentní impedance sítě viděné z přípojného bodu studovaného zdroje nahradíme jeho aktivní jednobran jednotkovým proudovým zdrojem a ve všech příčných jednobran nahradíme zdroje jejich vnitřní impedancí (0 u napětového zdroje,  $\infty$  u proudového zdroje). Vzniklé schéma znázorňuje obr. 7.6. Napájecí proud se může uzavírat k zemi jen přes impedanci příčných jednobranů. Ve všech uzlech vzniknou napětí, které mají svoji výhodnou fyzikální interpretaci:

V přípojném bodě je jeho napětí (excitační) číselně rovno přímo hledané ekvivalentní impedanci.

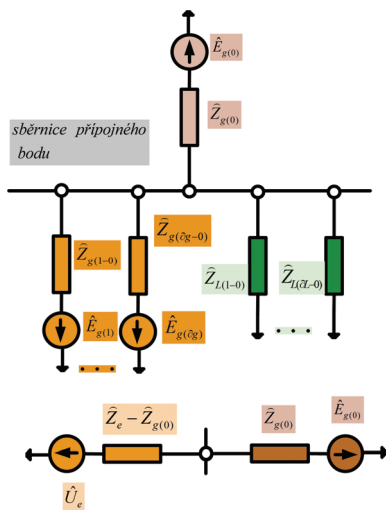
Podíl excitačního napětí v místě brány napájení a proudu k zemi v místě vzdálené brány definuje hodnotu vazební impedance mezi branami.

Podíl excitačního napětí a součtu proudů protékajících branami zdrojů definuje výslednou hodnotu vazební impedance aktivních větví.

Podíl excitačního napětí a zbylých proudů tvoří vazební impedanci pasivních větví.



Obr. 7.6: Schéma napájení pro zjištění ekvivalentní impedance sítě

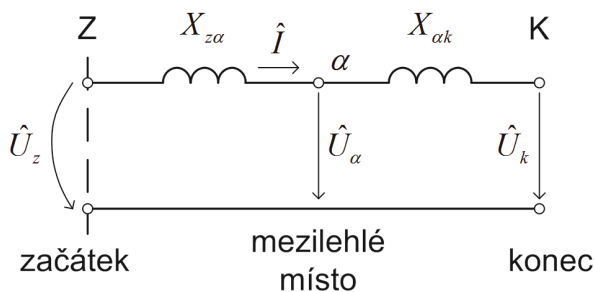


Obr. 7.7: Složky vazební impedance a výsledné schéma

Sloučením této paralelní kombinace impedancí vzniká hledaná část vazební impedance. S rostoucím počtem příčných větví tato impedance klesá a proto při práci elektrárny do mohutné soustavy ji nahrazujeme nulovou hodnotou. Sloučením vazebních impedancí aktivních a pasivních větví se získá výsledná vazební impedance. Z popisu tvorby vyplývá, že výsledná impedance musí vyhovovat podílu excitačního napětí a celkového injektovaného proudu.

### Charakteristiky práce do soustavy

Nejjednodušší konstrukce těchto charakteristik vychází ze schématu propojení dvou bran vazební reaktancí  $x_{zk}$  rozdělenou v určitém místě branou s označením  $\alpha$ . Jednotlivé prvky schématu mají svoji fyzikální interpretaci závislou na povaze studované úlohy.



**Obr. 7.8: Zjednodušené schéma propojení zdroje a soustavy**

Proud mezi začáteční a koncovou branou:

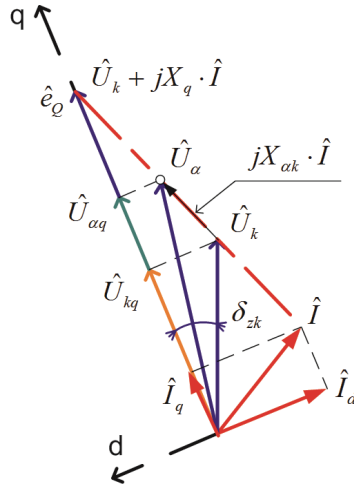
$$\hat{I} = (\hat{U}_z - \hat{U}_k) / (jX_{zk}) = (\hat{U}_z - \hat{U}_\alpha) / (jX_{z\alpha}) \quad (7.2)$$

Výkony generovaná ze začáteční brány:

$$\hat{S}_z = \hat{U}_z \hat{I}^* = j\hat{U}_z \cdot (\hat{U}_z - \hat{U}_k)^* / X_{zk} = j \left( \frac{U_z^2}{X_{zk}} - \frac{U_z \cdot U_k}{X_{zk}} \cdot e^{j\delta_{zk}} \right) \quad (7.3)$$

$$P_z = \text{Re}\{\hat{S}_z\} = \frac{U_z \cdot U_k}{X_{zk}} \cdot \sin \delta_{zk}$$

$$Q_z = \text{Im}\{\hat{S}_z\} = \frac{U_z^2}{X_{zk}} - \frac{U_z \cdot U_k}{X_{zk}} \cdot \cos \delta_{zk}$$



**Obr. 7.9: Příklad aplikace schématu 7.8 na práci generátoru do systému**

Ztotožní-li se začáteční brána obecného schématu s indexem z s-branou synchronního stroje s napětím  $\hat{e}_Q$  a koncová brána s indexem k s přípojným místem práce stroje do soustavy je tato práce s induktivní dodávkou znázorněna diagramem na obr. 7.9 pro jehož veličiny platí vztahy:

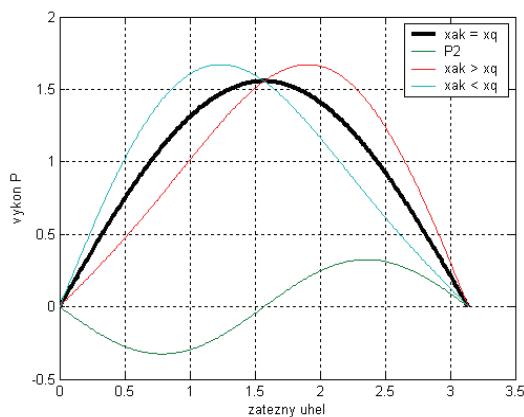
$$\begin{aligned} \hat{U}_{\alpha q} &= \hat{U}_{kq} + jX_{\alpha k} \cdot \hat{I}_d \Rightarrow \frac{\hat{U}_{\alpha q} - \hat{U}_{kq}}{\hat{e}_Q - \hat{U}_{kq}} = \frac{X_{\alpha k}}{X_q} \\ \hat{e}_Q &= \hat{U}_{kq} + jX_q \cdot \hat{I}_d \end{aligned}$$

Vnitřní napětí stroje:

$$e_Q = \frac{X_q}{X_{\alpha k}} (U_{\alpha q} - U_{kq}) + U_{kq} = \frac{X_q}{X_{\alpha k}} \cdot U_{\alpha q} + U_{kq} \cdot \frac{X_{\alpha k} - X_q}{X_{\alpha k}} \quad (7.4)$$

Činný výkon:

$$P = \frac{U_{\alpha q} \cdot U_k}{X_{\alpha k}} \cdot \sin \delta_{zk} + \frac{X_{\alpha k} - X_q}{X_{\alpha k} \cdot X_q} \cdot U_k^2 \cdot \underbrace{(\sin \delta_{zk} \cdot \cos \delta_{zk})}_{0.5 \sin 2\delta_{zk}} \quad (7.5)$$

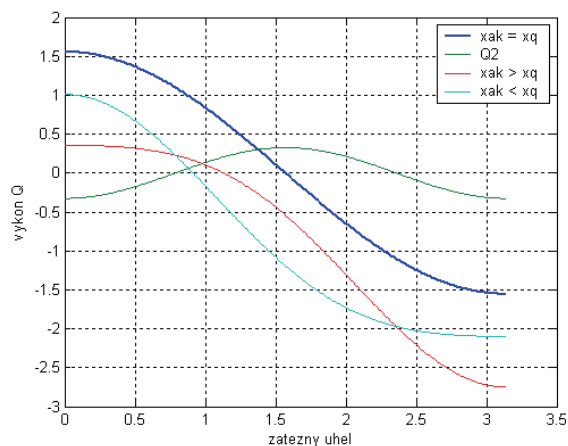


**Obr. 7.10: Charakteristika  $P=P(\delta)$**

Pro úplnost je dále podrobněji uvedeno odvození charakteristiky jalového výkonu v závislosti na zátěžném úhlu  $\delta$ :

$$\begin{aligned}
 Q &= -\frac{U_k^2}{X_{zk}} + \frac{U_z \cdot U_k}{X_{zk}} \cdot \cos \delta_{zk} = \\
 &= -\frac{U_k^2}{X_q} + \frac{U_{\alpha k} \cdot U_k}{X_{\alpha k}} \cdot \cos \delta_{zk} + U_k \cdot U_k \cdot \cos \delta_{zk} \cos \delta_{zk} \cdot \frac{X_{\alpha k} - X_q}{X_{\alpha k} \cdot X_q} = \\
 &= -\frac{U_k^2}{X_q} + \frac{U_{\alpha k} \cdot \overbrace{U_k \cos \delta_{zk}}^{U_{kq}}}{X_{\alpha k}} + \frac{U_k^2 (X_{\alpha k} - X_q)}{2X_{\alpha k} \cdot X_q} \overbrace{(1 + \cos 2\delta_{zk})}^{2 \cos \delta_{zk} \cos \delta_{zk} \text{ vnucená}} \pm \frac{U_k^2}{2X_q} \\
 Q &= \frac{U_{\alpha k} \cdot U_k}{X_{\alpha k}} \cos \delta_{zk} - \frac{U_k^2}{2} \left( \frac{X_{\alpha k} + X_q}{X_q X_{\alpha k}} \right) + \frac{U_k^2}{2} \left( \frac{X_{\alpha k} - X_q}{X_q X_{\alpha k}} \right) \cos 2\delta_{zk} \quad (7.6)
 \end{aligned}$$

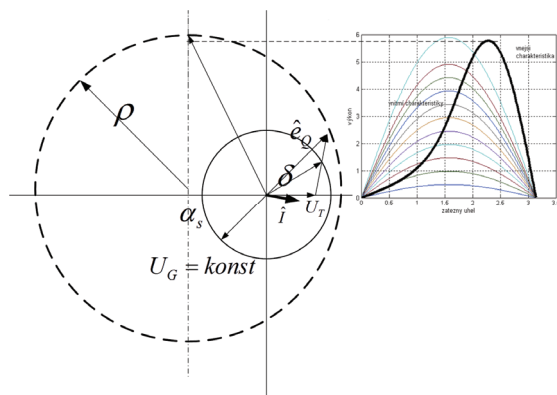
Výsledné vztahy (7.5) a (7.6) dokumentují, že v případě rovnosti  $x_{\alpha,k} = x_q$  nevzniká složka výkonu závislá na součinu  $2\delta$  a maximum činného výkonu je  $\delta = \pi/2$ . To je například případ turbostroje s konstantním buzením. V případě, že  $x_{\alpha,k} > x_q$ , tato složka vzniká a maximum činného výkonu (mez stability) se posouvá směrem k vyšším úhlům. To je případ dobré funkce regulátoru buzení. V případě, že  $x_{\alpha,k} < x_q$ , se naopak maximum posouvá směrem k nižším hodnotám než je  $\pi/2$  a to je případ hydrostroje s konstantním buzením.



**Obr. 7.11: Charakteristika dodávky  $Q=Q(\delta)$**

Budou-li místem  $\alpha$  svorky generátoru a  $U_k$  bude reprezentovat místo připojení Theveninova ekvivalentu napětí  $U_T$  znázorněného v reálné ose pak pro  $\hat{e}_Q$  platí:

$$\hat{e}_Q = - \underbrace{U_T \frac{X_{z\alpha}}{X_{\alpha k}}}_{\text{souřadnice střítě}} + \underbrace{\hat{U}_G \frac{X_{zk}}{X_{\alpha k}}}_{\text{kružnice pro } U_G = \text{konst}} \quad (7.7)$$



**Obr. 7.12: Vnější charakteristika regulovaného zdroje**

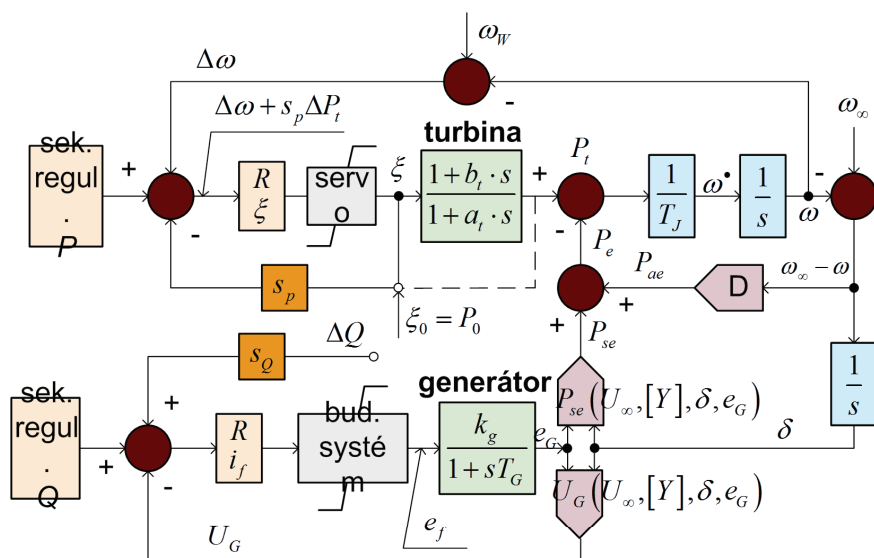
Obr. 7.12 znázorňuje vnější charakteristiku regulovaného zdroje která dokumentuje pohyb  $\hat{e}_Q$  po kružnici s poloměrem  $\rho$ , je-li napětí na svorkách udržováno na konstantní hodnotě. V tomto případě se mez stability posouvá do hodnot vyšších než je standardní mez  $\delta_{mez} = \pi/2$ .



## Model práce do velké soustavy a do ostrova

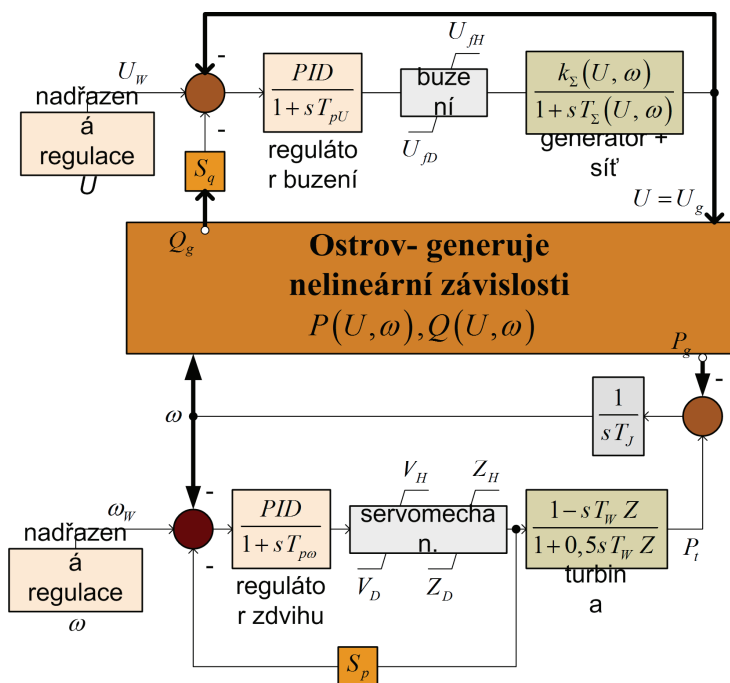
V modelu práce do velké soustavy na obr. 7.13. jsou znázorněny dvě paralelní a dokonce podobné struktury řízení zdvihu ventilu turbíny a budícího proudu. Tyto dvě struktury – elektrická a mechanická nepracují nezávisle nýbrž jsou navzájem propojeny elektromechanickým vazebním blokem.

### Model práce do velké soustavy



- $\xi$  – poměrný zdvih ventilu  
 $U_f, i_f$  – budící napětí, proud  
 $\omega_\infty, \omega$  – kmit. soustavy, generátoru,  $s_p, s_Q$  – statika P, Q  
D – tlumení SG  
 $\delta$  – zátěž. úhel  
 $P_t, P_e$  – mech. výkon turbíny, el. výkon zátěže  
 $P_{ae}, P_{se}$  – asynchronní, synchronizační elektrické výkony

**Obr. 7.13: Nelineární model spolupráce stroje a soustavy**

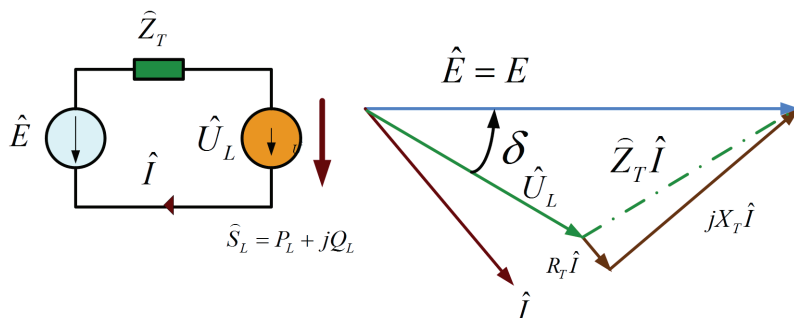


Obr. 7.14: Model ostrovního režimu

### Nosové křivky

Pro prezentaci základních charakteristik práce zdroje do externího systému

Zobrazeného ideálním zdrojem napětí  $U_L$ . Oba zdroje spojuje vazební impedance  $Z_T$ .



Obr. 7.15: Práce stroje do R,L ekvivalentu systému

Proud protékající od zdroje k zátěži určuje následující výraz:

$$\hat{I} = \frac{\hat{E} - \hat{U}_L}{\hat{Z}_T} = \frac{E - U_L e^{-j\delta}}{Z_T e^{j\phi_T}}, \quad (7.8)$$

$\varepsilon_T$  .....impedanční úhel propojení

$\varphi$  .....úhel zátěže

$\delta$  .....zátěžný úhel stroje

Pro zdánlivý přenesený výkon do místa zátěže platí výraz:

$$\hat{S}_T = \frac{U_L E e^{j(\varepsilon_T - \delta)}}{Z_T} - \frac{U_L^2 e^{j\varepsilon_T}}{Z_T} \quad (7.9)$$

Který pro zjednodušení spojovací impedance jen na reaktanci, to znamená pro impedanční úhel hodnotu  $\varepsilon_T = \pi/2$ , přejde do tvaru:

$$\hat{S}_T = \overbrace{\frac{U_L E}{X_T} \sin \delta}^{P_L} + j \overbrace{\left\{ \frac{U_L E}{X_T} \cos \delta - \frac{U_L^2}{X_T} \right\}}^{Q_L} \quad (7.10)$$

Přenesený výkon musí být stejný jako výkon zátěže:

$$\hat{S}_L = U_L^2 (G_L + j \cdot \operatorname{tg} \varphi) = P_L (1 + j \cdot \operatorname{tg} \varphi) \quad (7.11)$$

$G_L$  .....reálná část vodivosti zátěže

Po úpravě se získá kvadratická rovnice pro napětí zátěže  $U_L$ :

$$\left( Q_L + \frac{U_L^2}{X_T} \right)^2 + P_L^2 = \left( \frac{E \cdot U_L}{X_T} \right)^2 \quad (7.12)$$

Kvadratická rovnice se upraví po zavedení zkratového výkonu na přípojnici zátěže  $S_K'' = E^2/X_T$  do tvaru:

$$\{U_L^2\}_{1,2} = \frac{1}{2} - \frac{Q}{S_K''} \pm \frac{1}{S_K''} \sqrt{\left\{ \frac{S_K''}{2} \right\}^2 - \{P^2 + Q \cdot S_K''\}} \quad (7.13)$$

ze kterého je zřejmá podmínka pro reálné řešení:

$$(P^2 + Q S_K'') \leq (S_K''/2)^2 \quad (7.14)$$

Odtud vyplývají podmínky pro maximální hodnoty přenášených výkonů:

$$P_{\max} = \left( \frac{S_k''}{2} \right) \text{ při } Q = 0, \quad Q_{\max} = \left( \frac{S_k''}{4} \right) \text{ při } P = 0 \quad (7.15)$$

Po zavedení vztahných a poměrných hodnot:

$$\text{vztahné hodnoty: } S_b = S_k'', \quad U_b = E, \quad Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = X_T, \quad G_b = \frac{1}{Z_b} = \left( \frac{1}{X_T} \right)$$

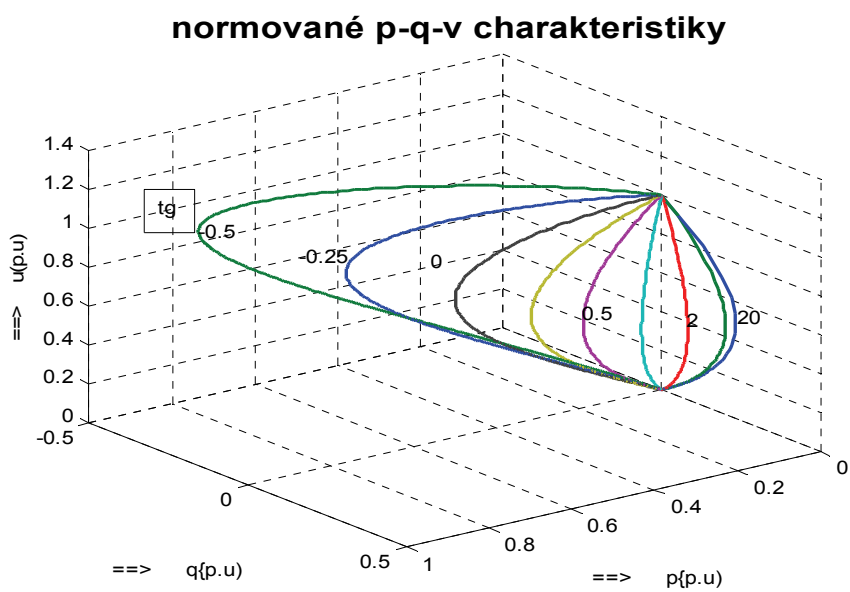
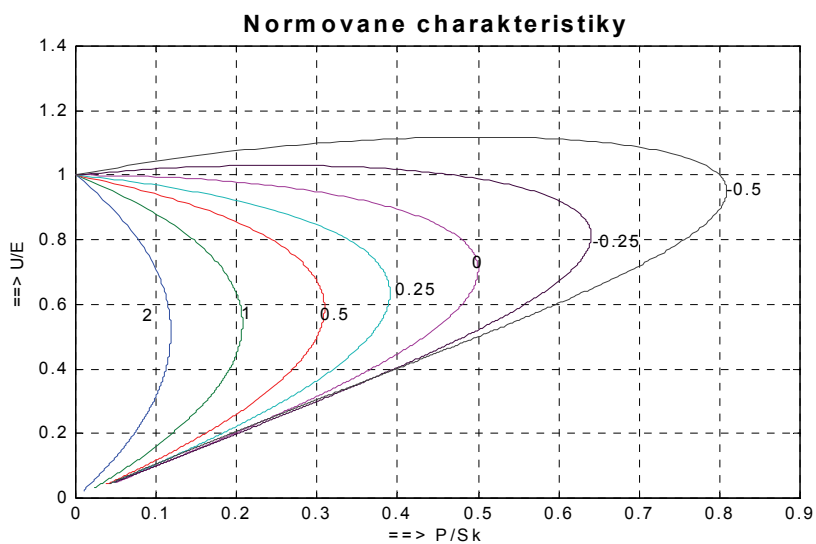
$$\text{poměrné hodnoty: } p_L = \frac{P_L}{S_b}, \quad q_L = \frac{Q_L}{S_b}, \quad u_L = \frac{U_L}{E}, \quad g_L = \frac{G_L}{\left( \frac{1}{X_T} \right)}$$

Je hledané napětí ve tvaru:

$$u_L = \frac{1}{\sqrt{g_L^2 + (1 + g_L \cdot \operatorname{tg} \varphi)^2}} \quad (7.16)$$

Výsledné normované charakteristiky v rovině a prostoru *obr. 7.15* ve tvaru nosu dokumentují:

- Existenci kritického bodu na vrcholu nosové křivky
- Nejednoznačnost řešení napětí ustáleného chodu
- Existenci maximální přenositelného činného a jalového výkonu
- Existenci stabilní části charakteristiky (horní část) a existenci nestabilní charakteristiky (spodní část)



**Obr. 7.16: Normované nosové křivky**

## 7.2. Elektrárny a provoz soustavy

Elektrárny se svým technickým vybavením a regulačními schopnostmi zúčastňují na řešení řady důležitých provozních problémů přenosových systémů. Většina možností je smluvně ošetřena mezi provozovatelem soustavy a elektrárnami.

### 7.2.1. Účast elektráren v podpůrných a systémových službách

Elektroenergetika prošla v minulém období náročným procesem vlastnické i funkční restrukturalizace na dílčí složky, které se vzájemně ovlivňují tak, aby dodávaly energii koncovému uživateli v kvalitě určené standardy. Pro složku mající přirozený monopol přenosovou soustavu, byl stanoven její provozovatel. Funkci tohoto provozovatele zajišťuje v ČR akciová společnost ČEPS, a.s., která je také držitelem autorizace pro rozvod elektřiny na úrovni přenosové soustavy. Další ekonomicky rozhodující podmínkou změn bylo vytvoření tržního prostředí pro vztahy mezi odběrateli a dodavatelem energie a současně zajištění nediskriminačního přístupu k přenosovým částem. V podmínkách restrukturalizace bylo nutno pro úspěšnou spolupráci všech subjektů definovat a formalizovat jejich vzájemné vztahy. Tyto záležitosti jsou obsahem Energetického zákona (EZ) a Kodexů přenosové a distribuční soustavy. Uživatele připojené k přenosové soustavě (PS) strukturujeme do těchto kategorií:

- a) výrobci elektrické energie
  - s bloky o jednotkovém výkonu menším než 50 MW
  - s bloky o jednotkovém výkonu 50 MW a vyšším
- b) odběratelé elektrické energie elektřiny z PS
  - provozovatele distribučních soustav
  - odběratele napájené přímo z PS
- c) přenosové soustavy sousedních soustav.

Společným zájmem provozovatele a uživatelů je spolehlivý a bezpečný provoz elektrizační soustavy. Spolehlivostí provozu se rozumí schopnost soustavy napájet odběratele při zachování všech technických limitů a podmínek a při uvážení možných rizik. Bezpečností provozu se rozumí schopnost soustavy zachovat stabilní provoz po poruchách na jednotlivých zařízeních podle kritéria N-1. Kvalitou energie se rozumí zejména parametry frekvence a napětí, definované Kodexy přenosové a distribuční soustavy. Spolehlivostí dodávky se rozumí parametry dodávky v odběrných místech přenosové soustavy definované kritérii:

| Zkratka | anglický název                                | Ekvivalentní český název                                                                                        |
|---------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LOLE    | Loss of Load Expectation                      | Očekávaná ztráta zatížení - očekávaný počet dnů v roce, kdy zatížení přesáhne výkon výrobních zdrojů            |
| LOLP    | Loss of Load Probability                      | Pravděpodobnost ztráty výkonu                                                                                   |
| EENS    | Expected Energy not Supplied                  | Střední nedodaná energie za rok                                                                                 |
| BPII    | Bulk Power Interruption Index                 | Výpadekový index složeného systému=průměrný počet nedodaných MW systému vztažený na maximální zatížení systému. |
| BPECI   | Bulk Power Energy Curtailment Index           | Index složeného systému: průměrná hodnota nedodaných MWh vztažená na maximální zatížení.                        |
| CAIFI   | Customer Average Interruptions Index          | Střední počet přerušení napájení vztažený na jednoho odběratele postiženého výpadkem                            |
| CAIDI   | Customer Average Interruptions Duration Index | Střední doba přerušení napájení vztažená na jednoho odběratele postiženého výpadkem                             |
| SAIFI   | System Average Interruptions Index            | Střední počet přerušení napájení vztažený na jednoho odběratele                                                 |
| SAIDI   | System Average Interruptions Duration Index   | Střední doba přerušení napájení na jednoho odběratele                                                           |

Povinnosti ČEPS dle Energetického zákona:

- 1) zajišťování spolehlivého provozování a rozvoje přenosové soustavy (PS),
- 2) poskytování přenosu elektřiny na základě uzavřených smluv,
- 3) řízení toků elektřiny v přenosové soustavě při respektování pravidel propojených soustav systému UCTE
- 4) odpovědnost za zajištění systémových služeb (SyS).

Služby, které jsou nutné pro bezpečný provoz elektrizační soustavy a kvalitní a spolehlivou dodávku byly dekomponovány na činnosti prováděné na systémové úrovni (systémové služby) a činnosti prováděné na lokální úrovni jednotlivými uživateli soustavy (podpůrné služby). Vazbu mezi těmito službami znázorňuje obr. 7.17. Systémové služby mají organizační a koordinační charakter a podpůrné služby jejich fyzickou realizaci. Tímto rozdělením se zřetelně vymezily oblasti činnosti a pravomoci jednotlivých subjektů.

### 7.2.2. Systémové služby (SyS)

SyS tvoří kompaktní množinu činností a prostředků zajišťujících:

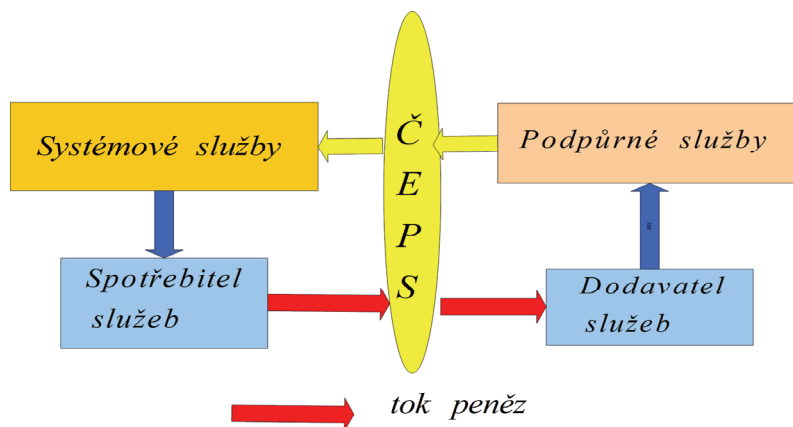
- plnění systémových standardů

- bezpečný provoz elektrizační soustavy
- kvalitní a spolehlivé dodávky elektrické energie

Systémové služby jsou zajišťovány jednak činností ČEPS (koordinace a plánování, monitorování, regulační a dispečerská činnost) a jednak nákupem podpůrných služeb jejich poskytovatelů v ES ČR i okolních soustavách. Tyto činnosti mají přirozený monopol a jako takové jsou regulovány státem. Systémové služby jsou nenahraditelné pro plnění těchto bodů:

- Zajišťování regulačních záloh pro regulaci P-f primární, sekundární a terciární
- Zajišťování lokální bilance jalových výkonů a napěťových profilů sekundární regulace U-Q ,
- Terciární regulace napětí a jalových výkonů,
- Zajišťování stability přenosu a propustnosti sítě,
- Obnovování provozu po úplném nebo částečném rozpadu soustavy (ztrátě napájení),
- Zajištění kvality energie (tvar napětí, ....)

Jednotliví uživatelé přenosové soustavy se na plnění systémových služeb podílejí realizací dílčích činností označovaných jako podpůrné služby. Provozovatel soustavy zajišťuje nezbytný objem a koordinaci těchto podpůrných služeb. Systémové služby jsou placeny jako součást ceny za elektřinu všemi spotřebiteli těchto služeb .



**Obr. 7.17: Vazby mezi systémovými a podpůrnými službami**

### 7.2.3. Podpůrné služby (PpS)

Energetický zákon je definuje jako činnosti fyzických či právnických osob, jejichž zařízení jsou připojena k elektrizační soustavě, které jsou určeny k zajištění systémových služeb. Subjekty připojené do elektrizační soustavy mají právo, při splnění zadaných technických a obchodních podmínek (kontrolováno certifikací),



nabízet podpůrné služby, které jsou pak v tržním prostředí nakupovány společností ČEPS prostřednictvím :

- Dlouhodobých kontraktů – jsou uzavírány na základě výběrových řízení, která jsou vypisována na jednotlivé kategorie služeb. Takto je nakoupeno asi 90% služeb.
- Denního trhu se službami (ePortál Damas) – prostřednictvím něhož je nakoupena zbývající část (asi 10%) služeb.

Jedná se o následující podpůrné služby :

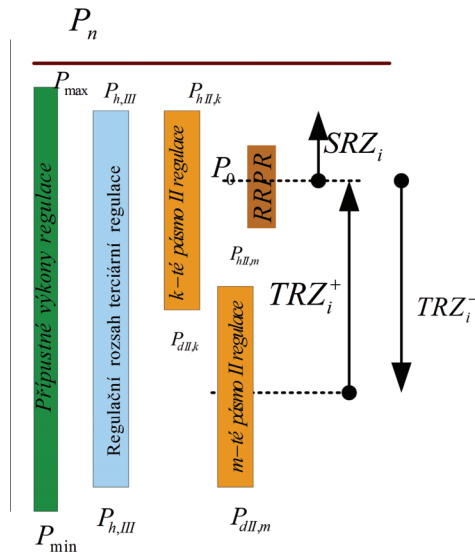
- primární regulace frekvence,
- sekundární regulace výkonu bloku,
- poskytování rychle startující 10-ti minutové zálohy,
- terciární regulace výkonu bloku,
- poskytování rychle startující 15-ti minutové zálohy,
- poskytování dispečerské zálohy,
- výpomoc ze synchronně pracující soustavy,
- havarijní odlehčení a operativní krátkodobá regulace spotřeby,
- sekundární regulace jalového výkonu bloku,
- poskytování záložního jalového výkonu,
- schopnost ostrovního provozu,
- schopnost startu ze tmy,
- poskytnutí napětí ze zahraniční soustavy.

Všechny podpůrné služby musí splňovat tyto obecné požadavky:

- měřitelnost - se stanovenými kvantitativními parametry a způsobem měření,
- garantovaná dostupnost - během denního, týdenního a ročního cyklu s možností vyžádat si inspekci,
- kontrolovatelnost - stanovením způsobu prokazování schopnosti poskytnout služby pomocí periodických testů.

Obr. 7.18 znázorňuje příklad rozložení regulačních pásem výkonu pro primární, sekundární a terciární regulaci na elektrárenském bloku. Regulační rozsah bloku je definován úrovněmi, mezi kterými lze blok provozovat dle požadavků regulace. Sekundární regulační rozsah bloku může být tvořen několika pásmy, která se mohou vzájemně překrývat.

|                               |                                                               |
|-------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| $P_{\max} - P_{\min}$         | přípustný rozsah výkonů pro regulaci                          |
| $P_{h,III} - P_{d,III}$       | regulační rozsah terciární regulace                           |
| $P_{hII,k} - P_{dII,k}$       | regulační rozsah sekundární regulace k-tého regulačního pásma |
| RRPR                          | regulační rozsah primární regulace                            |
| PRZ <sub>i</sub>              | primární regulační záloha bloku                               |
| SRZ <sub>i</sub>              | sekundární regulační záloha i-tého pásma                      |
| TRZ <sub>i</sub> <sup>+</sup> | terciární regulační záloha bloku „směrem nahoru“              |
| TRZ <sub>i</sub> <sup>-</sup> | terciární regulační záloha bloku „směrem dolů“                |
| P <sub>n</sub>                | jmenovitý výkon bloku                                         |



**Obr. 7.18: Výkonová regulační pásma**

V tabulce jsou povinné (nutnou podmínkou připojení do PS) podpůrné služby podtrženy plnou čarou a podmíněně povinné čárkovanou čarou.

| kategorie poskytovatele<br>=====     | provozovatelé elektrárenských bloků                                   | provozovatelé distribučních soustav                           | odběratelé přímo z PS | sousední PS                               |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------|
| systémová služba                     |                                                                       |                                                               |                       |                                           |
| udržování primární regulační zálohy  |                                                                       |                                                               |                       |                                           |
| sekundární regulace f a $P_{\delta}$ | <u>Sekundární regulace P</u>                                          |                                                               |                       |                                           |
| terciární regulace f-P               |                                                                       | Havarijní odlehčení a operativní krátkodobá regulace spotřeby |                       | Výpomoc ze synchronně pracujících soustav |
| zajištění provozní zálohy            |                                                                       |                                                               |                       |                                           |
| sekundární regulace U a Q            | <u>Sekundární regulace Q</u><br>Poskytování záložního Q               | Poskytování záložního Q                                       |                       |                                           |
| terciární regulace U a Q             |                                                                       |                                                               |                       |                                           |
| zajištění stability                  |                                                                       |                                                               |                       |                                           |
| obnovování provozu rozpadlé soustavy | <u>Schopnost ostrovního provozu</u><br><u>Schopnost startu ze tmy</u> |                                                               |                       | Poskytnutí napětí ze zahraniční soustavy  |

**Tab. 7.1: Přehled systémových služeb a odpovídajících podpurných služeb**

| Rozdělení regulačních záloh                                                             |                                 | Služba                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| Podle časové dosažitelnosti                                                             | Podle typu                      |                                             |
| Vteřinová $t_{lim} < 30 \text{ sec}$                                                    |                                 | Regulační záloha primární regulace          |
| Dosažitelná do 15 minut<br>$t_{lim} \leq 15 \text{ minut}$                              | Záloha netočivá                 | Rychle startující záloha (do 10 minut)      |
|                                                                                         |                                 | Vltava                                      |
|                                                                                         | Záloha točivá                   | Regulační záloha sekundární regulace        |
|                                                                                         |                                 | Vltava                                      |
| Kladná regulační záloha dosažitelná do 30 minut<br>$t_{lim} \leq 30 \text{ minut}$      | Záloha kladná netočivá          | Regulační záloha dispečerská                |
|                                                                                         |                                 | Kladná regulační záloha změny zatížení      |
|                                                                                         |                                 | Regulační energie ze zahraničí              |
|                                                                                         | Kladná točivá záloha terciární  | Regulační záloha terciární regulace         |
| Záporná regulační záloha dosažitelná do 30 minut<br>$t_{lim} \leq 30 \text{ minut}$     | Záloha záporná netočivá         | Záporná regulační záloha změny zatížení     |
|                                                                                         |                                 | Regulační záloha snížení výkonu             |
|                                                                                         |                                 | Regulační energie interní                   |
|                                                                                         |                                 | Regulační energie externí                   |
|                                                                                         | Záporná točivá záloha terciární | Záporná regulační záloha terciární regulace |
| Regulační záloha dosažitelná dobu delší jak 30 minut<br>$t_{lim} \geq 30 \text{ minut}$ | Regulační energie netočivá      | Regulační záloha dispečerská                |
|                                                                                         |                                 | Regulační energie domácí                    |
|                                                                                         |                                 | Regulační energie zahraniční                |

**Tab. 7.2: Přehled podpůrných služeb**

#### 7.2.4. Podpůrné služby elektráren v řízení P, Q bilancí

Elektrizační soustava je komplikovaný elektromechanický systém který je v ustáleném stavu jestliže všechny elektrické a mechanické stavové (tlaky páry, otáčky, napětí, ...) veličiny mají nulovou derivaci. Nutnou, nikoli však postačující, podmínkou ustáleného stavu je zajištění nulové bilance komplexních výkonů ( $\bar{S} = \bar{P} + j\bar{Q}$ ) nejen celku, ale i ve všech jednotlivých uzlech soustavy. Tuto bilanci však není z principu možné zajistit na úrovni okamžitých hodnot z důvodu relativně rychlého stochastického chování zátěže a relativně pomalejších možností zdrojů sledovat požadavky na změnu výkonů. Bilance je zajišťována na úrovni středních hodnot v rámci určitých časových intervalů. Úloha řešení komplexních bilancí celé soustavy je časově a prostorově dekomponována s využitím významných regresních závislostí veličin. Rozhodující pro řídicí struktury je využití principu **P-Q dekompozice**, ve kterém se využívá silné korelace mezi činnými výkony a kmitočtem ( $f$ ) a mezi jalovými výkony a napětím ( $U$ ). Příčné vazby Q- $f$  a P- $U$  jsou slabší a respektují se jen v přesných úlohách. V oblasti řízení bilance činných vý-

konů je stavovou veličinou elektrické části kmitočet  $f$ , který je v ustáleném stavu v celém systému stejný, a proto je veličinou systémovou a má jediný centrální regulátor. V oblasti řízení bilance jalových výkonů je měřítkem nerovnováhy jalových výkonů množina uzlových napětí. Řízení v obou úlohách má analogickou hierarchickou strukturu členěnou na úroveň

- primární,
- sekundární,
- terciární

a mající každá své cíle a frekvenční pásma působení. V realizaci tato hierarchie tvoří řetězec ve kterém nadřazená úloha ve vztahu k úloze podřízené obsluhuje vždy poruchy nižšího frekvenčního pásma a generuje požadované hodnoty pro úlohu podřízenou.

## 7.2.5. Regulace $P, f$

### Primární regulace $P, f$

Primární regulace je v oboru  $P$  i  $Q$  základní regulační úlohou působící v nejrychlejší regulační smyčce. Zajišťuje definované odezvy regulovaných výkonů jednotlivých strojů při měnících se hodnotách regulované veličiny, jinak řečeno definuje rozdělování výkonů na jednotlivé stroje. Základním prvkem ve schématu primární regulace je hydraulický servomotor, jehož zjednodušené schéma je na *obr. 7.19*, ve kterém je změna rychlosti otáčení indikována čidlem (elektronickým či mechanickým) s následným posunem v ose  $z$ . V důsledku tohoto posunu se otevře kanálek (v ose  $y$ ) pilotního servomotoru, a tím se tlakový olej dostane do prostoru pístu hlavního servomotoru (v ose  $x$ ), který svým ventilem ovlivní průtok media (páry, vody) tak, aby působil proti změně rychlosti. Výsledný pohyb v ose  $y$  se rozloží do superpozice dvou pohybů  $\Delta y_1$  a  $\Delta y_2$ :

Pohyb  $\Delta y_1$  je způsoben pohybem v ose  $z$  při neměnné poloze v ose  $x$ .

Pohyb  $\Delta y_2$  je způsoben pohybem v ose  $x$  při neměnné poloze v ose  $z$

$z_M, y_M, x_M$  ...maximální délka dráhy v osách

$p, p_0$  .....vstupní a odpadní tlak oleje

$w = \sqrt{(p - p_0) / (2\alpha A)}$  ...rychlost proudění oleje

$\alpha$  .....ztrátový činitel průtoku cesty oleje

$\alpha w^2$  .....tlaková ztráta v rozvodu oleje

$p_1 = p - \alpha w^2$  ...tlak oleje nad pístem

$p_2 = p_0 - \alpha w^2$  ...tlak oleje pod pístem



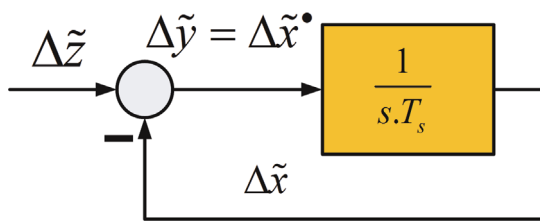
Pro rovnováhu sil na pístu hlavního servomotoru platí:

$$(p_1 - p_2)A + F = 0 \quad (7.20)$$

Z rovnice kontinuity proudění oleje vyplývá, že množství přitéklého na jednu stranu pístu se musí rovnat množství oleje odtéklého z druhé strany pístu:

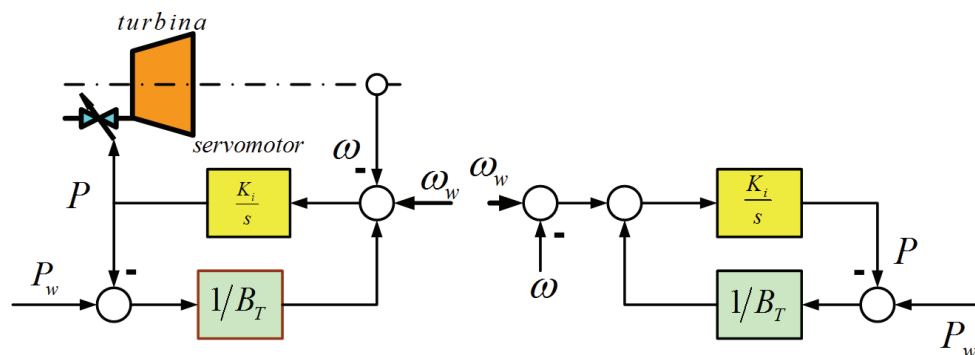
$$\left( \frac{w.k}{A} \right) \Delta \tilde{y} = \Delta \tilde{x} \quad (7.21)$$

Výsledná rovnice také dokumentuje, že rychlost pohybu pístu je úměrná otevření kanálku  $\Delta \tilde{y}$  pilotního servomotoru. Při plném otevření  $y_M$  se tedy píst bude pohybovat maximální rychlostí  $\dot{x}_M$  a celou dráhu  $x_M$  projede za dobu  $T_s$  (časová konstanta servomotoru). Rovnicím servomotoru v poměrných hodnotách vyhovuje blokové schéma:



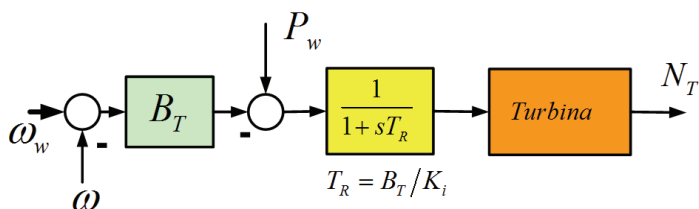
**Obr. 7.20: Blokové schéma servomotoru**

Začlenění servomotoru do schématu primární regulace prezentují následující schémata:



$$\frac{1}{B_T} = \delta \dots \text{statika primární regulace} \quad (0.03 \dots 0.07)$$

$B_T \dots$  poměrné výkonové číslo primární regulace



**Obr. 7.21: Principiální schéma primární regulace zdvihu ventilu**

Rovnice primární regulace popisující ustálený stav regulačního obvodu:

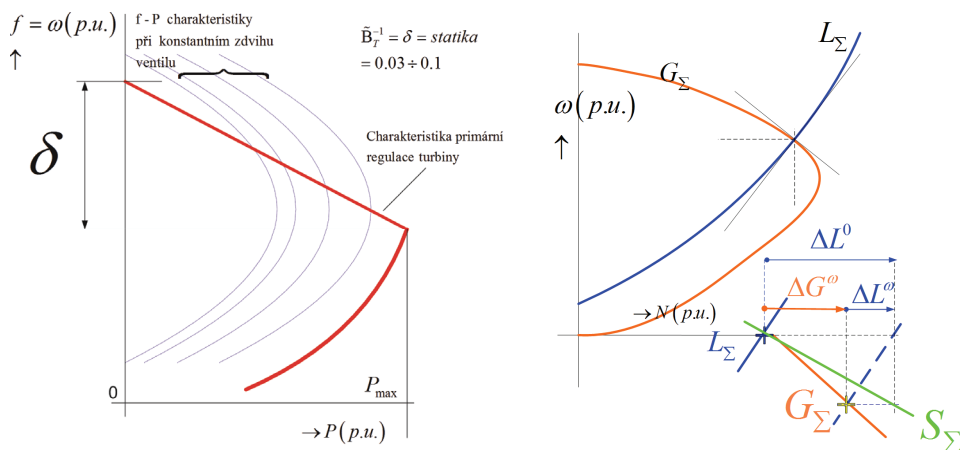
$$(P_w - P)\delta + (\omega_w - \omega) = 0 \quad (7.22)$$

Dvě formy zápisu rovnice primární regulace:

$$\Delta P \cdot \delta + \Delta f = 0$$

$$\Delta P + B_T \Delta f = 0 \quad (7.23)$$





**Obr. 7.22: Charakteristika primární regulace jednoho stroje a regulované soustavy**

V obr. 7.22 je znázorněna výsledná charakteristika primární regulace konstruovaná ze souboru f-P charakteristik turbíny při konstantním zdvihu  $\xi$  ( $\xi$  je poměrný zdvih ventilu). Výsledná charakteristika má dvě základní oblasti. Přímková oblast spojuje body vyhovující rovnici primární regulace (7.23) a tvoří stabilní část charakteristiky, která končí v bodě zlomu se souřadnicemi  $P_{\max}$  a  $\xi_{\max}$ . Nelineární oblast charakteristiky vycházející z bodu zlomu a končící v počátku je nestabilní a vyjadřuje f-P závislost při maximálním zdvihu ventilu.

V synchronním paralelním provozu více strojů se charakteristiky primární regulace sčítají při stejném kmitočtu (podmínka ustáleného stavu spolupráce synchronních strojů) a vytváří f-P charakteristiku  $G_{\Sigma}$  neregulované soustavy znázorněné na obr. 7.22. Tato charakteristika má tvar nosu a na své špičce má kritický bod soustavy rozdělující stabilní a nestabilní část charakteristiky. Pracovní bod soustavy je tvořen průsečíkem charakteristiky  $G_{\Sigma}$  a rezultující charakteristiky zátěže (mající neklesající charakteristiku f-P označené  $L_{\Sigma}$ ). Výsledná situace je znázorněna v obr. 7.22. V pracovním bodě lze zjistit velmi důležité číslo vyjadřující závislost výsledné změny frekvence reagující na změnu výkonové bilance soustavy. Zde je znázorněna počáteční změna výkonu zátěže  $\Delta L^0$  na kterou soustava reaguje změnou  $\Delta f$ . S klesající hodnotou frekvence se mění podle charakteristiky zátěže i její výkon, takže ve výsledku se požadavek zátěže zmenší o  $\Delta L^{\omega}$  (samoregulační efekt zátěže) a potřebná změna výkonu generátorů je jen  $\Delta G^{\omega}$ . Výslednou relaci mezi změnou výkonové bilance a kmitočtem určuje výkonové číslo soustavy.

$$B_s = \Delta P / \Delta f \quad (7.24)$$

Výkonové číslo soustavy má důležitou roli při konstrukci rovnice sekundární regulace kmitočtu a vytvoření principu neintervence.

## Sekundární regulace P, f

V propojené ES je služba primární regulace frekvence založena na tzv. principu solidarity. To znamená, že při narušení rovnováhy mezi zatížením a výkonem zdrojů (např. poruchovým výpadkem bloku nebo změnou zatížení) se na „návratu“ do rovnovážného stavu podílejí všechny zdroje propojené soustavy, které jsou do systému primární regulace frekvence zapojeny. Naproti tomu základem sekundární regulace je sofistikovaná konstrukce regulované veličiny podle síťové charakteristiky, která zajišťuje princip neintervence. Rovnice síťové charakteristiky k-té soustavy a její regulační odchylka  $ACE_k$  (Area Control Error) mají tvar:

$$\Delta P_{\Sigma,k} + B_{s,k} \Delta f = 0 \quad (7.25)$$

$$ACE_k = \sum_{\forall i} \Delta P_{\delta ki} + B_k \Delta f \quad (7.26)$$

ve kterém znamenají:

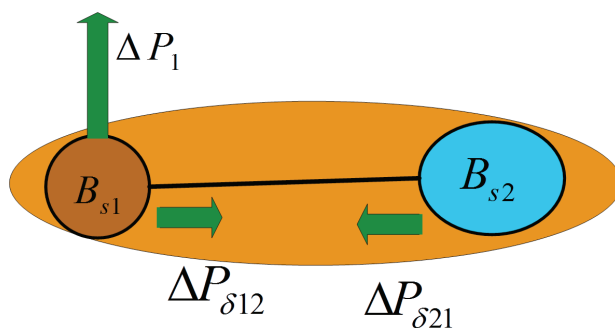
$\Delta P_{\Sigma,k}$  .... odchylka výkonové bilance k-té soustavy

$B_{sk}$  ..... výkonové číslo k-té soustavy

$\Delta P_{\delta ki}$  ..... odchylka předávaného salda výkonů od soustavy k soustavě i

$\Delta P_{\delta ki} = -\Delta P_{\delta ik}$  ...vzájemná vazba odchylek salda

$ACE_k$  ..regulační odchylka k-té soustavy, i...index spolupracující soustavy



**Obr. 7.23: Dvě spolupracující soustavy a porucha výkonové bilance v soustavě 1**

Pro ilustraci realizace principu neintervence rovnicí síťové charakteristiky uvažme poruchu výkonové bilance v soustavě 1 znázorněné na obr. 7.23. Porušením výkonové bilance v soustavě 1 dostávají rovnice síťové charakteristiky ve spolupracujících soustavách 1 a 2 tvar:

V soustavě 1:

$$\underbrace{\Delta P_1 + \Delta P_{\delta 12}}_{P_{\Sigma,1}} + B_{s1} \Delta f = 0 \quad (7.27)$$

V soustavě 2:

$$\underbrace{\Delta P_{\delta 21}}_{\Delta P_{\Sigma,2}} + B_{s2} \Delta f = 0 \quad (7.28)$$

Součtem rovnic (7.26) a (7.27) je síťová charakteristika propojených soustav ve tvaru:

$$\Delta P_1 + (B_{s1} + B_{s2}) \Delta f = 0 \quad (7.29)$$

Ze kterého vyplývá výsledná změna kmitočtu:

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_1}{(B_{s1} + B_{s2})} \quad (7.30)$$

Dle principu solidarity pomáhá primární regulace soustavy 2 předávaným výkonem  $\Delta P_{\delta 21}$  soustavě 1 v počáteční fázi kompenzace poruchy:

$$\Delta P_{\delta 21} = -B_{s2} \Delta f = \frac{B_{s2}}{(B_{s1} + B_{s2})} \Delta P_1 \quad (7.31)$$

Na změnu kmitočtu dle primární regulace reagují v pomalejší regulační smyčce regulace sekundární pro které vzniknou regulační odchylky  $ACE_1, ACE_2$ .

V jednotlivých soustavách:

V soustavě 1:

$$ACE_1 = \Delta P_{\delta 12} + B_{s1} \Delta f = -\Delta P_1 \quad (7.32)$$

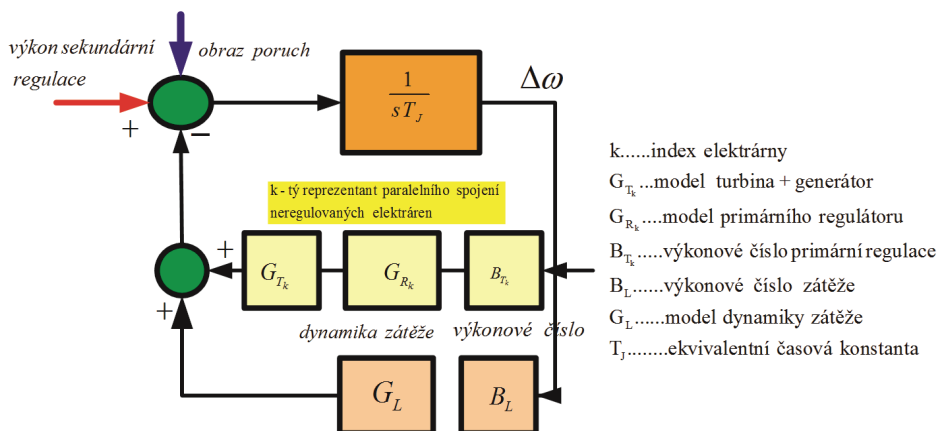
V soustavě 2:

$$ACE_2 = \Delta P_{\delta 21} + B_{s2} \Delta f = -B_{s2} \Delta f + B_{s2} \Delta f = 0 \quad (7.33)$$

Nulová regulační odchylka  $ACE_2$  v soustavě 2 dokumentuje princip neintervence říkající, že každá soustava si musí ve finální fázi vyřešit svoji bilanci sama svými vlastními prostředky.

Případ spolupráce dvou propojených soustav v jednoduchém modelovém provedení je znázorněn na *obr. 7.24*. Soustava s indexem *i* je zde rozdělena na dvě části:

Neregulovaná část se zdroji mající jen primární regulátory a zátěží se zjednodušeným modelem:



**Obr. 7.24: Model neregulované soustavy**

Neregulovaná soustava se vyjádří přenosem:

$$G_{si} = \frac{1}{T_{ji} \cdot s + B_{si}} = \frac{1/B_{si}}{(T_{ji}/B_{si})s + 1} \quad (7.34)$$

Regulovaná část zahrnující elektrárny *E* vybrané pro sekundární regulaci výkonové bilance systému. K této části přísluší přenosy a výrazy:

regulovaná veličina:

$$ACE\_i = B_{si} \Delta \omega_i + \Delta P_{\delta ij} \quad (7.35)$$

rozdílová úhlová rychlost (frekvence)

$$\Delta \omega_{ij} = \Delta \omega_i - \Delta \omega_j, \quad (7.36)$$

relativní úhel mezi soustavami

$$\Delta \delta_{ij} = \Delta \omega_{ij} / s \quad (7.37)$$

přenos předávaného výkonu

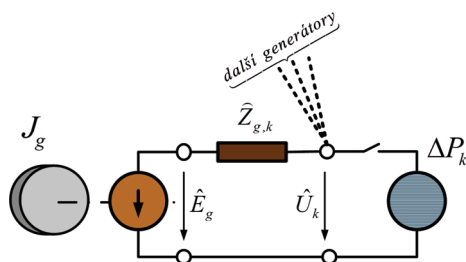
$$G_{ij} = (\partial P_{\delta ij} / \partial \delta_{ij}) / s \quad (7.38)$$

předávaný výkon

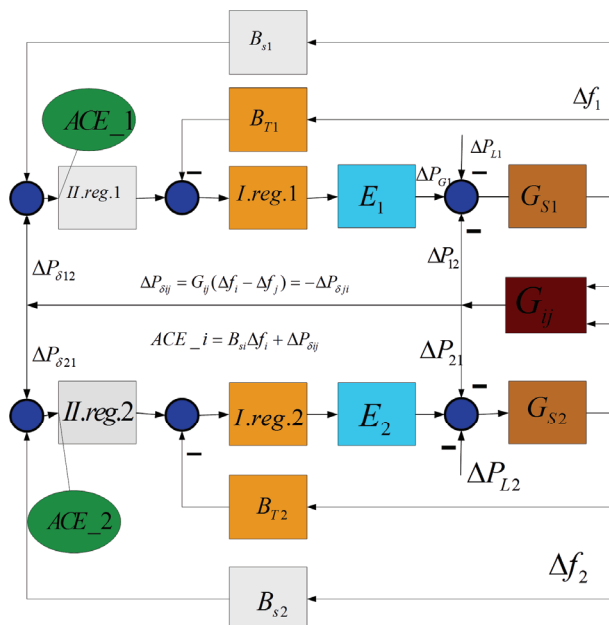
$$\Delta P_{\delta ij} = G_{ij} \Delta \omega_{ij} = -\Delta P_{\delta ji} \quad (7.39)$$

## 7.2.6. Rozdělení skokové změny činného výkonu

Rozdělování skokové změny činného výkonu v uzlu soustavy po generátorech má několik fází spojitě přecházejících jedna v druhou. Při vysvětlování začátku tohoto procesu je nutno vycházet z fyzikální vlastnosti polohy vnitřních napětí generátorů  $E_g$ , která se nemůže měnit skokově v důsledku pevné vazby se setrvačnými hmotami na hřídeli (viz *obr. 7.25*). U napětí uzlů sítě, která jsou z principu spojena jen s krátkými časovými konstantami elektrických obvodů, dochází ke změně polohy velmi rychle - prakticky okamžitě.



Obr. 7.25: Vazba generátoru a poruchového uzlu



**Obr. 7.26: Regulace výkonové bilance a f dvou spolupracujících soustav**

Důsledkem nevyvážené bilance mezi mechanickým momentem turbíny a elektrickým momentem zatížení generátoru je úhlové zrychlení  $\varepsilon_g$  dané pohybovou rovnicí soustrojí turbína-generátor:

$$\varepsilon_g = \frac{d\omega_g}{dt} = \frac{N_g + P_g}{T_{J_g}} = \frac{\Delta N_g + \Delta P_g}{T_{J_g}} \quad (7.40)$$

$\omega_g$  .....elektrická úhlová rychlost otáčení stroje s indexem g

$N_g, \Delta N_g$  ... mechanický výkon turbíny a jeho změna

$P_g, \Delta P_g$  .....elektrický výkon generátoru a jeho změna

$T_{J_g}$  .....časová konstanta rotačních hmot soustrojí.

Zrychlení  $\varepsilon_g$  způsobí změnu úhlu mezi fázorem vnitřního napětí studovaného stroje s indexem g a místem poruchy s indexem k a tím i změnu vazebního výkonu generátoru g dle linearizované vazby mezi změnou úhlu a výkonem:

$$\Delta P_{g,k} = C_{g,k} \Delta \delta_{g,k} \quad (7.41)$$

$\Delta\delta_{g,k} = \Delta\delta_g - \Delta\delta_k$  ...změna úhlu mezi fázory vnitřního napětí generátoru a poruchového uzlu

$\Delta\delta_g, \Delta\delta_k$  .....změna úhlu fázoru napětí generátoru a poruchového uzlu

$\Delta P_{g,k}$  .....změny vazebního výkonu generátoru

$E_g, U_k$  ...modul vnitřního napětí generátoru a poruchového uzlu sítě

$\hat{Z}_{g,k}$  .....vazební impedance mezi branou vnitřního napětí generátoru a branou poruchového uzlu

### Fáze elektrického rozdělení výkonů.

Předpokládejme, že v uzlu sítě s indexem  $k$  došlo v čase  $t = 0$  ke skokové změně výkonu  $\Delta P_k$  ( $\Delta P_k > 0$  připnutí generace, odepnutí zátěže,  $\Delta P_k < 0$  odepnutí generace, připnutí zátěže). Za přijatého předpokladu pro změny úhlu napětí je  $\Delta\delta_g = 0$  pro všechny generátory a změna úhlu  $\Delta\delta_k$  se projeví v poruchovém uzlu. Tato změna a pak generuje v bilanci na hřídeli přírůstek  $\Delta P_{g,k}$ . Velikost změny o  $\Delta\delta_k$  je určena podmínkou vyvážené bilance změn výkonu všech generátorů a poruchy. Výsledkem této fáze je rozdělení poruchy podle úměry synchronizačního výkonu  $g$ -tého stroje k součtu synchronizačních výkonů všech strojů k místu poruchy. Ze vztahu vyplývá, že se zkracující se elektrickou vzdáleností od místa poruchy roste podíl výkonu na její kompenzaci. Vztahy příslušné k popisu této fáze jsou shrnuty v následujících rovnicích.

Vyrovnaná bilance změn výkonů:

$$\Delta P_k + \sum_{\forall g} \Delta P_{g,k} = 0 \quad (7.42)$$

Bilance výkonů s vyjádřením  $\Delta P_{g,k}$ :

$$\Delta P_k - \Delta\delta_k \sum_{\forall g} C_{g,k} = 0 \quad (7.43)$$

Změna úhlu poruchového uzlu na počátku elektrického rozdělení poruchy:

$$\Delta\delta_k = \Delta P_k / \sum_{\forall g} C_{g,k} \quad (7.44)$$

změna výkonu  $g$ -tého generátoru v elektrickém rozdělení poruchy  $\Delta P_k$ :

$$\begin{aligned}\Delta P_{g,k} &= -C_{g,k} \Delta \delta_k \\ \Delta P_{g,k} &= -\frac{C_{g,k}}{\sum_{\forall k} C_{g,k}} \Delta P_k\end{aligned}\quad (7.45)$$

Po elektrickém rozdělení je bilanční výkon  $P_{ag} = P_g + N_T$  u všech strojů nenulový a jeho kladná (záporná) polarita otáčky zvětšuje (zmenšuje). Nastává fáze mechanického rozdělení výkonové změny. K pohybu všech strojů přísluší ekvivalentní pohyb daný pohybem těžiště uspořádání setrvačných hmot těchto strojů a elektrických vazeb mezi nimi. V závislosti na tuhosti těchto vazeb (hodnoty synchronizačního výkonu) se pohyb strojů může ztotožnit s pohybem těžiště a nastaví se společné úhlové zrychlení  $\varepsilon_E = d\omega_E/dt$  a v tomto případě se výkonová porucha na jednotlivé stroje rozděluje podle podílu momentu setrvačnosti stroje k celkovému momentu setrvačnosti systému.

Vztahy pro fázi mechanického rozdělování výkonu poruchy.

Vyjádření akceleračního výkonu

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = \Delta P_{g,k} = -\Delta P_k \frac{C_{g,k}}{\sum_{\forall g} C_{g,k}} \quad (7.46)$$

Součet akceleračních výkonů pokrývá poruchu

$$\sum_{\forall g} J_g \frac{d\omega_g}{dt} = \varepsilon_E J_E = \sum_{\forall g} \Delta P_{g,k} = -\Delta P_k \quad (7.47)$$

Vztahy pro pohyb těžiště soustavy

$$J_E \cdot \omega_E = \sum_{\forall g} J_g \omega_g \quad (7.48)$$

$$\frac{d}{dt} \sum_{\forall g} J_g \omega_g = J_E \cdot \frac{d\omega_E}{dt} = -\Delta P_k \quad (7.49)$$

Zrychlení těžiště soustavy

$$\varepsilon_E = \frac{d\omega_E}{dt} = \frac{-\Delta P_k}{J_E} \quad (7.50)$$

Mechanické rozdělení výkonového skoku v případě, že všechny stroje mají společné zrychlení těžiště



$$\Delta P_{gk} = -\Delta P_k \frac{J_g}{J_E} \quad (7.51)$$

Po změně rychlosti otáčení stroje se projevuje činnost primární regulace kmitočtu a nastává fáze řízeného rozdělování ve kterém se výkony rozdělují úměrně výkonovým číslům primárních regulátorů. Při dostatečné výkonové rezervě v primární regulaci se v bilančním bodě obnoví rovnováha mezi mechanickým a elektrickým výkonem, ale jsou porušena salda předávaných výkonů, které na základě principu solidarity vypomáhaly soustavě ve které vznikla porucha v její kompenzaci a v systému existuje ustálená hodnota frekvence. Na tuto situaci reaguje sekundární regulátor soustavy porušené soustavy. Na tento regulátor jsou připojeny terminály elektráren s bloky v sekundární regulaci a mění svůj výkon v souladu s rovnicí sekundární regulace. Sekundární regulace spolupracujících soustav na závěrečné kompenzaci poruchy, v souladu s principem neintervence, nespolupracují, protože jejich regulovaná veličina sekundární regulace je nulová a tudíž tuto poruchu nevidí.

V případě že sekundární rezerva regulační oblasti není schopna pokrýt poruchu aktivuje dispečer rychle startující rezervu (zpravidla vodní elektrárnu). Na činnost sekundární regulace navazuje regulace terciární která podle pravidel terciární regulace nahradí vyčerpané rezervy regulace sekundární. Po ukončení rozdělení výkonu primárními regulátory zahajují činnost sekundární regulátory kmitočtu a předávaných výkonů, které rozdělí výkon poruchy v porušené soustavě tak, aby ji porušená soustava plně vykompenzovala a saldo předávaných výkonů a kmitočty se dostaly do předepsaných hodnot.

### 7.2.7. Regulace napětí

Regulace napětí a jalového výkonu v přenosových soustavách je velmi důležitou systémovou úlohou, která zajišťuje hospodárnost provozu elektrizační soustavy, řízení ztrát, ale především zajištění bezpečnosti provozu, statické, či dynamické stability napětí. Napětí a jalový výkon jsou fyzikálně silně korelované veličiny a jejich regulace úzce souvisí s kvalitou dodávek elektrické energie. V ustáleném stavu není napětí ve všech uzlech stejné a proto na rozdíl od frekvence není systémovou, ale nýbrž jen lokální veličinou a taková je i příslušná regulace. V rámci regulace napětí v přenosové soustavě České republiky byla přijata strategie pilotních uzlů ve které se řídí jejich napětí. Akčními prvky regulace jsou injekce jalových výkonů do uzlů, majících vhodný citlivostní koeficient vzhledem k pilotnímu uzlu. Injekce jsou generovány regulací buzení připojených synchronních generátorů, změnou převodů regulačních transformátorů či jalovým výkonem kompenzačních zařízení řízených prvky silnoproudé elektroniky.

#### Primární regulace napětí

Generátoru je základní, lokálně působící, regulační úlohou, jejíž cílem je zajištění definované reakce jalového výkonu stroje na měnící se podmínky v síti indikované napětím ve vybraném bodě a zajištění hodnot žádaných regulací sekundární. Řídící funkce pro primární regulaci generátoru  $U$  je popsána rovnicí v polohovém nebo přírůstkovém tvaru:

polohový tvar charakteristiky:

$$U + s_Q Q = U_w \quad (7.52)$$

přírůstkový tvar charakteristiky:

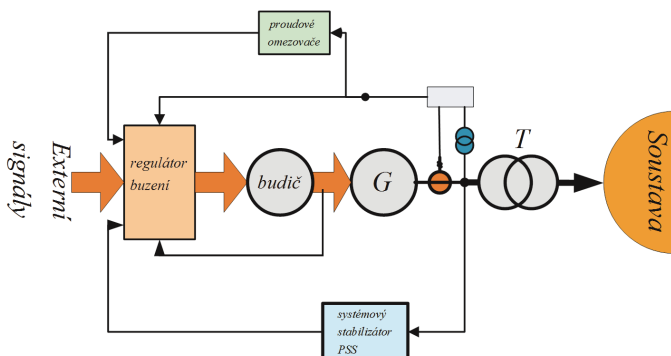
$$\Delta U + s_Q \Delta Q = 0 \quad (7.53)$$

$s_Q$  ..... statika primární regulace, vztažená k místu měření  $U$

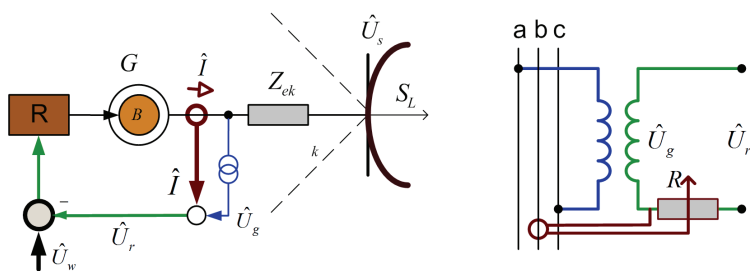
$U_w$  ..... žádané napětí naprázdno, zadává nadřazená regulace

$Q$  ..... jalový výkon stroje

Primární regulace napětí zajišťuje rychlou a definovanou reakci výroby jalové energie v závislosti na změnách napětí v místě měření. Působí lokálně a má pozitivní vliv na stabilitu celého systému.



**Obr. 7.27: Struktura regulace buzení synchronního generátoru**



**Obr. 7.28: Principiální schéma primární regulace napětí synchronního generátoru**

Výsledná reaktance od místa měření napětí k místu připojení do mohutné soustavy. Zpravidla se dá aproximovat pro vyjádření majoritních vlastností regulace napětí jen reaktancí.

$$Z_{\text{ex}} = R_{\text{ex}} + jX_{\text{ex}} \quad (7.54)$$

Vyjádření napětí generátoru z bilance regulačního obvodu a z profilu napěťových modulů silové části.

$$U_g = U_s + x_{\text{ex}} \cdot I_j, U_g = U_w - s_j \cdot I_j \quad (7.55)$$

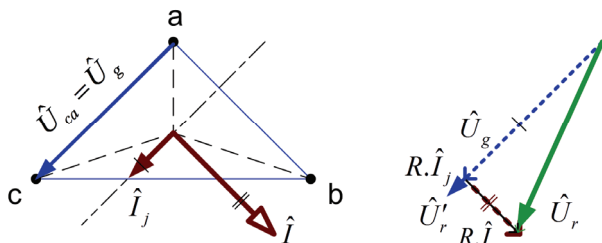
Polarita statiky jalovým proudem je dána zapojením přívodů proudu k odporu  $R$ , jehož hodnotou se velikost statiky nastavuje.

$$\begin{aligned} &> 0 \rightarrow \text{stabilizace charakteristiky} \\ s_j < 0 &\rightarrow \text{kompaundace charakteristiky} \end{aligned} \quad (7.56)$$

Výsledná charakteristika primární regulace bloku.

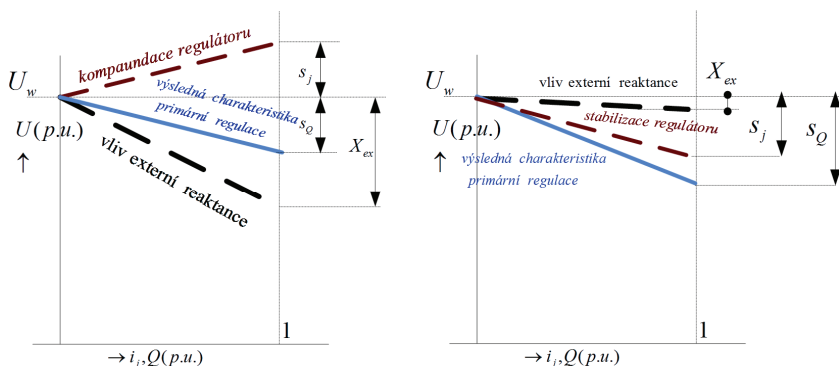
Statikou jalovým proudem  $s_j$  se ladí na požadovanou hodnotu statiky jalovým výkonem bloku. Je-li například reaktance blokového transformátoru velká (malá) zapojí se kompaundace (stabilizace) charakteristiky.

$$U_s = U_w - \underbrace{(x_{\text{ex}} + s_j)}_{s_Q} \cdot I_j \quad (7.57)$$



**Obr. 7.29: Princip korekce napětí generátoru**

Kompaundace regulátoru se používá ke kompenzaci vlivu příliš velké externí reaktance (například bokového transformátoru) na požadovanou hodnotu statiky jalovým proudem. Stabilizace se používá k doplnění malé nebo nulové hodnoty externí reaktance na požadovanou hodnotu statiky. Oba případy jsou prezentovány na obr. 7.30.



**Obr. 7.30: Tvorba výsledné charakteristiky primární regulace napětí**

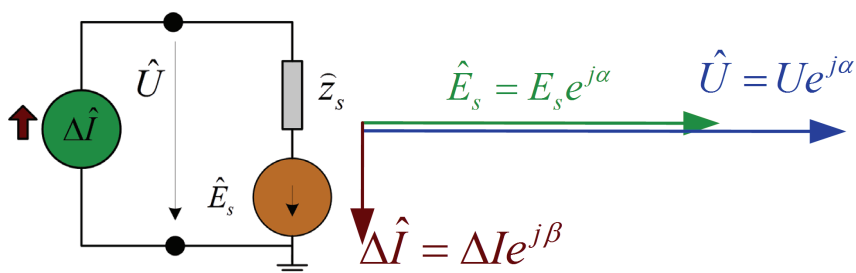
### Sekundární regulace napětí

Sekundární regulace generuje požadované hodnoty pro jednotlivé obvody primární regulace na základě řešení regulační rovnice sekundárního regulátoru řízené lokality. Regulace slouží pro koordinaci regulačních prvků v dané lokalitě na základě požadavků terciární regulace. Udržuje zadané velikosti napětí ve vybraných uzlech ES a rozděluje požadovaný jalový výkon na jednotlivé stroje. Regulační proces má být aperiodický nebo maximálně s jedním překmitem; výsledná doba regulace kratší než 120 s. Sekundární regulace U a Q (automatizovaná se označuje ASRU) se dělí na:

- automatické regulátory napětí (ARN), které reagují na odchylku U v pilotním uzlu ES od zadané hodnoty a určují potřebný Q pro vyrovnaní odchylky. Akční veličinou je změna zadané hodnoty vyráběného Q (pomocí sekund. regulátoru Q: SRQ) nebo změna U primárních regulátorů (PRN)
- automatické regulátory odboček síťových transformátorů: HRT (hladinová regulace transformátoru) s cílem udržet hladinu napětí sekundární strany na zadané hodnotě. Změnu napětí způsobuje v systému řada operací. Například: změna odběru (dodávky) v uzlu, změna převodu transformátoru přenosové soustavy, zapnutí (vypnutí vedení). Všechny tyto případy můžeme modelově převést na injekci proudů do uzlů soustavy.

### Proudová injekce do brány přenosového systému

Tato úloha dokumentuje charakter dodávaného výkonu elektrárnou, kterým se dá měnit modul napětí v uzlu přenosového systému. Obr. 7.31 znázorňuje injekci proudu do brány tohoto systému, na které bylo v chodu bez injekce napětí o modulu  $E_s$ . Ekvivalentní impedance systému je  $\hat{Z}_s$ . Cílem injekce je zvýšit modul napětí na bráně o  $\Delta u$  beze změny fáze.



**Obr. 7.31: Proudová injekce do brány přenosového systému**

Ve schématu znamenají:

Komplexní ekvivalentní impedance systému

$$\hat{Z}_s = Z_s e^{j\varepsilon} \quad (7.58)$$

Fázory napětí na bráně před a po injekci proudu.

$$\hat{E}_s = E_s e^{j\alpha}, \hat{U} = U e^{j\alpha} \quad (7.59)$$

změna napětí způsobená injekcí

$$\Delta \hat{U} = \hat{U} - \hat{E}_s = \Delta U e^{j\alpha} = Z_s e^{j\varepsilon} \cdot \Delta I e^{j(\alpha+\varphi)} \quad (7.60)$$

podmínka pro dodržení konfáznosti napětí před a po injekci proudu

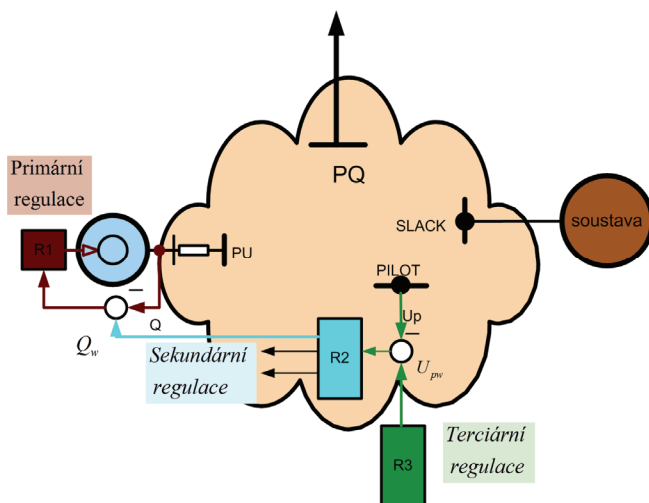
$$\varepsilon + \varphi = 0 \quad (7.61)$$

Je-li impedance soustavy nahraditelná jen induktivní ekvivalentní impedancí  $Z_s = jX_s$ , pak:

$$\varepsilon = \pi/2, \varphi = -\pi/2 \rightarrow \text{Injektovaný proud je čistě induktivní}$$

Výsledkem této úlohy je poznatek, že pro zvýšení napětí přenosového systému ve kterém reaktance převažuje nad rezistancí je nutno injektovat proud (a tím i výkon) induktivního charakteru. Tyto injekce jsou základem sekundární regulace napětí.

Sekundární regulace slouží ke koordinaci regulačních prvků v dané lokalitě na základě požadavků terciární regulace. Reaguje tedy na odchylku napětí v daném sledovaném pilotním uzlu a určuje potřebný jalový výkon pro vyrovnaní této odchylky, který je zajištěn generováním potřebných jalových výkonů dílčími stroji, připojenými tlumivkami, kondenzátory, případně změnami odboček síťových transformátorů v dané oblasti.



**Obr. 7.32: Hierarchická struktura řízení napětí**

Uvažme typové schéma oblasti napájené jednak lokálními zdroji a připojením k nadřazené soustavě. V soustavě se nachází  $\partial g$  uzlů typu PU (zadán výkon a napětí) do kterých pracují lokální zdroje, pilotní uzel jehož napětí se má zdroji řídit, množina odběrových uzlů typu PQ (zadány výkony) a bilanční uzel do kterého je připojen ideální napěťový zdroj reprezentující nadřazenou soustavu. Pilotní a bilanční uzel jsou spojeny vazební impedancí  $Z_p$ . Regulační úloha řízení napětí a bilance jalových výkonů je hierarchicky strukturována do tří úrovní, terciární úroveň požadované hodnoty pilotních uzlů generuje a sekundární regulačními zásahy zajišťuje.

### Terciární regulace napětí

Je centralizovaná služba, koordinující toky jalových výkonů a velikost napětí pro bezpečný a ekonomický provoz ES jako celku. Podmínkou bezpečného provozu PS je zachování nezbytné točivé rezervy jalového výkonu vhodně rozmístěné v síti nejen pro aktuální provozní stav, ale i pro zachování stability systému v případě náhlých změn, jako je výpadek velkého bloku, změna topologie nebo prudký nárůst zatížení. TRN umožňuje optimální provoz prostřednictvím zadaných hodnot napětí pro automatické regulátory napětí (ARN) v pilotních uzlech, optimální skladbou kompenzačních prostředků (např. kompenzačních tlumivek), případně změnou převodu vybraných transformátorů, které mají významný vliv na rozdělení toku  $Q$  mezi jednotlivými napěťovými úrovněmi. TRN přitom respektuje omezující podmínky např. povolené rozsahy napětí a jalových výkonů v uzlech přenosové soustavy, na regulovaných zdrojích a na mezistátních vedeních.

## 7.3. Literatura

- [1] Heuck K: Elektrische Energieversorgung. Vieweg+Teubner Verlag - Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010
- [2] Schwab A. J.: Elektroenergiesysteme. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010

## 8. Synchronfázorová měření a systémy WAMS (Wide Area Monitoring System)

### 8.1. Úvod

Moderní elektrizační soustavy vybavené všemi běžnými ochrannými funkcemi byly v posledních letech zasaženy významnými poruchami. Tyto události měly řadu průvodních jevů od oscilací frekvence až po rozpad soustav. Rozvoj a dynamika nasazování nových (zejména obnovitelných) zdrojů s sebou nese netradiční stavy soustavy ve srovnání s dřívějšími podmínkami. Komplexnost a rozsáhlost propojených systémů s sebou nese potřebu nasazení dalších prostředků pro monitorování stavu soustavy.

Jedním z přístupů přinášejících nové možnosti je nasazení systémů WAMS, WAPS a WACS (Wide Area Monitoring System, Wide Area Protection System a Wide Area Control System). Tyto systémy jsou někdy ne zcela správně chápány pouze jako systémy měření synchronfázorů (jednotkové synchronní fázory jsou veličiny mající ve výrazu  $e^{j\omega t}$  stejné  $\omega$  i  $t$  a synchronfázory jsou veličiny mající stejné  $t$  ( $\omega$  mohou mít různé)). Pro nasazení pokročilých funkcí je zapotřebí získávat jak informace ze stávajících systémů (řadu stavů soustavy lze s konvenčními měřeními pozorovat přesněji), tak i některé informace doposud nevstupující do systému (zejména synchronně měřené hodnoty fázorů napětí a proudů). Řadu aplikací lze výrazně zpřesnit doplňujícími prostředky (např. monitoring mechanických kmitů vedení pro amplitudu).

Jednotky pro měření fázorů (PMU – Phasor measurement unit) jsou považovány za jedny z nejvýznamnějších měřících zařízení v elektroenergetických soustavách budoucnosti. Jejich výjimečnost spočívá ve schopnosti měřit, předávat a shromažďovat data o měřených fázorech napětí a proudu v různých místech elektrické sítě. Časová synchronizace je realizována s využitím systému GPS. Požadavky na měření fázorů jednotkami PMU popisuje norma C37.118, v současné době platná úprava nedefinuje chování jednotek PMU v přechodných dějích. Do budoucnosti se předpokládá využití časových průběhů, které lépe popisují dynamické chování systému a moderními metodami lze identifikovat základní a přechodné složky. Využitím jenom fázorů se ztrácí podstatná část informací.

Bezpečnost a spolehlivost provozu elektrizační soustavy je třeba sledovat pomocí kritérií napěťové a přenosové stability.

Přenos činného a jalového výkonu po linkách elektrizační soustavy je omezen přenosovou schopností těchto linek. Z hlediska stability přenosu tuto schopnost určují pasivní parametry vedení (především reaktance a rezistance) a fázory napětí na obou koncích linky. Se vzrůstajícím zatížením se zvětšuje rozdíl fází obou koncových fázorů napětí, tzv. zátěžný úhel. Po překročení určité meze tohoto zátěžného úhlu již není možné stabilně přenášet požadovaný činný výkon po vedení. V takovém případě hrozí ztráta stability toku výkonu, jeho převedení na jiné větve elektrizační soustavy a nebezpečí přetížení dalších linek soustavy. Synchronní měření fázorů napětí na koncích úseku vedení spolu se znalostí parametrů vedení umožňuje predikovat zatížitelnost linky z hlediska přenosové stability.

Napětíová stabilita souvisí se změnou napětí v uzlu soustavy při změnách zatížení, zejména jalového výkonu. Se zvyšujícím se zatížením obecně klesá napětí na konci přenosové linky, což ovlivňuje chování spotřebičů i napětíové a proudové poměry v dalších částech elektrizační soustavy. Dosáhne-li zatížení kritické hodnoty, není již možné ho zvyšovat při požadavku zachování napětí v daných mezích. Při znalosti napětí-výkonové charakteristiky a okamžité hodnoty napětí je možné určit výkonovou rezervu zatížení. Při překročení této maximální rezervy je překročen kritický bod charakteristiky a hrozí nebezpečí napětíového kolapsu, kdy jsou odpojovány zátěže v důsledku stále klesajícího napětí.

Napětíový kolaps je často podceňované, ale reálné nebezpečí ohrožení spolehlivého chodu soustavy a dodávky elektrické energie spotřebitelům. Přirozená napětí-výkonová charakteristika části elektrizační soustavy umožňuje předávat výkon do zátěže pouze v omezeném rozsahu. Je-li dosažena kritická hodnota dodávaného výkonu, změní se charakter této „nosové“ křivky a důsledkem je nezadržitelný pokles napětí v uzlu soustavy i při následném snižování odebíraného výkonu. To má za následek odepínání skupin zátěže, z toho plynoucí snížení spolehlivosti dodávky a ohrožení bezpečnosti dalších částí soustavy, kde opět může dojít k přetěžování linek.

Využitím jednotek pro synchronní měření fázorů jsme schopni online vyhodnocovat napětíovou a přenosovou stabilitu ve vztahu k jejich mezím a předcházet tak mimořádným stavům v soustavě, jejichž důsledkem by mohlo být omezení bezpečné a spolehlivé dodávky elektrické energie konečným spotřebitelům.

## 8.2. Měřicí řetězec a přesnosti při měření fázorů

Limitní přesnosti měření s PMU dle literatury:

|           |        |
|-----------|--------|
| amplituda | 0,1 %  |
| úhel      | 0,01 ° |

Nepřesnosti vznikají zejména v měřicích řetězcích. Nepřesnost při měření relativních úhlů je ovlivněna přesností synchronizace jednotlivých měřicích míst. Chyba úhlu vzniklá nepřesnou synchronizací a je dána vztahem (8.1)

$$\delta_{\Delta} (^{\circ}) = t_{\Delta} (\mu s) * 0,018 \quad (8.1)$$

$$\delta_{\Delta} \dots\dots \text{chyba úhlu } (^{\circ})$$

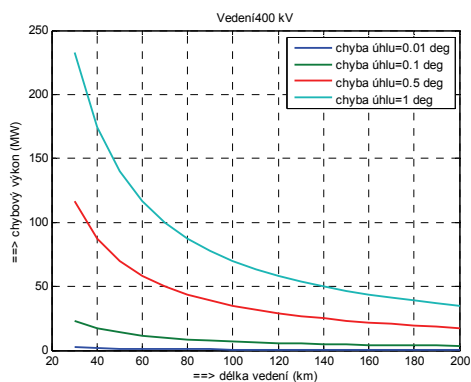
$$t_{\Delta} \dots\dots \text{chyba času } (\mu s)$$

Při rekonstrukci výkonu z měření fázoru napětí a známých parametrů sítě vzniká při chybě úhlu chybový výkon přibližně dle vztahu (8.2):

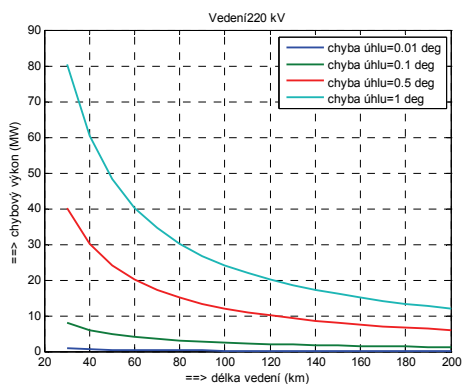
$$P_{\Delta} = \frac{U^2}{x_{1,l}} \delta_{\Delta} \text{ chyba výkonu} \quad (8.2)$$



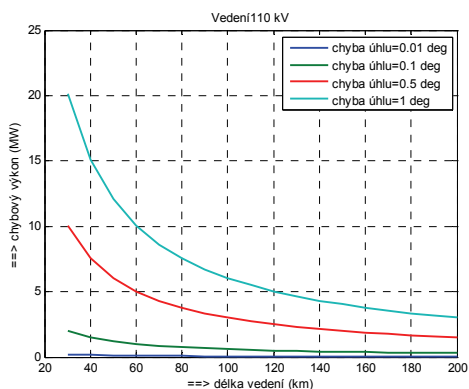
jehož grafické znázornění pro různé napěťové úrovně a délky vedení ukazují obr. 8.1 až obr. 8.3).



**Obr. 8.1: Závislost chybového výkonu na úhlu: hladina 400kV**



**Obr. 8.2: Závislost chybového výkonu na úhlu: hladina 220kV**



**Obr. 8.3: Závislost chybového výkonu na úhlu hladina: 110kV**

Pro korektní rekonstrukci výkonu se považuje jako mezní odchylka 0,1 °.

Vychází –li se ze vztahu pro výkon předávaný mezi dvěma zdroji napětí mezi uzly a,b.

$$\hat{S}_{ab} = \frac{U_a^2}{\hat{Z}_{ab}^*} - \frac{\hat{U}_a \hat{U}_b^*}{\hat{Z}_{ab}^*} \quad (8.3)$$

a jeho zjednodušení  $\hat{Z}_{ab} = jx_{ab}$  je výraz pro přenášený činný výkon

$$P_{ab} = \frac{U_a U_b}{X_{ab}} \sin \delta_{ab} = P_{\max} \sin \delta_{ab} \quad (8.4)$$

ve kterém  $P_{\max}$  označuje maximální přenositelný výkon.

Linearizací pomocí prvního členu Taylorova rozvoje a následnou normalizací vzhledem k  $P_{\max}$  se získá relace mezi odchylkami proměnných veličin pro odhad přesností:

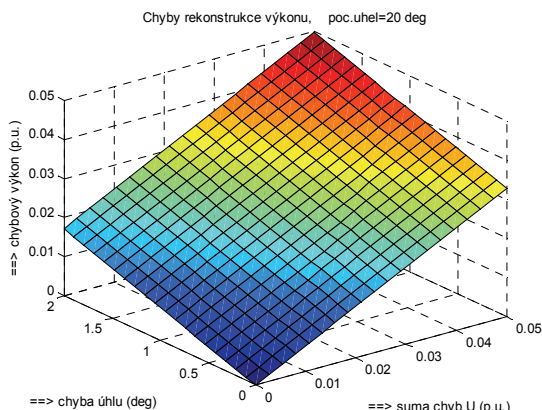
$$\Delta \tilde{P}_{ab} = \sin \delta_{ab,0} (\Delta \tilde{u}_a + \Delta \tilde{u}_b) + \cos \delta_{ab,0} \Delta \delta \quad (8.5)$$

$\Delta \tilde{u}_a, \Delta \tilde{u}_b$  normované odchylky napětí (p.u.)

$\Delta \tilde{P}_{ab}$  ..... normovaná odchylka výkonu (p.u.)

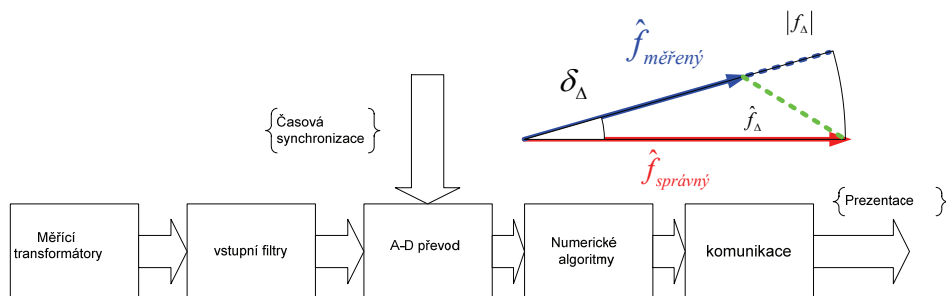
$\Delta \delta$  ..... odchylka úhlu (rad)

Chyba úhlu způsobuje chybu na něm závislého rekonstruovaného výkonu a tím i celkovou bilanci uzlu.



**Obr. 8.4: Chyba rekonstrukce výkonu**

Podstatný vliv na přesnost výsledků má kvalita a přesnost měřicího řetězce. Základní strukturu řetězce znázorňuje obr. 8.5.



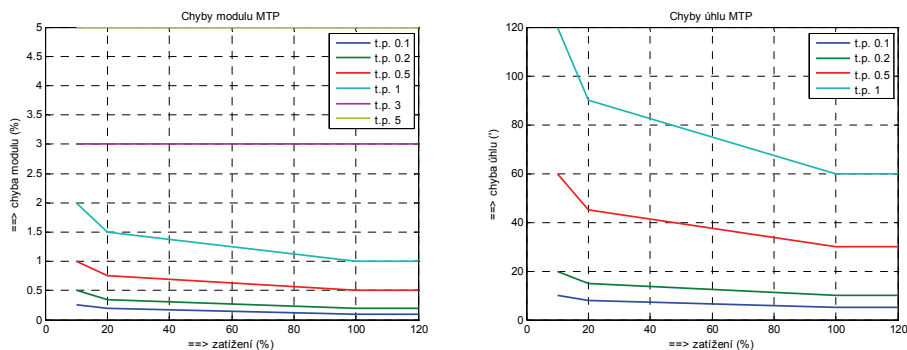
**Obr. 8.5: Struktura měřicího řetězce**

Reálně změřený fázor  $\hat{f}_{\text{měřen}}$  se od správného  $\hat{f}_{\text{správný}}$  liší chybovým fázorem  $\hat{f}_{\Delta}$ . Složky tohoto rozdílu jsou chyba amplitudy  $|f_{\Delta}|$  a chyba úhlu  $\delta_{\Delta}$ . Hodnoty těchto složek pro komponenty řetězce prezentuje tab. 8.1.

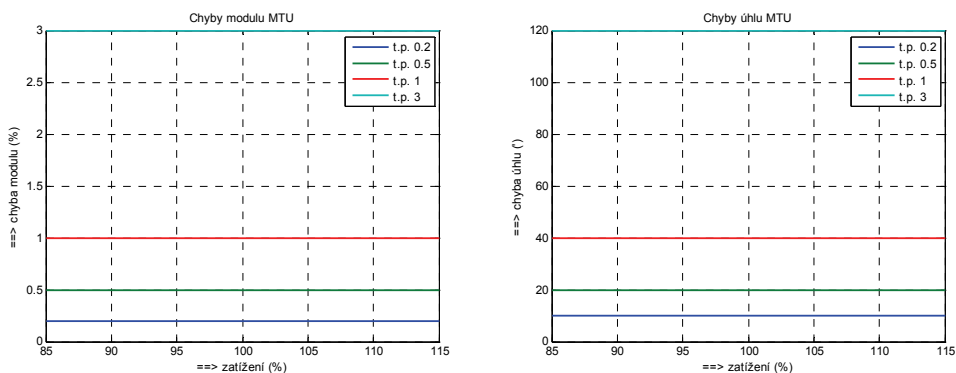
Z důvodu ekonomického využívání komunikačních kanálů se výsledky zpravidla přenášejí na základě plnění podmínek delta kritérií. Tato strategie zavádí nejistotu a nedefinovanost časových chyb.

| $\Delta$ kritérium                                         | popis podmínky                                                                                     |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $ \hat{f} - \hat{f}_0  > \Delta$                           | Modul rozdílu aktuálního fázoru a posledního odeslaného je větší než nastavená mez                 |
| $\left  \sum_i (\hat{f}_i - \hat{f}_0) \right  > \Delta$   | Modul součtu rozdílů aktuálního fázoru a posledního odeslaného je větší než nastavená mez          |
| $\left  \sum_i (\hat{f}_i - \hat{f}_0)^2 \right  > \Delta$ | Modul součtu rozdílů kvadrátů aktuálního fázoru a posledního odeslaného je větší než nastavená mez |

**Tab. 8.1: Změnová (delta) kritéria**



**Obr. 8.6: Chyby měřicích transformátorů proudu**



**Obr. 8.7: Chyby měřicích transformátorů napětí**

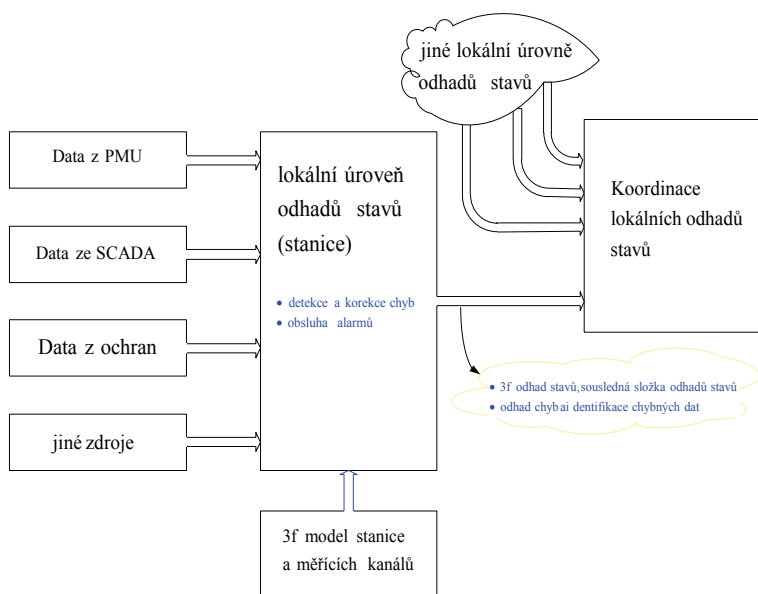
V přechodných stavech fázory ztrácí svou přesnost jak amplitudovou, tak fázovou, což má za následek nemožnost porovnání dvou předcházejících stavů. Někteří výrobci tento jev částečně eliminují vnitřní estimací fázoru. Ke změně měřené frekvence dochází ke každé skokové změně zatížení, proto tyto okamžité frekvence nesou falešnou informaci a jejich analýza vede k chybám.

| Třída aplikací                               | Doporučená přesnost měření                      | Doporučené vzorkování (Hz) |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|
| Monitorování ustáleného stavu                |                                                 | 1-0,1                      |
| Estimace stavu                               | vysoká                                          | 1                          |
| Analýza stability                            | vysoká                                          | 10-25                      |
| Analýza elektromechanických dynamických jevů | střední                                         | 10-25                      |
| Globální chránění                            | střední                                         | 25-50                      |
| Spínací operace                              | střední                                         | 25                         |
| Analýza poruchových stavů                    | vysoká                                          | 25-50                      |
| Analýza elektromagnetických jevů             | fázor není definován v oblasti přechodného jevu | 25-50                      |
| Spektrální analýza                           | vysoká                                          | 25                         |

**Tab. 8.2: Aplikace a požadované přesnosti měření**

### Zvyšování přesnosti

Zvyšování přesnosti měření vyžaduje zavedení dodatečné informace jako jsou: korekční křivky, detailní statické i dynamické modely, zpracovávání měřené informace atd. Z těchto podmínek vychází koncepce „Superkalibrátoru“



**Obr. 8.8: Koncepce superkalibrátoru**

Prostředky potlačení chyb měřicích řetězců:

- eliminace systematických chyb v měřicích řetězcích
- využití měření z PMU a všech dostupných měření
- 3f model stanice a přenosové funkce měřicích kanálů
- synchronní měření a paralelní estimace v jednotlivých lokálních soustavách
- koordinace paralelních výsledků metodikou distribuované estimace

Ve vzorových aplikacích se do měřicího řetězce zařadily softwarové kalibrace, které opravují hodnoty „surového měření“ obsahujícího systematické chyby „na kalibrované měření podle vztahu:

$$m_c = f(m_s, \bar{\mu}) \quad (8.6)$$

$m_c$ ..... hodnota kalibrovaného měření

$m_s$ ..... hodnota surového měření

$\bar{\mu}$  ..... vektor kalibračních parametrů

Měření jsou prováděna třífázově a jsou připravena místa i pro hodnoty napětí nulového bodu a uzemnění. Pokud neexistují, jsou nahrazena pseudoměřením s hodnotou  $0+j0$ . Vektor měřeného napětí k-tého uzlu je uvažován ve tvaru:

$$\hat{U}_k = [\hat{U}_{k,A} \quad \hat{U}_{k,B} \quad \hat{U}_{k,C} \quad \hat{U}_{k,N}]^T \quad (8.7)$$

Pro proud ve větvi mezi uzly k-m platí:

$$\hat{I}_{k-m} = \begin{bmatrix} \hat{I}_{k-m,A} \\ \hat{I}_{k-m,B} \\ \hat{I}_{k-m,C} \end{bmatrix} = [\hat{Y}_{ABC}] \begin{bmatrix} \hat{U}_{k,A} & \hat{U}_{k,B} & \hat{U}_{k,C} & \hat{U}_{m,A} & \hat{U}_{m,B} & \hat{U}_{m,C} \end{bmatrix} \quad (8.8)$$

Pro zdánlivý výkon v uzlu k platí:

$$\hat{S}_{k-m} = \begin{bmatrix} \hat{S}_{k,A} \\ \hat{S}_{k,B} \\ \hat{S}_{k,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{k,A} + jQ_{k,A} \\ P_{k,B} + jQ_{k,B} \\ P_{k,C} + jQ_{k,C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U}_{k,A} & 0 & 0 \\ 0 & \hat{U}_{k,B} & 0 \\ 0 & 0 & \hat{U}_{k,C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_{k,A} \\ \hat{I}_{k,B} \\ \hat{I}_{k,C} \end{bmatrix}^* \quad (8.9)$$

Estimační rovnice se řeší podle povahy měřených veličin jako lineární nebo nelineární hybridní.

#### Výhody koncepce superkalibrátoru:

- Třífázový model lépe popisuje realitu než model jen sousledné složky.
- Umožňuje efektivně detekovat chybná měření
- Zpřesňuje měření kalibrací
- Estimace submodelu je velmi rychlá

S kooperujícími estimacemi komunikuje jen s uzlovými hodnotami napětí a větвовými hodnotami proudů.

### 8.3. Aplikační možnosti synchrofázorových měření

#### 8.3.1. Stabilita provozního stavu

V přenosové soustavě za určitých podmínek může dojít k mimořádným stavům, které mohou vést k nestabilitě a ke kolapsu systému. K osvětlení této problematiky může přispět teorie chaosu a studium chování dynamických systémů. V současné době je již zřejmé, že deterministický přístup neodpovídá již ani jednoduchým zákonům klasické dynamiky. Modelování složitějších systémů od počátku naráží na nesrovnalosti mezi predikovaným a skutečným vývojem, které se obvykle přičítají použití nedokonalého matematického modelu nebo nepřesným numerickým metodám. Ovšem již Henri Poincaré na začátku 20 století analyzoval chování

jednoduchého systému a zjistil, že v případě zjednodušení nelze rozumně matematicky popsat alespoň části jeho stavu a že o předpovědi byt' hrubé, nemůže být ani řeč. Uvedené chování úzce souvisí s teorií stability, jejíž základní kameny položil ruský matematik Ljapunov rovněž na přelomu minulého století, a stal se tak spolu s Poincarém jedním ze zakladatelů teorie dynamických systémů. Její rozvoj se ukázal být velmi náročný a lze říci, že po téměř století výzkumů na tomto poli se vyjasnily především matematické potíže, ovšem obecný aparát, který by je vyřešil, je v nedohlednu.

S prudkým rozvojem a všeobecnou dostupností výpočetní techniky se původně čistě teoretické konstrukce dynamických systémů dostaly do světa numerického modelování. Zvláštní chování dynamických systémů simulované na počítači umožnilo názorně ověřit, že sebevýkonnější počítač nedokáže s dostatečnou přesností simulovat děje, které probíhají v některých (i jednoduchých) soustavách. Paradoxně tak právě počítače dokázaly hranice své použitelnosti. Na základě teorie dynamických systémů pak vznikla teorie chaosu, která se zabývá zejména takovými systémy, jejichž chování je za určitých podmínek nepredikovatelné. Přesto, že se jedná o poměrně novou teorii, její východiska tvoří již zmíněná teorie dynamických systémů, doplněná o některé novější poznatky (např. Whitneyova teorie singularit nebo Andronovova teorie bifurkací), přičemž jejím hlavním přínosem je patrně jasná identifikace stavů, v nichž se systém chová nepředvídatelně (chaoticky). Z určitého hlediska může teorie chaosu ovlivnit i filozofický pohled na svět, neboť ukázala, že velmi jednoduché systémy mohou vykazovat z hlediska poznání prakticky nekonečně složité chování, jinými slovy, že nejenom realita, ale i její zjednodušený model, může být na plné pochopení příliš komplikovaný. Rozvoj nástrojů umožňuje efektivní vyhledávání příznaků provozně rizikových stavů. Důraz se klade zejména na metody predikce ztráty stability a vznik napětových kolapsových stavů.

Úvahy o statické stabilitě přenosu se mohou uplatnit při malých kyvech strojů (tj. při malých změnách zátěžného úhlu). V praxi však existuje mnoho náhlých změn stavu soustavy, při nichž v důsledku nerovnováhy dodávaného a odebíraného výkonu dosahují změny zátěžných úhlů velké hodnoty. Jsou to spínací pochody (např. vypnutí vedení nebo transformátoru), nárazy zatížení a především zkrat. Změna impedance je v těchto případech skoková. Soustava přejde do nového stavu elektromechanickými kmity, protože setrvačnost soustrojí nedovoluje okamžitou změnu provozních veličin (úhlu  $\vartheta$ ). Průběh těchto kmitů může být takový, že se úhel ustálí na nové konstantní hodnotě, ale i takový, že úhel bude neustále narůstat. Druhý případ znamená ztrátu stability.

Skoková změna vazební impedance (ve složité soustavě změna většího počtu vazebních impedancí) způsobuje i skokovou změnu výkonu stroje. Hnací moment (výkon), přiváděný z turbíny na hřídel alternátoru, se nemůže změnit skokem. Příčinou jsou setrvačnost turbosoustrojí a vlastnosti regulačních obvodů turbín. Tyto regulační obvody mají určitou zónu necitlivosti (na změnu otáček reagují až tehdy, když tato změna přesáhne určitou hodnotu).

Okamžitému působení regulátorů otáček brání i hmotnost hnacího média (např. uzávěry vody není možné zavřít okamžitě, protože by došlo k silným mechanickým rázům v přívodních potrubích). Všechny tyto skutečnosti jsou důvodem k tomu, že mechanický příkon alternátorů lze v průběhu krátkého přechodného

elektromechanického jevu považovat za konstantní. Když by však byla doba trvání vyšetřovaného jevu delší (zpravidla nad 1 s), nebyl předpoklad oprávněný.

Vliv regulátorů buzení se v počátečním stadiu přechodného jevu obvykle zanedbává. V rozborech dynamické stability se zpravidla předpokládá určitá konstantní hodnota přechodného elektromotorického napětí  $E'$  alternátorů, zařazeného za přechodnou impedanci  $Z'$ . V dalších stádiích jevu je však potřebný podrobnější přístup při respektování působení regulátorů buzení.

Dalším dosti častým předpokladem při vyšetřování dynamické stability soustavy je znázornění zátěží v soustavě konstantními impedancemi. Tento předpoklad též nemusí být správný, protože při zkratech napětí v síti klesá, čímž se impedance odběrů zpravidla mění.

Při vyšetřování dynamické stability provozu soustavy je častou úlohou zjištění průběhu elektromechanického přechodného jevu, ke kterému dochází po určité změně v soustavě. V tom se cíl řešení liší od výpočtů statické stability, kde se jednalo o úlohu zjistit, zda je provoz v daném stavu soustavy vůbec možný.

## Úvod do teorie dynamických systémů

Za dynamický systém budeme považovat systém, jehož stav lze popsat konečnou množinou stavových proměnných, přičemž okamžitý stav systému plně určuje jeho vývoj (tj. určuje další hodnoty stavových proměnných v každém čase). V teoretické mechanice např. slouží jako stavové proměnné zobecněné souřadnice hybnosti, v termodynamice tlak, teplota a objem, v uzavřené ekonomice produkce, spotřeba a investice, v elektrodynamice proud, napětí atd. Dynamické systémy se běžně vyskytují také v biologii, chemii, hydrodynamice, meteorologii a jejich zkoumání má tedy univerzální platnost. Rovněž elektrizační soustava, která je tvořena zdroji elektrické energie, přenosovou a distribuční částí, včetně odběrů tvoří složitý dynamický systém. Pro analýzu tohoto komplikovaného systému často vystačíme pouze s lineárním modelem. Nicméně lineární model s sebou přináší spousty omezení.

## Teorie chaosu

Krása fyziky bývá často spojována s jejími jednoduchými základními principy i zákony. Průzračnost a formální jednoduchost hamiltonovské mechaniky nebo Maxwellových rovnic budí v každém z nás respekt. Nelineární fyzikální procesy, které se v současnosti intenzivně studují, do této jednoduchosti zdánlivě nezapadají. Typickým příkladem nelineárních procesů je nelineární rezonance. Lze však říci, že teprve v poslední době se podařilo lépe porozumět principu rezonance a obecně i chaosu. Především se ukázalo, že chaotické chování je vlastně i jednoduchým soustavám a rozhodně nevyžaduje velký počet stupňů volnosti, jak se dříve předpokládalo. Není správné chápat statistiku či chaos jen jako základní nástroj tam, kde nejsme schopni řešit deterministické rovnice, vznik chaosu považujeme za jeden ze základních principů.

J. Ford říká: "... po staletí byl chaos považován za užitečného nicméně podřadného občana v deterministickém vesmíru. Ukazuje se však, že determinismus panuje nad konečnou oblastí a vně tohoto řádu leží - z velké části nezmapovaná - obrovská pustina chaosu". Dále se ukazuje, a to je snad ještě zajímavější, že cha-



os lze modelovat pomocí neobyčejně jednoduchých transformací či řešením jednoduchých nelineárních rovnic. Tím se vlastně opět přibližujeme k odvěké snaze vědy hledat v přírodních zákonitostech jednoduchost a eleganci. Je jistě pozoruhodné, že iterační rovnice představující diskrétní dynamické systémy závisující na parametru, mají jisté univerzální vlastnosti. Ty spočívají v tom, že pro určité hodnoty parametrů rovnic nekonvergují postupné iterace k očekávané hodnotě, ale chaoticky oscilují. Tato vlastnost však nezávisí ani na přesnosti numerické analýzy, ale ani na tvaru výchozí rovnice, jev má charakter dynamického stavu rovnováhy a tento stav chápeme nezávisle na fyzikálním obsahu. Na četných příkladech bylo prokázáno, že chaos se může vyskytnout téměř ve všech typech nelineárních systémů se dvěma a více stupni volnosti. Z hlediska matematického je u všech takovýchto systémů po uplynutí dostatečně dlouhé doby jejich chování nepředpověditelné. Historicky byl chaos nejdříve studován v nelineárních hamiltonovských systémech modelujících problémy nebeské mechaniky. Teprve později se přešlo ke studiu chasu v disipativních systémech, tj. systémech, jejichž dynamiku již nelze popsat hamiltoniánem. Dnes víme, že právě chaos hrál v minulosti sluneční soustavy mnohem důležitější úlohu, než jsme soudili ještě v poměrně nedávné době.

## Úvod do teorie nelineárních dynamických systémů

Teorie dynamických systémů (tzv. kvalitativní dynamika) studuje kvalitativní vlastnosti řešení obyčejných diferenciálních rovnic a jejich soustav.

Budeme uvažovat například následující soustavu

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n), i = 1, 2, \dots, n, \quad (8.10)$$

kde  $f_i$  jsou reálné funkce  $n$  reálných proměnných. Tuto soustavu je možné zapsat jako jedinou vektorovou diferenciální rovnici s čtyřmi klasifikacemi trajektorií

Stacionární:

Trajektorie řešení  $x(t) = \varphi(t, x_0) \equiv x_0$  pro všechna  $t \in \mathbb{R}^1$  je jednobodová. Časově neproměnná řešení nazýváme stacionárními řešeními.

Periodické:

Je-li dynamický systém ve stavu, který odpovídá bodu na uzavřené trajektorii ve fázovém prostoru, jeho další chování je periodické.

Kvaziperiodické:

Geometrickým obrazem takového chování je součin  $k$  kružnic, tedy  $k$ -dimenzionální anuloid (torus)  $T^k$ . O asymptotickém chování takového dynamického systému pak hovoříme jako o kvaziperiodickém.

Fyzikálně se interpretují kritické body a uzavřené orbity jako ustálené režimy systému.

Aperiodické:

O chování takovéto trajektorie nelze obecně nic říci.

K určení chování systému a určení příslušné trajektorie používáme následující nástroje nelineární dynamiky.

## Atraktor

Budiž  $\varphi$  tok spojitého dynamického systému daného soustavou. Řešení  $x(t)=\varphi_{x_0}(t)$  nazýváme Ljapunovsky stabilním, jestliže ke každému  $\varepsilon>0$  existuje  $\delta>0$  tak, že pro každé řešení  $y(t)=\varphi_{y_0}(t)$ , pro něž  $\rho(x_0, y_0)<\delta$ , platí  $\rho(x(t), y(t))<\varepsilon$  pro všechna  $t \geq 0$ ,  $\rho(x,y)$  je euklidovská metrika v  $\mathbb{R}^n$ . Řešení  $x(t)$  nazýváme asymptoticky stabilním, je-li Ljapunovsky stabilní a dále platí  $\lim_{t \rightarrow \infty} \rho(x(t), y(t)) = 0$ .

K popsání situace, kdy řešení  $x(t)$  není asymptoticky stabilní (neplatí výše popsaná limita), i když všechny trajektorie, které procházejí blízko k trajektorii  $\gamma(x_0)$  dané soustavy, se k ní neomezeně blíží, zavádíme pojem orbitální stability.

Věnujme pozornost invariantní množině toku  $\varphi$ , s níž je spojena definice atraktoru systému. Mějme danu soustavu a nechť  $\varphi$  je její tok. Invariantní množinou toku  $\varphi$ , resp. invariantní množinou soustavy je množina  $M \subset \mathbb{R}^n$ , pro kterou platí  $\varphi^t(M)=M$  pro všechna  $t \in \mathbb{R}$ . Je-li  $M$  invariantní množinou soustavy, pak každá trajektorie, která prochází bodem  $x \in M$ , leží celá v  $M$ . Invariantní množiny mohou mít obecně tutéž dimenzi jako fázový prostor. Nejjednoduššími invariantními množinami jsou rovnovážné stavy a uzavřené trajektorie.

Mějme danu uzavřenou invariantní množinu  $A$ . Množinu  $A$  nazveme atraktorem, jestliže existuje otevřená množina  $U \supset A$  taková, že pro každý bod  $x \in U$  platí  $\rho(\varphi_x(t), A) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0$ . Množinu  $U$  nazveme oblastí přitažlivosti atraktoru  $A$ . Pro atraktory

typu bod, uzavřená křivka a anuloid, je příznačné, že systémy s těmito atraktory nejsou citlivé na počáteční podmínky. Změníme-li jen velmi málo počáteční podmínky řešení systému s uvedenými atraktory, změní se jen velmi málo nalezené řešení. Avšak již při numerických experimentech s velice populárním systémem Lorenzových rovnic se setkáme s atraktorem, který vykazuje citlivou závislost na počátečních podmínkách. Jednou z možných cest charakterizace takového atraktoru vytvářejí Ljapunovovy exponenty, pomocí nichž lze definovat vnitřní nestabilní (chaotickou) množinu.

## Ljapunovovy exponenty

Tyto exponenty vyjadřují asymptotické chování trajektorií, které leží v blízkosti sledované trajektorie. Analýzou systému s fázovým (stavovým) prostorem zjistíme, že podle Ljapunovových exponentů mohou nastat následující případy chování systému:

Rovnovážný bod,  $\lambda_i < 0$ , pro  $i=1, \dots, n$

Periodické řešení,  $\lambda_1=0$ ,  $\lambda_i < 0$ , pro  $i=2, \dots, n$

Quasi-periodické řešení, (torus dva)  $\lambda_1=0$ ,  $\lambda_2=0$ ,  $\lambda_i < 0$ , pro  $i=3, \dots, n$

K-torus,  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots \lambda_k = 0$ ,  $\lambda_i < 0$  pro  $i=k+1, \dots, n$

Chaotické řešení má nejméně jeden pozitivní  $\lambda_i$

## Poincarého zobrazení

Jde o analýzu systému v diskrétním čase založené na principu rovinných řezů jednotlivých trajektorií řešení.

Jestliže řez  $\Sigma$ , na němž je definováno Poincarého zobrazení, je více jak dvojdimenzionální, nelze již trajektorie zobrazení dobře geometricky znázornit. Tehdy je výhodné do roviny vynášet  $i$ -tou souřadnici bodu  $P^{k+1}(x_0) \in \Sigma$  oproti  $i$ -té souřadnici bodu  $P^k(x_0) \in \Sigma$ . Tak dostaneme závislost typu  $x_{n+1}=f(x_0)$ ,  $k=0, 1, 2, \dots$ , z níž se pak snažíme vyvozovat vlastnosti „celého“ zobrazení  $P$ .

## Výkonová spektra

Pokud pozorovaný děj neumožňuje přímé ověření citlivosti závislosti na počátečních podmínkách, je možné provést spektrální analýzu. Ze spektrální analýzy a z charakteru spektra lze usoudit, zda je daná časová řada periodická, kvaziperiodická či stochastická. Periodický děj s periodou  $T$  obsahuje ve spektru periodickou složku na frekvenci  $f = 1/T$  a jejích násobcích. Hladina šumu je nulová nebo velice malá. Spektrum kvaziperiodické funkce je tvořené diskrétními píky pro hodnoty frekvencí  $f_1, f_2, \dots, f_k$  a jejich lineární kombinace s celočíselnými koeficienty. Stochastický děj (chaotické chování trajektorie a tedy řady  $\{x_k\}$ ) je charakterizováno několika širokými píky na pozadí spojitého spektra, což indikuje přítomnost podivného atraktoru.

Pro vyšetřování stability přijmeme model systému s více stroji.

Celý systém se může popsat soustavou rovnic následovně:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x, y, u, t) \\ h(x, y, u, t) \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

Kde  $t$  představuje čas,  $y$  vektor algebraických proměnných,  $u$  vektor systémových parametrů  $x$  vektor stavových proměnných. Propojený vícestrojový systém popíšeme následovně.

$$\begin{bmatrix} [I'_g \omega \delta] \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f([I'_g \omega \delta], [U'_g], [E_{fd} \quad T_m] t) \\ h([I'_g \omega \delta], [U'_g], [E_{fd} \quad T_m] t) \end{bmatrix} \quad (8.12)$$

kde  $[I'_g \omega \delta]$  je  $[I'_g \omega \delta] = [\dots \quad i_{0k} \quad i_{dk} \quad i_{qk} \quad i_{fk} \quad i_{Dk} \quad i_{Qk} \quad \omega_k \quad \delta_k \quad \dots]^T$

a  $[U'_g] = [\dots \quad u_{dk} \quad u_{qk} \quad \dots]$   $k = 1 \dots n$  reprezentuje napěťové vektory

Admitanční matice propojeného systému:

$$[\mathbf{Y}_{\text{RED}}] = \begin{bmatrix} g_{11} + jb_{11} & & \\ & \dots & \\ & & g_{gg} + jb_{gg} \end{bmatrix}, \quad (8.13)$$

$$[\mathbf{Z}_{\text{RED}}] = \begin{bmatrix} r_{11} + jx_{11} & & \\ & \dots & \\ & & r_{gg} + jx_{gg} \end{bmatrix} \quad (8.14)$$

Matice  $[\mathbf{M}] = [\mathbf{T}^*][\mathbf{Y}_{\text{RED}}][\mathbf{T}]$  případně  $[\mathbf{M}]^{-1} = [\mathbf{T}^*][\mathbf{Z}_{\text{RED}}][\mathbf{T}]$  vyjadřuje propojený systém respektující úhlové změny  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$  os strojů  $q_1, q_2, \dots, q_n$  směrem k referenční Q ose, napětí stroje můžeme vyjádřit jako

$$[\mathbf{U}'_g] = [\mathbf{T}^*][\mathbf{Z}_{\text{RED}}][\mathbf{T}][\mathbf{I}'_g] = [\mathbf{M}]^{-1} \cdot [\mathbf{I}'_g] \quad (8.15)$$

Po převedení maticové rovnice do dq složek obdržíme následující vztah

$$\begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \\ u_{d2} \\ u_{q2} \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & x_{11} & r_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) - x_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) & r_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) + x_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) \\ -x_{11} & r_{11} & -r_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) - x_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) & r_{12} \cos(\theta_2 - \theta_1) - x_{12} \sin(\theta_2 - \theta_1) \\ & & & \\ & & & \\ & & & \\ \dots & & & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \\ i_{d2} \\ i_{q2} \\ \dots \end{bmatrix}$$

Po substitucích můžeme psát

$$\begin{aligned} [\dot{\mathbf{I}}'_g \omega \delta] &= \mathbf{f}([\mathbf{I}'_g \omega \delta], h_U^{-1}([\mathbf{I}'_g \omega \delta], t), [\mathbf{E}_{fd} \quad \mathbf{T}_m], t) = \\ &= \mathbf{f}'([\mathbf{I}'_g \omega \delta], [\mathbf{E}_{fd} \quad \mathbf{T}_m], t) \end{aligned} \quad (8.16)$$

A přijmeme-li invariantní čas, je možno vyjádřit

$$\mathbf{f}'([\mathbf{I}'_g \omega \delta], [\mathbf{E}_{fd} \quad \mathbf{T}_m], t) = \mathbf{f}'([\mathbf{I}'_g \omega \delta]) \quad (8.17)$$

Funkce  $\mathbf{f}'$  vyjadřuje n-strojový systém.

Na základě těchto rovnic můžeme studovat stavy systému, statickou i dynamickou stabilitu a napěťové kolapsy.

Pro výpočet je ovšem nutno přijmout sofistikované numerické metody.

## Stabilita lineárního systému

Jak bylo výše uvedeno, pro kritérium stability lineárního systému platí následující:

$$\operatorname{Re}[\lambda_i] < 0, i = 1 \dots n \quad (8.18)$$

kde  $\lambda_i, i = 1 \dots n$  jsou vlastní čísla matice systému  $\mathbf{A}$ .

## Linearizace nelineárního systému

Závisí na analyzované oblasti. Nelineární systémová kritéria mají několik formulací. Předpokládá se nelineární autonomní dynamický systém  $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t))$  ve tvaru

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ \dots \\ f_n(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (8.19)$$

V případech systémové rovnováhy  $\mathbf{f}(\mathbf{x}^*) = 0$ , nelineární problematika stability může být linearizována prostřednictvím Jakobiho matice.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dots \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1(\mathbf{x})}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n(\mathbf{x})}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n(\mathbf{x})}{\partial x_n} \end{bmatrix}_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} \begin{bmatrix} x_1 - x_1^* \\ \dots \\ x_n - x_n^* \end{bmatrix} \quad (8.20)$$

Předchozí tvar může být zapsán následovně:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \Delta \dot{\mathbf{x}}(t) = [\mathbf{J}]_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} \cdot \Delta \mathbf{x}(t) \quad (8.21)$$

kde matice  $[\mathbf{J}]_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*}$  vyjadřuje stabilitu v daném bodě.

Uvedená metoda má pouze lokální charakter, lze asymptoticky určit stabilitu nelineárního systému pouze v okolí vyšetřovaného bodu.

## Přímá Ljapunovova metoda

Pro globální analýzu stability nelineárního autonomního systému je možné použít tuto metodu. Tato metoda je založena na myšlence nalezení vhodné Ljapunovovy funkce  $V(\mathbf{x}) = V(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , která splňuje následující předpoklady.

Derivace  $V(\mathbf{x})$  podle času jsou dány jako

$$\frac{dV(\mathbf{x})}{dt} = \frac{\partial V(\mathbf{x})}{\partial x_1} \cdot \frac{dx_1}{dt} + \dots + \frac{\partial V(\mathbf{x})}{\partial x_n} \cdot \frac{dx_n}{dt} = \frac{\partial V(\mathbf{x})}{\partial x_1} \cdot f_1(\mathbf{x}) + \dots + \frac{\partial V(\mathbf{x})}{\partial x_n} \cdot f_n(\mathbf{x})$$

Nechť je dán dynamický systém  $\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t))$ ,  $\dot{\mathbf{x}}(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ .

Uvažovaný systém je stabilní, jestliže existuje taková funkce  $V(\mathbf{x})$ , která

- a)  $V(\mathbf{0}) = 0$
- b)  $V(\mathbf{x}) > 0, \mathbf{x} \neq \mathbf{0}$
- c)  $V(\mathbf{x})$  parciální derivace jsou spojité
- d)  $\frac{dV(\mathbf{x})}{dt} \leq 0$
- e) pokud  $\|\mathbf{x}\| \rightarrow \infty$ , pak  $V(\mathbf{x}) \rightarrow \infty$

Pokud předpokládáme asymptoticky stabilní systém, potom pro d) platí  $\frac{dV(\mathbf{x})}{dt} < 0$ .

Analýza vlastních čísel je založena na základě linearizace nelineárního systému v určeném bodě. Hranice stability je množina bodů bifurkačního systému. Pro hledání hranic lze použít řady metod. Obecně jsou přijímány dva druhy bifurkací:

- Saddle Node Bifurcation (SNB)
- Hopf Bifurcation (HB)

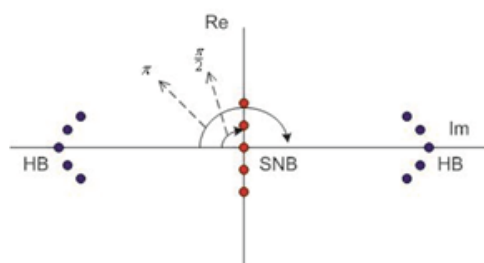
Obvykle používáme dva indikátory pro určení stability systému.

- Dynamic Stability Indicator ( $DSI_1$ )

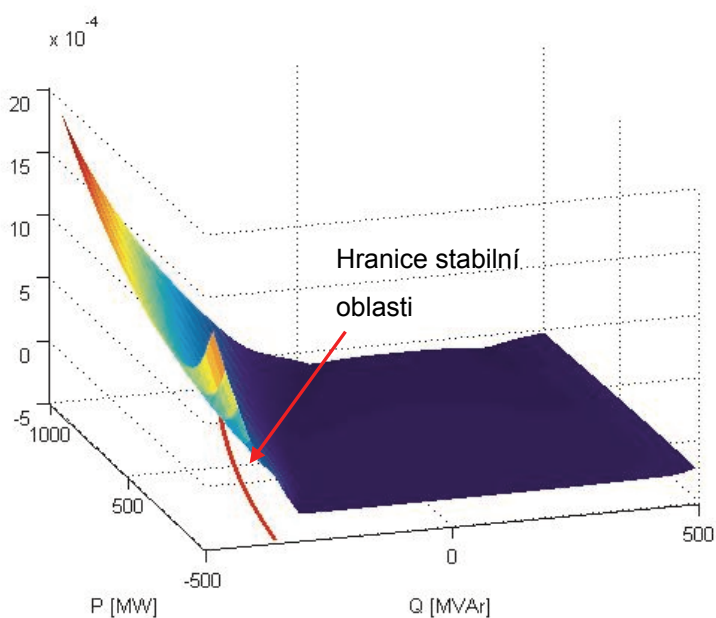
$$DSI_1 = \max[\operatorname{Re}[\lambda]] \quad (8.22)$$

- complex plane angular criterion ( $DSI_2$ ).

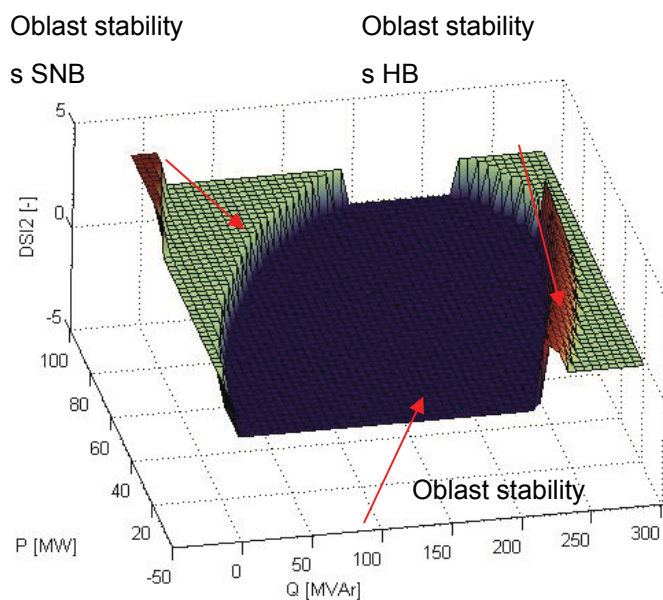
$$DSI_2 = \max[\operatorname{Angle}[j\lambda]] = \max\left[\arctg\left(\frac{\operatorname{Re}[\lambda]}{\operatorname{Im}[\lambda]}\right)\right] \quad (8.23)$$



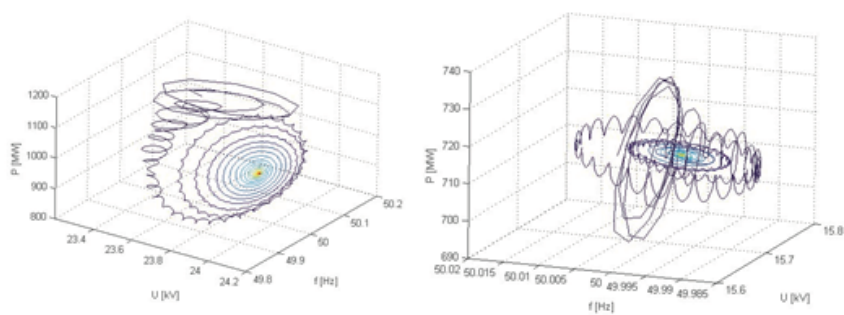
**Obr. 8.9: Identifikace typu bifurkací užitím DSI2**



**Obr. 8.10: Příklad použití indikátorů stability DSI1 na generátoru**

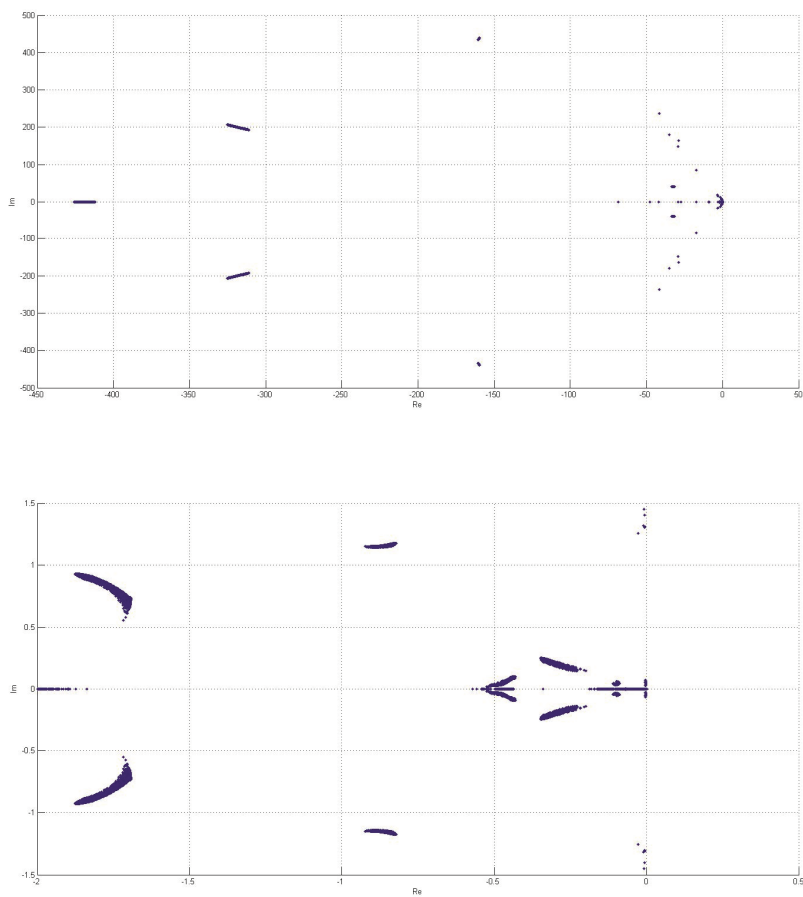


**Obr. 8.11: Příklad použití identifikace typů bifurkací podle indikátoru stability**

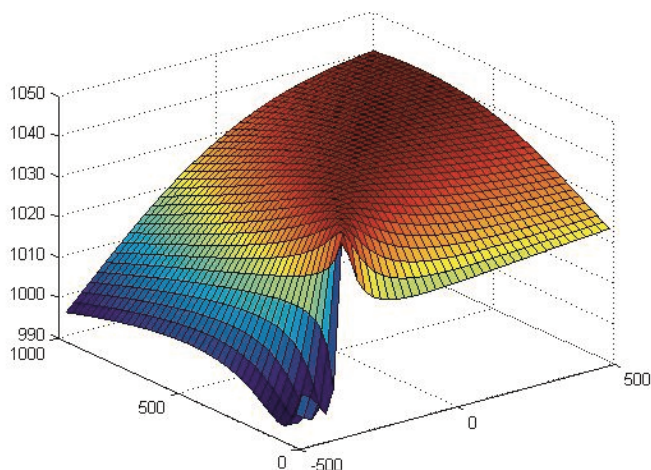


**Obr. 8.12: Ukázka traktorů dynamického systému v 3D**



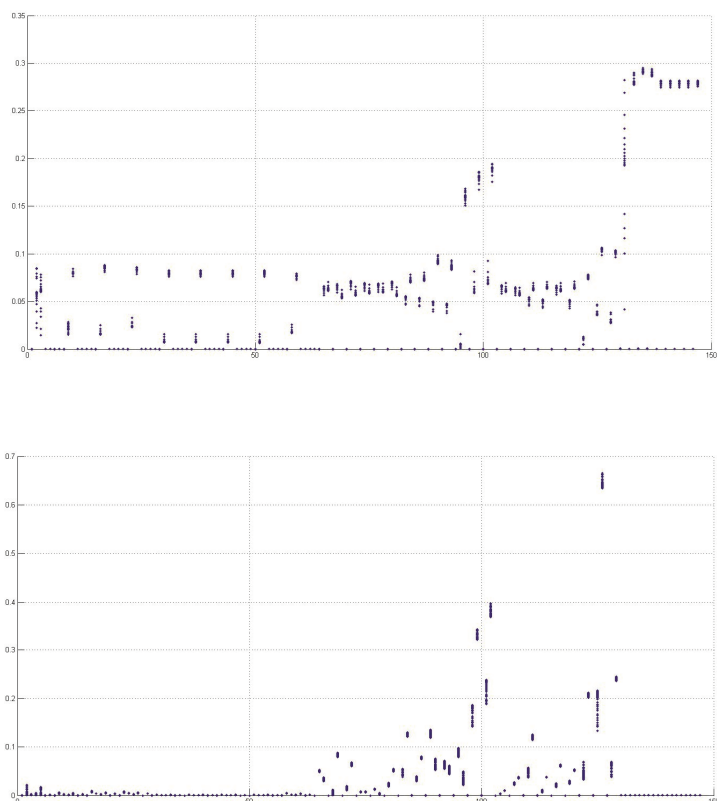


**Obr. 8.13: Systém vlastních čísel generátoru a jejich detail pro různé provozní stavy**



**Obr. 8.14: Příklad použití metody SVD: Maximální singulární číslo stavové matice pro různé provozní stavy**

K praktickému využití teorie chaosu přispívají synchronně měřené hodnoty (časové průběhy nebo fázory), které se následně vkládají do modelu. Model musí být vždy aktuální (konfigurace, stavy prvků). Pro zpřesnění výsledků je možné nahradit linearizaci v bodě Ljapunovovou funkcí. Model je možné redukovat využitím dynamických ekvivalentů. Kolapsové stavy v PS mohou nastat zejména přetížením linek a odpínáním a skutečné ztráty stability se mohou pozorovat až ve stádiu rozpadu. Metodu vlastních čísel lze použít k vyšetřování lokálních nestabilit (prokluzu generátorů), možno využít Takensovu větu o rekonstrukci atraktoru a ekvivalentní modely. Tím vznikne struktura s redundancí. Klasický výpočet vlastních čísel řeší pomalé děje (tzn. lze detekovat přiblížení k hranici stability) a metoda SVD (Singular Value Decomposition) podchycuje příznaky. Při zjišťování oscilací je velmi složité se vyvarovat fantomových jevů nemajících základ ve fyzice procesu, ale v numerickém zpracování veličin, například při nevhodné volbě základního intervalu při transformacích.



**Obr. 8.15: Příklad použití metody SVD – Singulární vektory odpovídající maximálnímu singulárnímu číslu stavové matice pro různé provozní stavy**

### 8.3.2. Takensova věta o rekonstrukci atraktoru

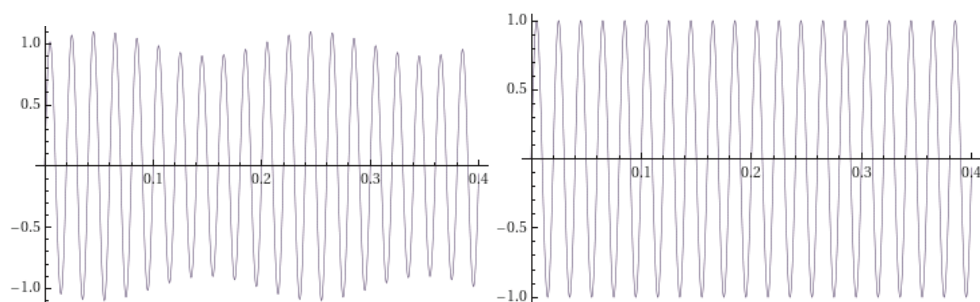
Určitý úsek přenosové soustavy podobně jako jiné elektrické systémy lze za jistých zjednodušujících předpokladů (např. uvažujeme soustředěné, nikoliv rozložené parametry) popsat modelem ve tvaru soustavy obyčejných diferenciálních rovnic. Až na výjimečně jednoduché systémy, jsou tyto rovnice nelineární, což přináší jevy jako bifurkace zdvojení periody vedoucí na subharmonické oscilace, kvaziperiodické oscilace a vznik deterministického chaosu. Z praktického pohledu je velice důležitá otázka, jestli lze tyto jevy spolehlivě experimentálně detekovat. Kladnou odpověď na tuto otázku dává věta o rekonstrukci atraktoru od holandského matematika Florise Takense z roku 1981. Její formulace a důkaz byly původně součástí diskuze o interpretaci experimentu s Taylorovým tokem. Jedná se o tok kapaliny mezi dvěma souosými válci, které se otáčejí různou úhlovou rychlostí. Při růstu tohoto rozdílu přechází proudění od laminárního přes posloupanost bifurkací do chaotického a turbulentního. Landau a Lifschitz navrhli vysvětlení pomocí nekonečné řady Hopfových bifurkací, kdy při každé takové bifurkaci přibude jedna další frekvence oscilací. Takens a další naopak vyslovili domněnku, že torus vzniklý

Hopfovými bifurkacemi ztratí stabilitu již po malém počtu těchto bifurkací. Věta o rekonstrukci atraktoru umožnila spolehlivé vyhodnocení experimentálních dat, které potvrdilo tuto domněnku. Takensova věta o rekonstrukci atraktoru vychází z této situace. Nechť existuje kompaktní varieta  $M$  dimenze  $m$ . Příkladem jednodimenzionální variety je úsečka nebo kružnice, příkladem dvoudimenzionální variety je sféra nebo torus (povrch duše pneumatiky). Složitě dynamické chování vyžaduje dimenzi alespoň 3.

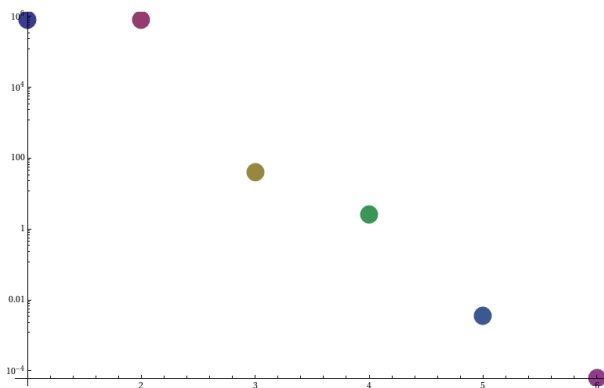
Na této varietě uvažujeme dynamický systém, jehož vývoj za určitý pevný časový interval lze popsat zobrazením  $M$ . O tomto zobrazení předpokládáme, že je to hladký difeomorfismus. Difeomorfismus znamená, že toto zobrazení je vzájemně jednoznačné a hladké a totéž platí o zobrazení k němu inverzním. Hladké zde znamená, že má derivace do řádu 2. Experimentální měření na takovémto dynamickém systému může být skalární nebo vektorové. Skalární znamená, že v každém časovém okamžiku měříme jednu reálnou veličinu. Při vektorovém měření je výsledkem každého měření jistý vektor reálných čísel. Skalární měření je velká redukce informace, znamená např. že v elektrickém obvodu s třiceti uzly měříme napětí pouze v jediném z nich. Přesto Takensova věta zaručuje, že z takového měření lze rekonstruovat atraktor a určit jeho důležité topologické invarianty. Uvažujme tedy jistou reálnou funkci  $y$ , která každému bodu variety  $M$ , tedy každému stavu dynamického systému přiřadí jisté reálné číslo jako výsledek měření.

Takensova věta o rekonstrukci atraktoru pak říká, že je generickou vlastností, že zobrazení je vložení (ang. embedding) a takto zrekonstruovaný atraktor má stejné topologické invarianty jako původní atraktor, zejména kapacitní dimenzi (ang. Box counting dimension). Samozřejmě se touto rekonstrukcí nezachovávají všechny vlastnosti atraktoru.

Příklad využití Takensovy věty: V systému je měřeno napětí v jednom bodě. V případě přechodného jevu je pomocí metody SVD indikován torus. Systém vykazuje několik vlastních čísel. V případě bezporuchového stavu je indikováno harmonické chování, metody SVD ukazuje pouze dvě vlastní čísla charakterizující atraktor. Při práci s modelem jsou vlastní čísla získávána z modelu, v reálné situaci jsou vlastní čísla získávána měřením. Tento princip je možné využít v lokálních automatikách.



**Obr. 8.16: Průběh  $u(t)$  – přechodný stav      ustálený stav**



Obr. 8.17: Vlastní čísla systému – přechodný stav

### 8.3.3. Monitoring oscilací

Oscilace v systému mohou vzniknout elektromechanickými přechodnými ději, kdy se v systému objeví subharmonické kmity, které vyvolávají kolísání činného i jalového výkonu. Indikace těchto jevů lze provést pomocí PMU s poměrně komplikovanou úpravou signálu. Stejných výsledků lze dosáhnout z časových průběhů pomocí Hilbertovy transformace. Důležité jsou ovšem časové synchronizace. V současných aplikacích se příčiny lokalizují zpětně – systém je využíván zejména pro analýzu. Analyzují se kyvy a jejich tendence (nárůst, tlumení). Globální příčinu lze dohledat pouze mezinárodní spoluprací.

#### Vstupy

- Napětí nebo proud (amplituda, úhel) s vzorkováním každých 100 ms nebo rychleji
- Úrovně varování a alarmů pro útlum (upozornění a nouze)

#### Výstupy

- Parametry (amplituda, útlum, frekvence) dominantního oscilačního módu
- Útlum a frekvence ostatních módů
- Alarmy, podkročení mezí útlumu

#### Cíle a přínosy

Krátkodobé:

- Okamžité informace o kmitavosti přenosové sítě
- Indikace oscilací frekvence, možnost posouzení interní či externí příčiny oscilací

Dlouhodobé:

- Možnost vést dlouhodobé statistiky a jejich vyhodnocování
- Zlepšuje stabilitu, bezpečnost a spolehlivost sítě
- Redukuje náklady a přináší větší funkcionalitu z ochran a řídicích systémů
- Umožňuje bezpečně provozovat síť blíže k projektovaným limitům

### 8.3.4. Možnosti určování matice popisující vedení, estimace parametrů vedení

Určování matice popisující vedení, vliv na výkony

$$\text{Bud' te\text{z}} \quad \vec{X} = \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_3 \\ k \cdot \hat{I}_1 \\ k \cdot \hat{I}_2 \\ k \cdot \hat{I}_3 \end{pmatrix}_{\text{VSTUP}} \quad a \quad \vec{Y} = \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \\ \hat{U}_3 \\ k \cdot \hat{I}_1 \\ k \cdot \hat{I}_2 \\ k \cdot \hat{I}_3 \end{pmatrix}_{\text{VYSTUP}} \quad (8.24)$$

vektory fázorů napětí (s vahou 1) a proudů (s vahou  $k \in \mathbb{R}^1, k \neq 0$ ) na vstupu a výstupu vedení. Označení konců vedení „vstup a výstup“ je pochopitelně volitelné.

Uvažování smysluplné existence fázorů vyžaduje linearitu příslušného obvodu. Z teorie lineárních obvodů pak můžeme psát (klasická teorie obvodů uvažuje  $k=1$ , nicméně zobecnění pro  $k \in \mathbb{R}^1, k \neq 0$  je elementární):

$$\vec{Y} = \mathbf{H} \cdot \vec{X}, \text{ kde } \mathbf{H} = (h_{i,j}), i, j = 1, 2, \dots, 6 \text{ je matice popisující vedení.}$$

Uvažme, že máme k dispozici  $n$  dvojic odpovídajících si vektorů  $\vec{X}_i$  a  $\vec{Y}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n-1, n$ .

Nalézt matici  $\mathbf{H}$  znamená najít matici takovou, pro kterou je úhrnná kvadratická odchylka  $\sum_{i=1}^n \left[ (\vec{Y}_i - \mathbf{H} \cdot \vec{X}_i) \cdot (\vec{Y}_i - \mathbf{H} \cdot \vec{X}_i)^* \right]$  minimální (tečka znamená skalární součin vektorů a hvězdička komplexní sdružení). Vektory uvažujeme zatížené náhodnou chybou.

Simulujeme-li měření fázorů zatížené chybou, můžeme vyhodnotit odchylku matice  $\bar{\mathbf{H}}$  od správné matice  $\mathbf{H}$ . V grafech značíme  $Abs[\delta\mathbf{H}] = \frac{\text{norm}(\mathbf{H}-\bar{\mathbf{H}})}{\text{norm}(\mathbf{H})}$ , kde

funkce norm je definována vztahem  $\text{norm}(\mathbf{m}) = \sqrt{\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^6 m_{i,j} \cdot m_{i,j}^*}$ . Dále je zob-

razena relativní chyba určení prvku  $h_{1,1}$  (v grafech značena  $Abs[\delta H_{1,1}]$ )

a maximální relativní chyba prvku matice  $\text{Max}[Abs[H_{i,j}]] = \max_{i,j=1..6} \left( \frac{(\bar{\mathbf{H}} - \mathbf{H})_{i,j}}{\mathbf{H}_{i,j}} \right)$ .

Pro posouzení vlivu chyby určení matice  $\mathbf{H}$  také uvádíme přesnost určení ztrát na vedení a jalového výkonu vedení – pro jednu dvojici (přesných) vstupů jsou vypočteny výstupy pomocí matice  $\bar{\mathbf{H}}$ , určeny výkony na vstupu i výstupu a vyčíslena jejich relativní chyba v závislosti na počtu dvojic vektorů použitých k určení matice  $\bar{\mathbf{H}}$ . Pro

$$\bar{\mathbf{X}} = \begin{pmatrix} \hat{U}_{1,1} \\ \hat{U}_{1,2} \\ \hat{U}_{1,3} \\ \hat{I}_{1,1} \\ \hat{I}_{1,2} \\ \hat{I}_{1,3} \end{pmatrix}_{\text{VSTUP}} \quad a \quad \bar{\mathbf{Y}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \hat{I}_{2,1} \\ \hat{I}_{2,2} \\ \hat{I}_{2,3} \end{pmatrix}_{\text{VYSTUP}} \quad \text{platí} \quad \bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{H} \cdot \bar{\mathbf{X}} \quad (8.25)$$

Pro zadané hodnoty  $\hat{U}_{1,1}, \hat{U}_{1,2}, \hat{U}_{1,3}$  tvoří vektorová rovnice  $\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{H} \cdot \bar{\mathbf{X}}$  šest rovnic pro šest neznámých proudů. Vyřešíme-li rovnici pro proudy  $\hat{I}_{1,1}, \hat{I}_{1,2}, \hat{I}_{1,3}$  s eliminací proudů  $\hat{I}_{2,1}, \hat{I}_{2,2}, \hat{I}_{2,3}$ , získáme po elementárních úpravách lineární závislost  $\bar{\mathbf{U}}_1 = \mathbf{Z} \cdot \bar{\mathbf{I}}_1$ , kde  $\mathbf{Z}$  je matice se třemi řádky a třemi sloupci.

Bud'tež:

$$\vec{X} = \begin{pmatrix} \hat{U}_{1,1} \\ \hat{U}_{1,2} \\ \hat{U}_{1,3} \\ \hat{I}_{1,1} \\ \hat{I}_{1,2} \\ \hat{I}_{1,3} \end{pmatrix}_{\text{VSTUP}} \quad \text{a} \quad \vec{Y} = \begin{pmatrix} \hat{U}_{2,1} \\ \hat{U}_{2,2} \\ \hat{U}_{2,3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}_{\text{VYSTUP}} \quad \text{a platí} \quad \vec{Y} = \mathbf{H} \cdot \vec{X} \quad (8.26)$$

Pro zadané hodnoty  $\hat{U}_{1,1}, \hat{U}_{1,2}, \hat{U}_{1,3}$  tvoří vektorová rovnice  $\vec{Y} = \mathbf{H} \cdot \vec{X}$  šest rovnic pro tři neznámá napětí a tři neznámé proudy. Vyřešíme-li rovnici pro proudy  $\hat{I}_{1,1}, \hat{I}_{1,2}, \hat{I}_{1,3}$  s eliminací napětí  $\hat{U}_{2,1}, \hat{U}_{2,2}, \hat{U}_{2,3}$ , získáme po elementárních úpravách lineární závislost  $\vec{I}_1 = \mathbf{Y} \cdot \vec{U}_1$ , kde  $\mathbf{Y}$  je matice se třemi řádky a třemi sloupci.

Pro použitelné prvky přenosové soustavy je  $\mathbf{H}$  matice regulární a určuje tedy dvojici matic  $\mathbf{Z}$  a  $\mathbf{Y}$  jednoznačně.

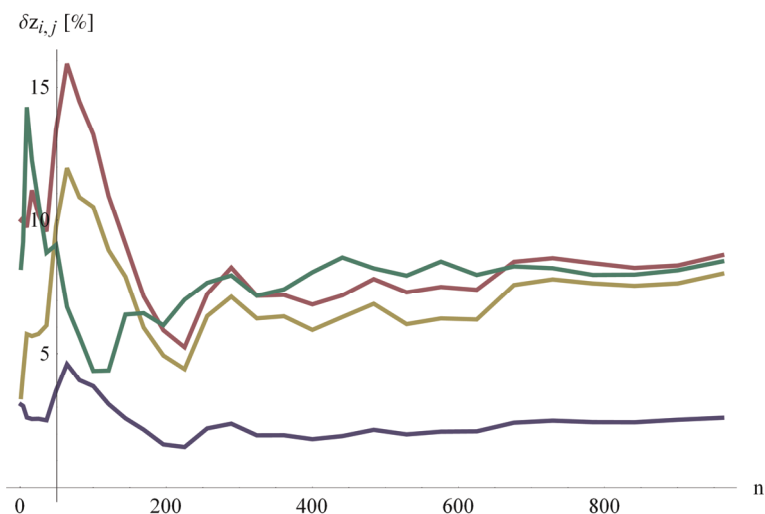
Poznamenejme na okraj, že takto zavedené  $\mathbf{Z}$  a  $\mathbf{Y}$  matice nejsou totožné se zavedením impedanční a admitanční matice obvyklé v obecné teorii obvodů, které by v úplném popisu byly v uvažovaném případě maticemi se šesti řádky a šesti sloupci.

Nalezení metody určování  $\mathbf{Z}$  a  $\mathbf{Y}$  matice přímo z měření je možné jednoduchou modifikací metody určování  $\mathbf{H}$  matice; vzhledem k jejich jednoznačnému určení je možné i jejich získání z nalezené  $\mathbf{H}$  matice.

### Ukázky určování $\mathbf{Z}$ a $\mathbf{Y}$ matic

Při modelování nepřesností zjištění matic  $\mathbf{Z}$  a  $\mathbf{Y}$  z naměřených souborů fázorů zatížených náhodnou chybou podle výše uvedeného, považujeme tyto matice za správné hodnoty a vyhodnocujeme velikost relativní odchylky prvků matice jako funkci počtu použitých vektorů  $\vec{X}$  a  $\vec{Y}$ . Pospojování vypočtených odchylek je v grafech provedeno pro lepší rozlišení, kterého prvku matice se příslušná odchylka týká.





**Obr. 8.18: Modrá čára popisuje relativní chybu určení diagonálního prvku matice  $Z$  (zde, nicméně ostatní diagonální prvky vykazují odchylky v podstatě stejných hodnot) a ostatní čáry odpovídají mimodiagonálním prvkům (z důvodu symetrie matice  $Z$  postačí tři průběhy)**

Chyba určení prvků admitanční matice v uvažovaných situacích (zejména mimodiagonálních prvků) je extrémně vysoká proto, že provozní proudy tekoucí vedením jsou o několik řádů vyšší, než kapacitní a svodové proudy mezi vodiči. V případě měření těchto parametrů je nutno pro vyšší přesnost nevycházet z běžných provozních stavů, ale z uměle navozeného stavu s jedním koncem vedení naprázdno. I v tomto případě však při použití měřicích prvků dimenzovaných na velikost proudů provozních stavů nebude přesnost výsledků vysoká.

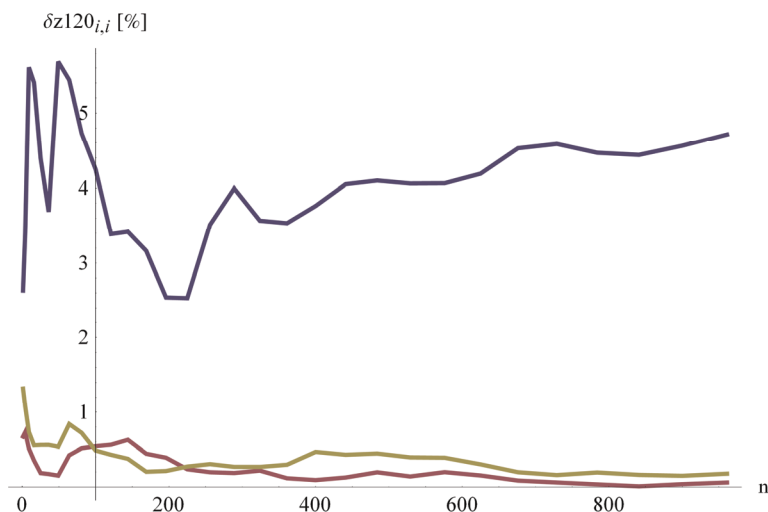
### Ukázky určování $Z$ matice ve složkovém vyjádření

Budiž matice  $F$  definována obvyklým způsobem:

$$F = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{pmatrix}, \text{ kde } a = e^{\frac{2\pi \cdot j}{3}} \text{ a uvažujeme } \vec{U}_{a,b,c} = \begin{pmatrix} \vec{U}_a \\ \vec{U}_b \\ \vec{U}_c \end{pmatrix}$$

$$\vec{U}_{1,2,0} = \begin{pmatrix} \vec{U}_1 \\ \vec{U}_2 \\ \vec{U}_0 \end{pmatrix} \text{ a také } \vec{U}_{a,b,c} = F \cdot \vec{U}_{1,2,0} \quad (8.27)$$

pak elementární úpravou obdržíme  $\mathbf{Z}_{1,2,0} = \mathbf{F}^{-1} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{F}$ .



**Obr. 8.19: Odchyly diagonálních prvků matice**

Nejpřesněji je určena sousledná impedance, neboť provozní stavy jsou poměrně symetrické, poněkud větší chyba zpětné odpovídá opět míře vyskytující se nesymetrie. Nulová složka je určena nejméně přesně, neboť příslušné proudy jsou oproti zbylým složkám malá.

### 8.3.5. Měření a stavové veličiny

#### Vektor stavových veličin

Vektor stavových veličin je minimální množina nezávislých veličin, jejichž znalost umožňuje výpočet všech ostatních veličin modelu soustavy. Pro modely elektrické sítě popsané metodou uzlových napětí je základním stavovým vektorem vektor komplexních uzlových napětí v kartézském nebo polárním tvaru.

Pro vyjadřování v systémech s měřením úhlu (PMU) je vhodný polární tvar. Uspořádání stavového vektoru pro polární tvar a systém s  $N_u+1$  uzly ukazuje rovnice (8.28). Uzel s indexem 0 je zde označen jako referenční uzel pro měření úhlů. Úhly vektoru  $\delta_i$  jsou pak určeny rozdílem vlastního úhlu uzlu a úhlu referenčního uzlu.

$$\bar{\mathbf{x}}^T = \left[ \left[ U_0 \dots U_{N_u} \right]^T, \left[ \delta_1 \dots \delta_{N_u} \right]^T \right] \quad (8.28)$$

## Model měření

K výpočtu měřených veličin slouží zobrazení (8.29) označované jako model měření a zobrazující prostor stavových veličin na prostor veličin měřených.

$$\bar{\mathbf{m}} = \bar{\Phi}(\bar{\mathbf{x}}) + \bar{\mathbf{v}}; \quad (8.29)$$

Vektor měření pro klasickou estimaci obsahuje v nějakém uspořádání následující položky:

klasický vektor měření

$$\bar{\mathbf{m}} = [\bar{\mathbf{U}}_i^T, \bar{\mathbf{P}}_i^T, \bar{\mathbf{P}}_{ij}^T, \bar{\mathbf{Q}}_i^T, \bar{\mathbf{Q}}_{ij}^T, \bar{\mathbf{I}}_i^T, \bar{\mathbf{I}}_{ij}^T]^T$$

vektor měření s měřením fázorů

$$\bar{\mathbf{m}} = [\bar{\mathbf{U}}_i^T, \bar{\mathbf{P}}_i^T, \bar{\mathbf{P}}_{ij}^T, \bar{\mathbf{Q}}_i^T, \bar{\mathbf{Q}}_{ij}^T, \bar{\mathbf{I}}_i^T, \bar{\mathbf{I}}_{ij}^T, \bar{\boldsymbol{\delta}}_i^T]^T$$

uzlové hodnoty

$$\bar{\mathbf{U}}_i, \bar{\mathbf{P}}_i, \bar{\mathbf{Q}}_i, \bar{\mathbf{I}}_i$$

hodnoty větví

$$\bar{\mathbf{P}}_{ij}, \bar{\mathbf{Q}}_{ij}, \bar{\mathbf{I}}_{ij}$$

Poruchová veličina  $\bar{\mathbf{v}}$  v rovnici (8.29) respektuje všechny vlivy ovlivňující měření (přesnost měřicích zařízení, nesynchronnost měření atd). Vlivem náhodnosti poruch vzniká pro odhady stavové veličiny Gaussova hustota pravděpodobnosti ve tvaru (8.30).

$$p(\bar{\mathbf{x}}) = (2\pi)^{-\frac{n}{2}} |\mathbf{R}|^{-\frac{1}{2}} e^{\frac{1}{2} (\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})^T [\mathbf{R}]^{-1} (\bar{\mathbf{x}} - \bar{\mathbf{x}})} \quad (8.30)$$

Zpravidla se předpokládá vzájemná nekorelovanost jednotlivých měření a z ní vyplývající diagonální tvar kovarianční matice  $[\mathbf{R}]$  mající na diagonále hodnoty  $R_{ii} = \sigma_i^{-2}$  a nulovou střední hodnotu.

$$E\{\bar{\mathbf{v}}\} = \bar{\mathbf{0}}; \quad (8.31)$$

Podmínkou pro numericky úspěšnou estimaci je nutná existence nadbytečných rovnic vyjádřená nerovností (8.32) a splnění podmínek pozorovatelnosti (vhodné rozmístění měření po topologii soustavy)

$$\partial \overline{m} > \partial \overline{x} \quad (8.32)$$

Model měření může být lineární nebo nelineární-kvadratický.

### 8.3.6. Lineární model měření

V lineárním modelu je relace (8.29) realizovaná konstantní maticí dle (8.33).

$$\begin{aligned} \overline{\Phi}(\overline{x}) &= [\overline{\Phi}_L] \overline{x} \\ m_i = x_i &\Rightarrow \Phi_{ii} = 1 \\ m_i = y_{ii} x_i &\Rightarrow \Phi_{ii} = y_{ii} \end{aligned} \quad (8.33)$$

Nejjednodušší lineární vazbou je identita (8.32). Je to případ, kdy estimovaná veličina je současně veličinou měřenou. Takovým případem je měření fázorů s PMU. Další lineární vazbou je admitanční relace (8.33) mezi měřeným proudem a napětím realizovaná přímo z reálných měření nebo výpočetně jako pseudoměření. Řešení estimace s lineárními vazbami a bez přídatných omezovacích podmínek lze realizovat jako finitní- jednokrokové.

Nelineární model měření

$$\overline{\Phi}(\overline{x}) = [\overline{\Phi}_{NL}] \overline{x} + \overline{x}^T [\overline{\Phi}_N] \overline{x} \quad (8.34)$$

Nelineární závislost mezi stavovými a měřenými veličinami vzniká v případě měření uzlových nebo větrových výkonů. Zpravidla se tato závislost dá vyjádřit ve tvaru polynomu druhého řádu (8.34). Estimace s kvadratickou či jinou nelineární závislostí a lineární s omezovacími podmínkami je nutno řešit iterativně.

**Cílová funkce estimace  $f(\bullet)$**  měří vzdálenosti mezi měřenými veličinami  $\overline{m}$  a jejich obrazem  $\overline{\Phi}(\tilde{x})$  a odchylky plnění omezovacích podmínek a vytváří jejich součet. Příkladem je funkce, která váhovými vektory  $\overline{w}_{m\%}$ ,  $\overline{w}_{e\%}$  váže mezi sebou odchylky estimací a odchylky bilancí:

$\tilde{r}_m$  ..... normované reziduum měření

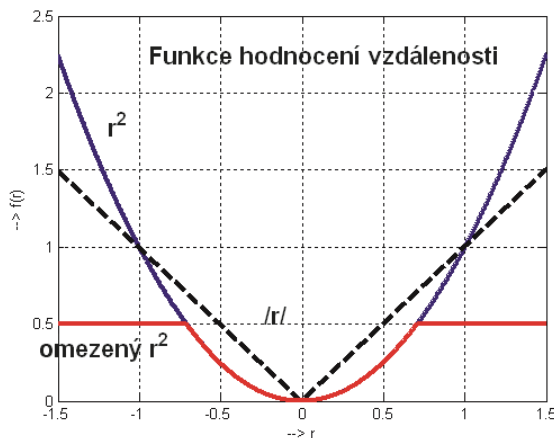
$\tilde{r}_\Sigma = \overline{w}_{\Sigma\%}^{1/2} (\tilde{e}_\Sigma) = \overline{w}_{\Sigma\%}^{1/2} (e_\Sigma)$  normované reziduum bilancí

$f(\tilde{x}) = 1/2 \{ \tilde{r}_m^{*T} \tilde{r}_m + \tilde{r}_\Sigma^{*T} \tilde{r}_\Sigma \} = 1/2 \tilde{r}^{*T} \tilde{r}$  příklad cílové estimační funkce

$\tilde{r} = [\tilde{r}_m^{*T}, \tilde{r}_\Sigma^{*T}]^{*T}$  složený vektor normovaných reziduí

Hodnocení vzdáleností se může s cílem zvýšení robustnosti a omezení vlivu odlehlých dat modifikovat různým způsobem dle použité tvořící funkce  $\rho(\bullet)$  dle grafů zobrazující normované vzdálenosti (rezidua):

$$\bar{r} = \rho(\bar{r}_m)$$



**Obr. 8.20: Grafické vyjádření funkce hodnocení vzdálenosti**

**Estimace** je optimalizační proces, jehož cílem je maximalizace hustoty pravděpodobnosti při respektování omezujících podmínek. Úloha se prakticky formuluje jako nalezení takového vektoru stavových veličin  $\tilde{\mathbf{X}}^\otimes$  (optimalizátoru):

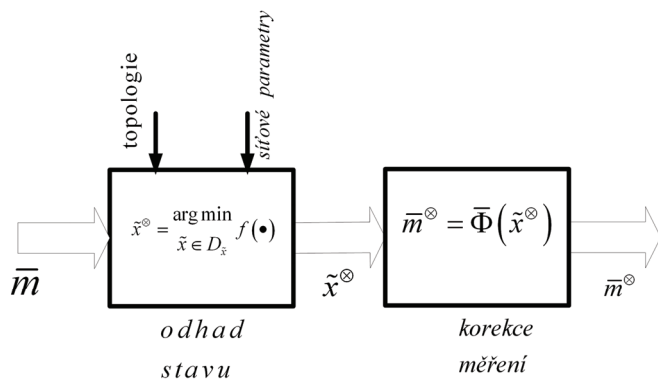
$$\tilde{\mathbf{X}}^\otimes = \arg \min_{\tilde{\mathbf{X}} \in D_{\tilde{\mathbf{X}}}} f(\tilde{\mathbf{X}}) \quad \text{definice optimální estimované stavové veličiny} \quad (8.35)$$

který optimalizuje vybranou kriteriální funkci estimace  $f(\bullet)$  a respektuje kladená omezení.

$$\bar{\mathbf{e}}_\Sigma(\tilde{\mathbf{x}}) = \hat{\mathbf{S}} - \bar{\mathbf{U}}_\Sigma \cdot ([\mathbf{Y}] \bar{\mathbf{U}})^* - \bar{\mathbf{e}}_\Sigma = \bar{\mathbf{0}} \quad \text{bilanční omezení typu rovnosti} \quad (8.36)$$

Produkty estimace jsou hlavně konzistentní vektory stavu a z něho vyplývající opravené vektory měření :

$$\tilde{\mathbf{m}}^\otimes = \bar{\Phi}(\tilde{\mathbf{x}}^\otimes) \quad \begin{array}{l} \text{opravené (konzistentní) hodnoty měření} \\ \text{a informace pro identifikaci chyb} \end{array} \quad (8.37)$$



**Obr. 8.21: Základní schéma procesu estimace**

### Řešení estimace:

Případ jen lineární závislosti bez přídavných omezení:

V tomto případě je řešení dáno vztahem (8.38).

$$\bar{x}_L^{\otimes} = \left\{ [\Phi_{LL}]^T \bar{w}_\% [\Phi_{LL}] \right\}^{-1} [\Phi_{LL}]^T \bar{w}_\% \bar{m}_L \quad (8.38)$$

Případ kombinace lineární či nelineární závislosti s omezeními:

Základním výpočetním obratem pro optimalizaci cílové funkce s omezeními je vytvoření nové (Lagrangeovy) funkce  $L(\bar{\xi})$  vycházející z KKT podmínek optimálního stavu, která se pak optimalizuje bez existence omezovacích podmínek. Optimalizátor musí obecně vyhovovat KKT podmínkám Lagrangeovy funkce  $L(\bar{\xi})$  pro optimalizaci s omezeními

$$L(\bar{\xi}) = f(\tilde{x}) + \bar{\lambda}^T \bar{C} \quad \text{kompaktní zápis Lagrangeovy funkce} \quad (8.39)$$

Podmínky rovnosti mají dvě základní složky:

$$\bar{C} = [\bar{C}_m^T, \bar{C}_\Sigma^T]^T \quad (8.40)$$

$$\bar{C}_m = (\bar{m} - \bar{\Phi}(\bar{x}) - \bar{e}_m) = \bar{0} \quad \text{omezovací podmínka měření}$$

Pro splnění podmínky 1.řádu je třeba nalézt takové  $\bar{\xi}^{\otimes} = [\tilde{x}^{\otimes}, \bar{\lambda}^{\otimes}]$ , které bude gradient funkce  $L(\bar{\xi})$  nulovat. Jedná se o sedlový problém a řešení je možné realizovat pouze iterativním způsobem, ve kterém je vždy nutné pro splnění cíle metody počítat vhodný přírůstek  $\Delta \bar{\xi}$ , který lze určit podle prvních dvou členů

Taylorovy věty ze situace ve výchozím bodě  $\bar{\xi}^0$  :

$$\nabla L(\bar{\xi}^0 + \Delta \bar{\xi}) = \nabla L(\bar{\xi}^0) + \frac{\partial}{\partial \bar{\xi}} \nabla L(\bar{\xi}^0) \Delta \bar{\xi} = \nabla L(\bar{\xi}^0) + [J_{\nabla L}] \Delta \bar{\xi}$$

$$[J_{\nabla L}] = [H_L] \Rightarrow \text{jakobián gradientu } L - \text{funkce} = \text{hessián } L - \text{funkce}$$

KKT podmínky optimality 1.řádu :

$$\bar{\nabla L} = \begin{bmatrix} \partial L / \partial \bar{x} \\ \partial L / \partial \bar{e}_m \\ \partial L / \partial \bar{e}_\Sigma \\ \partial L / \partial \bar{\lambda}_m \\ \partial L / \partial \bar{\lambda}_\Sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\nabla} \Phi(\bar{x}^\otimes) \bar{\lambda}_m - \bar{\nabla} \bar{C}(\bar{x}^\otimes) \bar{\lambda}_\Sigma \\ \bar{w}_{m\%} \bar{e}_m + \bar{\lambda}_m \\ \bar{w}_{\Sigma\%} \bar{e}_\Sigma + \bar{\lambda}_\Sigma \\ \bar{m} - \bar{\Phi}(\bar{x}^\otimes) - \bar{e}_m \\ \bar{C}(\bar{x}^\otimes) - \bar{e}_\Sigma \end{bmatrix} = \bar{0} \quad (8.41)$$

Z rovnic vyplývají přímo podmínky pro eliminaci přídatných proměnných:

$$\bar{e}_c = \bar{\lambda} \bar{w}_{c\%}^{-1}, \quad \bar{e}_m = -\bar{\lambda}_m \bar{w}_{m\%}^{-1} \quad (8.42)$$

a vzniknou jednodušší podmínky:

$$\bar{\nabla L} = \begin{bmatrix} \partial L / \partial \bar{x} \\ \partial L / \partial \bar{\lambda}_m \\ \partial L / \partial \bar{\lambda}_\Sigma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\nabla} \Phi(\bar{x}^\otimes) \bar{\lambda}_m - \bar{\nabla} \bar{C}(\bar{x}^\otimes) \bar{\lambda}_\Sigma \\ \bar{m} - \bar{\Phi}(\bar{x}^\otimes) + \bar{\lambda}_m \bar{w}_{m\%}^{-1} \\ \bar{C}(\bar{x}^\otimes) - \bar{\lambda}_\Sigma \bar{w}_{c\%}^{-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{g}_x \\ \bar{g}_{\lambda_m} \\ \bar{g}_{\lambda_\Sigma} \end{bmatrix} = \bar{0} \quad (8.43)$$

Po rozvoji gradientu získáme systém rovnic:

$$\begin{bmatrix} [H_\Phi(\bar{x}^\otimes)] \bar{\lambda}_m - [H_C(\bar{x}^\otimes)] \bar{\lambda}_\Sigma & \bar{\nabla} \bar{C} & \bar{\nabla} \Phi(\bar{x}^\otimes) \\ \bar{\nabla}^T \bar{C} & \bar{w}_{c\%}^{-1} & [0] \\ \bar{\nabla}^T \Phi & [0] & \bar{w}_{m\%}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \bar{x} \\ \Delta \bar{\lambda}_\Sigma \\ \Delta \bar{\lambda}_m \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \bar{g}_{x,0} \\ \bar{g}_{\lambda_\Sigma,0} \\ \bar{g}_{\lambda_m,0} \end{bmatrix} \quad (8.44)$$

Řešení rovnic (8.44) se provádí iterativně a nemusí být vždy dobře numericky podmíněno.

Uvádí se úspěšnost asi 95 %. Převážně se používá výhodných numerických vlastností odmocninových rozkladů, neboť matice v rovnici (8.42) je symetrická. Chyby estimace mohou také způsobovat chyby v použitém modelu (chyby topologie, chyby parametrů), případně odlehle chyby nebo výpadky měření. Ošetřování některých těchto chyb je řešitelné statistickými metodami (rozložení reziduí  $\chi^2$ ) a nebo speciálními logickými částmi estimačního balíku.

### 8.3.7. Hierarchické uspořádání estimací s PMU

V případě estimací složitých soustav nemusí být strategie centrálního estimátoru vyhovující a je možné ji suplovat dvoustupňovou distribuovanou estimací.

Při distribuované estimaci je celý (velký, složitý) systém  $A$  s množinou uzlů  $\{K\}$  a počtem uzlů  $n_u$  rozdělen na  $N$  nepřekrývajících se (disjunktních) podsystémů:

$$A^{\{k\}} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (8.45)$$

majících vždy množinu uzlů

$$K^{\{k\}} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (8.46)$$

s celkovým počtem uzlů podsystémů

$$n_u^{\{k\}} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (8.47)$$

pro které se podmínka disjunktnosti podsystémů vyjadřuje vztahem:

$$K^{\{k\}} \cap K^{\{j\}} = \{0\} \quad k \neq j, \quad k, j = 1, 2, \dots, N \quad (8.48)$$

$\{0\}$  ..... nulová množina

a celek je sjednocení dílčích podsystémů.

$$\bigcup_{k=1}^N A^{\{k\}} = A, \quad (8.49)$$

Jednotlivé podsystémy vznikají podle určitého (politického, vlastnického, geografického, provozního či napěťového) kriteria nebo vznikají rozpadem na pozorovatelné ostrovy pomosí synchronního měření, a jsou propojeny spoji (transformátory, vedení), jejichž koncové uzly přísluší dvěma rozdílným podsystémům. Rozeznávají se tři základní kategorie uzlů a k nim odpovídající stavové veličiny:



| kategorie | označení                                                                                     | popis                                                                                     |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| interní:  | $K_{\text{index}}^{\{\text{podsystem, int}\}}, X_{\text{index}}^{\{\text{podsystem, int}\}}$ | patří do daného podsystemu stejně jako všechny jeho sousedící uzly                        |
| hraniční  | $K_{\text{index}}^{\{\text{podsystem, h}\}}, X_{\text{index}}^{\{\text{podsystem, h}\}}$     | patří do daného podsystemu, ale nejméně jeden sousedící uzel přísluší jinému podsystemu   |
| externí   | $K_{\text{index}}^{\{\text{podsystem, ext}\}}, X_{\text{index}}^{\{\text{podsystem, ext}\}}$ | nepatří do daného podsystemu, ale nejméně jeden sousedící uzel přísluší danému podsystemu |

**Tab. 8.3: Kategorie uzlů**

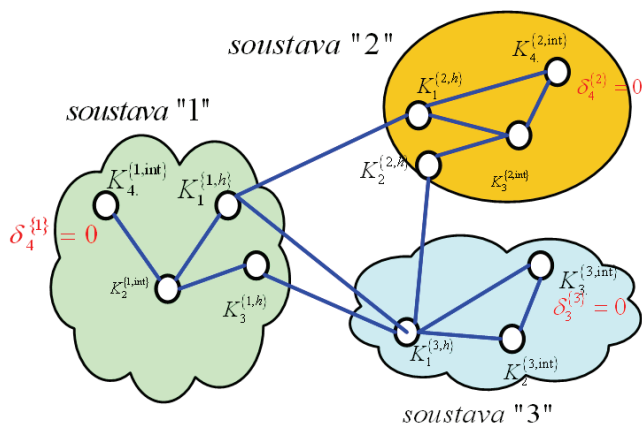
Množinu vazebních uzlů  $K^{\{\text{vaz}\}}$ , které jsou koncovými uzly propojovacích vedení mezi podsystemy získáme množinovou operací:

$$K^{\{\text{vaz}\}} = \bigcup_{\substack{\forall k \\ \forall \text{indexy}}} K_{\text{index}}^{\{k, h\}} = \bigcup_{\substack{\forall k \\ \forall \text{indexy}}} K_{\text{index}}^{\{k, \text{ext}\}} \quad (8.50)$$

potom pro jednotlivé kategorie platí:

| kategorie       | množina uzlů            | množinové vyjádření                                      | počet uzlů                       | stavový vektor                                                                                      |
|-----------------|-------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| interní         | $K^{\{k, \text{int}\}}$ | $K^{\{k\}} - K^{\{k, h\}}$                               | $n_u^{\{k, \text{int}\}}$        | $\bar{X}^{\{k, \text{int}\}}$                                                                       |
| hraniční        | $K^{\{k, h\}}$          | $K^{\{k\}} \cap K^{\{v\}}$                               | $n_u^{\{k, h\}}$                 | $\bar{X}^{\{k, h\}}$                                                                                |
| externí         | $K^{\{k, \text{ext}\}}$ |                                                          | $n_u^{\{k, h\}}$                 | $\bar{X}^{\{k, \text{ext}\}}$                                                                       |
| k-tý sub-system | $K^{\{k\}}$             | $K^{\{k\}} = \bigcup K^{\{k, \text{int}\}} K^{\{k, h\}}$ | $n_u^{\{k\}}$                    | $\bar{X}^{\{k\}} = \begin{bmatrix} \bar{X}^{\{k, \text{int}\}} \\ \bar{X}^{\{k, h\}} \end{bmatrix}$ |
| celý systém     | $K$                     | $\bigcup_{k=1}^N K^{\{k\}}$                              | $\sum_{k=1}^N n_u^{\{k\}} = n_u$ | $\bar{X}$                                                                                           |

**Tab. 8.4: Kategorie uzlů a stavové vektory**



**Obr. 8.22: Znázornění distribuované soustavy: vazba hraničních a externích uzlů**

| uzel             | $K_1^{\{1,h\}}$ | $K_3^{\{1,h\}}$ | $K_1^{\{2,h\}}$ | $K_2^{\{2,h\}}$ | $K_1^{\{3\}}$ |
|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|
| externí soustavy | 2,3             | 3               | 1               | 3               | 1,2           |

**Tab. 8.5: Vazby uzlů soustavy**

Globální estimační kritérium

$$f(\bar{x}) \quad (8.51)$$

je v případě distribuované estimace nahrazeno součtem kritérií

$$\sum_{k=1}^N \left\{ f_{kk}(\bar{x}^{\{k\}}) + \sum_{l \in \Psi_{kl}} f_{kl}(\bar{x}^{\{k,h\}}, \bar{x}^{\{k,ext\}}) \right\} \quad (8.52)$$

s koordinační omezovací podmínkou typu rovnosti:

$$\bar{m}^{\{kl,h\}} = \bar{m}^{\{lk,h\}} \quad (8.53)$$

v rovnicích (8.52) - (8.53) znamenají:

|                                                  |                                                                                                                                           |        |
|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| $f_{kk}(\bar{x}^{\{k\}}, \bar{m}^{\{k\}})$       | fragment globálního kritéria asociovaný s podsystémem k a obsluhovaný v primárním stupni estimace                                         | (8.52) |
| $f_{kl}(\bar{x}^{\{k,h\}}, \bar{x}^{\{k,ext\}})$ | koordinační kritérium obsluhované v sekundárním stupni estimace. Již estimované hodnoty vstupují do sekundární estimace jako pseudoměření | (8.53) |

Estimovaným hodnotám hraničních a externích uzlů každé subsoustavy odpovídají i předávané výkony mezi hraničními a externími uzly soustavy. Protože se hraniční a externí uzly subsoustav se navzájem překrývají a výsledky estimací výkonů musí být stejné, musí se výsledky modulů napětí, úhlu uzlů a předávaných výkonů sjednotit centrálním koordinátorem.

Koordinační kritérium má v případě měření propojovacích veličin zajistit co nejlepší shodu mezi měřeními a estimovanými hodnotami propojení mívá zpravidla tvar kvadratické formy.

**Porovnání distribuované a globální estimace.** Pro výsledné minimum distribuované estimace se však dosáhne horších výsledků než při globální estimaci neboť platí nerovnost:

$$\min f \leq \sum_{\forall k} f_{kk}(\bullet) + \sum_{\forall l} f_{kl}(\bullet) \quad (8.54)$$

Pro počet operací v závislosti na počtu uzlů při realizaci estimace platí, že tato závislost se dá aproximovat polynomem 3 stupně s výrazným vlivem nejvyšší mocniny. Za tohoto předpokladu je náročnost globální estimace větší než náročnost součtu dílčích estimací. Každý subsystém generuje v primární estimaci svoji lokální estimaci ve které jsou relativní úhly uzlů vztaženy k bazovému uzlu

$K_{\text{index báze}}^{\{\text{podsystém}, k\}}$  každé subsoustavy.

| vektor                                                                                      | význam                                                                                                                                                      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\bar{\delta}_b = \left[ \delta_b^{\{2\}} \quad \delta_b^{\{N\}} \right]^T$                 | vektor úhlů báзовých uzlů subsoustav při volbě společného báзовého úhlu $\delta_b^{\{1\}} = 0$                                                              |
| $\bar{m} = \left[ \bar{m}^{\{1\}} \quad \dots \bar{m}^{\{N\}} \quad \bar{m}_\delta \right]$ | celkový vektor měření je složen z měření dílčích podsystémů $\bar{m}^{\{k\}}$ a vektoru měření komplexních výkonů $\bar{m}_\delta$ na propojovacích vedení. |
| $\bar{x} = \left[ \bar{x}^{\{1\}} \quad \dots \bar{x}^{\{N\}} \right]$                      | celkový stavový vektor je složen ze stavových vektorů všech podsystémů                                                                                      |
| $\bar{x}^{\{h\}} = \left[ \bar{x}^{\{1,h\}} \quad \dots \bar{x}^{\{N,h\}} \right]$          | vektor stavových veličin všech hraničních uzlů                                                                                                              |

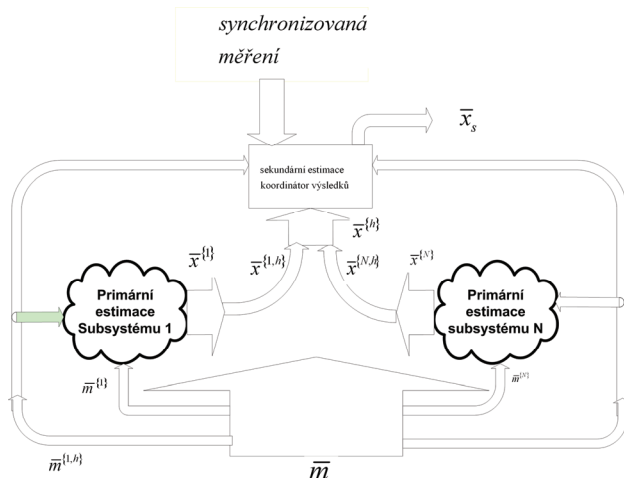
**Tab. 8.6: Přehledová tabulka vektorů**

| estimace   | vektor měření                                        | rovnice měření                                                                                      | stavový vektor                                       |
|------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| globální   | $\bar{m}$                                            | $\bar{m} = \Phi(\bar{x}) + \bar{v}$                                                                 | $\bar{X}$                                            |
| primární   | $\bar{m}^{\{k\}}$                                    | $\bar{m}^{\{k\}} = \Phi^{\{k\}}(\bar{x}^{\{k\}}) + \bar{v}^{\{k\}}$<br>$k \in \langle 1, N \rangle$ | $\bar{x}^{\{k\}}$                                    |
| sekundární | $\bar{m}_s^T = [\bar{m}_\delta^T, \bar{x}^{\{h\}T}]$ | $\bar{m}_s = \Phi_s(\bar{x}_s) + \bar{v}_s$                                                         | $\bar{x}_s^T = [\bar{\delta}_b^T, \bar{x}^{\{h\}T}]$ |

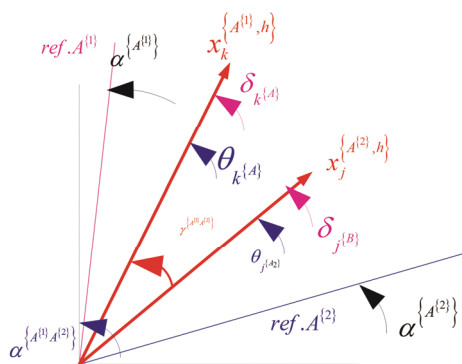
**Tab. 8.7: Přehledová tabulka estimací**

Výsledky primární estimace  $\bar{x}^{\{h\}}$  vstupují do sekundární estimace jako pseudoměření.

Celkovou strukturu ukazuje *tab. 8.7*.



**Obrázek 8.23: Struktura distribuované estimace**



**Obr. 8.24: Fázory podsystémů v komplexní rovině a souřadnicových systémech**

| veličina                             | popis                                                             |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| $ref.A^{(1)}, ref.A^{(2)}$           | referenční osy podsystému A a B                                   |
| $\alpha^{A^{(1)}}, \alpha^{A^{(2)}}$ | úhly referenčních os měřené od reálné osy komplexní roviny        |
| $\alpha^{A^{(1)}A^{(2)}}$            | vzájemné pootočení referenčních os podsystémů                     |
| $x_k^{A,h}, x_j^{B,h}$               | fázory napětí hraničních uzlů podsystémů                          |
| $\delta_k^{A}, \delta_j^{B}$         | úhly fázorů napětí měřené od referenční osy systému $ref.A^{(1)}$ |
| $\theta_k^{A}, \theta_j^{B}$         | úhly fázorů napětí měřené od referenční osy systému $ref.A^{(2)}$ |
| $\gamma^{AB}$                        | Natočení fázorů napětí hraničních uzlů způsobený průtokem výkonů  |

**Tab. 8.8: Význam veličin na obr. 8.24**

Každá lokální estimace má vždy svůj referenční uzel pro vytváření relativních úhlů. Koordinátor výsledků musí úhly přetransformovat ke společnému referenčnímu uzlu. Základní situaci ukazuje obr.23. Podstatou problému je stanovit vzájemné otočení společného a vybraného podsystému dle výrazu.

$$\alpha^{A^{(1)}A^{(2)}} = \delta_{k^{A}} - \theta_{j^{B}} - \gamma^{A^{(1)}A^{(2)}} = \alpha^{A^{(1)}} - \alpha^{A^{(2)}} \quad (8.55)$$

V případě vícenásobného propojení se výraz pro úhel otočení systémů modifikuje dopočet střední hodnoty:

$$\alpha^{A^{(1)}A^{(2)}} = E \left\{ \sum_{\forall l} \delta_{k^{A^{(1)}}} - \theta_{l^{A^{(2)}}} - \gamma_l^{A^{(1)}A^{(2)}} = \alpha^{A^{(1)}} - \alpha^{A^{(2)}} \right\} \quad (8.56)$$

$E\{\bullet\}$  .....operátor střední hodnoty

Toto pootočení se při transformaci přičítá ke všem estimovaným hodnotám daného podsystému. Nejjednodušší situace je v případě, ve kterém úhly  $\alpha^{\{A^{(1)}\}}$ ,  $\alpha^{\{A^{(2)}\}}$  jsou přímo měřeny synchronním měřením je jejich rozdíl přímo určuje estimovanou hodnotu hledaného rozdílu.

Další možnost je využít možnosti výpočtu  $\gamma^{\{A^{(1)}A^{(2)}\}}$  ze známých parametrů spoje a měřeného výkonu přenosu a získat tak informaci u úhlech hraničních uzlů v jednom souřadnicovém systému. Hledání úhlu natočení pak získává optimalizační charakter, ve kterém se hledá úhel natočení minimalizující reziduum vypočteného a měřeného výkonu propojení. Jsou zde i možnosti volit jiné váhové koeficienty pro měření P i Q, protože obě měření mohou mít rozdílnou přesnost.

### Implementace synchronních měření do estimací

Estimační procesy jsou v zásadě dvojího druhu.

**Lineární.** Rovnice měření je lineární obsahuje li měření modulů napětí uzlů, modulů proudů spojů na obou koncích ,modulů injektovaných proudů, měření úhlů komplexních veličin. Poslední položka je charakteristická jen pro PMU měření. Ostatní položky se vyskytují v měření SCADA, digitálních ochran i PMU měření. Zdroje pro lineární estimaci jsou rovněž pseudoměření.

Možné konfigurace vektorů měření:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{m}}_{SCADA}^T &= [\bar{\mathbf{U}}^T, \bar{\mathbf{I}}^T, \bar{\mathbf{I}}_{ved}^T, \bar{\mathbf{P}}^T, \bar{\mathbf{Q}}^T, \bar{\mathbf{P}}_{ved}^T, \bar{\mathbf{Q}}_{ved}^T] \\ \bar{\mathbf{m}}_{PMU} &= [\bar{\mathbf{U}}^T, \bar{\delta}^T, \bar{\mathbf{I}}^T, \bar{\theta}^T, \bar{\mathbf{I}}_{ved}^T, \bar{\theta}_{ved}^T]\end{aligned}\quad (8.57)$$

$\bar{\mathbf{U}}, \bar{\mathbf{I}}, \bar{\mathbf{P}}, \bar{\mathbf{Q}}$  vektory modulů uzlových napětí, proudů, činných a jalových výkonů

$\bar{\delta}, \bar{\theta}$  ..... vektory úhlů uzlových napětí a proudů

$\bar{\mathbf{P}}_{ved}^T, \bar{\mathbf{Q}}_{ved}^T$  vektory činných a jalových výkonů vedení

$\bar{\mathbf{I}}_{ved}^T, \bar{\theta}_{ved}^T$  vektory proudů vedení a jejich úhlů

### Struktura dat lineárního estimátoru měření PMU:

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}} \left\{ \begin{matrix} \text{složka 1} \\ \text{složka 2} \end{matrix} \right\}_{\text{PMU}} \\ \hat{\mathbf{I}} \left\{ \begin{matrix} \text{složka 1} \\ \text{složka 2} \end{matrix} \right\}_{\text{PMU}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{I}}_{\%} & [0] \\ [0] & \bar{\mathbf{I}}_{\%} \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \hat{\mathbf{I}}_{\text{složka1}}}{\partial \hat{\mathbf{U}}_{\text{složka1}}} & \frac{\partial \hat{\mathbf{I}}_{\text{složka1}}}{\partial \hat{\mathbf{U}}_{\text{složka2}}} \\ \frac{\partial \hat{\mathbf{I}}_{\text{složka2}}}{\partial \hat{\mathbf{U}}_{\text{složka1}}} & \frac{\partial \hat{\mathbf{I}}_{\text{složka2}}}{\partial \hat{\mathbf{U}}_{\text{složka2}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}} \left\{ \begin{matrix} \text{složka 1} \\ \text{složka 2} \end{matrix} \right\} \end{bmatrix} + \bar{\mathbf{v}}$$

### Struktura dat hybridního lineárního estimátoru měření :

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}} \left\{ \begin{matrix} \text{složka 1} \\ \text{složka 2} \end{matrix} \right\}_{\text{SCADA}} \\ \hat{\mathbf{U}} \left\{ \begin{matrix} \text{složka 1} \\ \text{složka 2} \end{matrix} \right\}_{\text{PMU}} \\ \hat{\mathbf{I}} \left\{ \begin{matrix} \text{složka 1} \\ \text{složka 2} \end{matrix} \right\}_{\text{PMU}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{I}}_{\%} & [0] \\ [0] & \bar{\mathbf{I}}_{\%} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} [\mathbf{N}] & [0] \\ [0] & [\mathbf{N}] \end{bmatrix} \\ \frac{\partial \hat{\mathbf{I}}_{\text{složka1}}}{\partial \hat{\mathbf{U}}_{\text{složka1}}} & \frac{\partial \hat{\mathbf{I}}_{\text{složka1}}}{\partial \hat{\mathbf{U}}_{\text{složka2}}} \\ \frac{\partial \hat{\mathbf{I}}_{\text{složka2}}}{\partial \hat{\mathbf{U}}_{\text{složka1}}} & \frac{\partial \hat{\mathbf{I}}_{\text{složka2}}}{\partial \hat{\mathbf{U}}_{\text{složka2}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{U}} \left\{ \begin{matrix} \text{složka 1} \\ \text{složka 2} \end{matrix} \right\} \end{bmatrix} + \bar{\mathbf{v}} \quad (8.58)$$

$\hat{\mathbf{U}} \left\{ \begin{matrix} \text{složka 1} \\ \text{složka 2} \end{matrix} \right\}, \hat{\mathbf{I}} \left\{ \begin{matrix} \text{složka 1} \\ \text{složka 2} \end{matrix} \right\}$  napětí (proud) v komplexní rovině vyjádřený  
v polárních nebo kartézských souřadnicích. Jejich volba určuje  
složky 1,2

$[\mathbf{N}]$ .....Incidenční matice uzel-větev.

Naznačené derivace se odvozují ze schématu ekvivalentního  $\pi$ -článku spojovací větve . Pro polární souřadnice to ilustruje *obr. 8.25*.



**Nelineární.** Rovnice měření jsou nelineární, obsahují-li měření P a Q. Řešení estimace je pak iterační. Charakteristické pro klasická měření SCADA systému

Spojení klasického měření SCADA a synchronního měření PMU lze v zásadě realizovat dvojím způsobem.

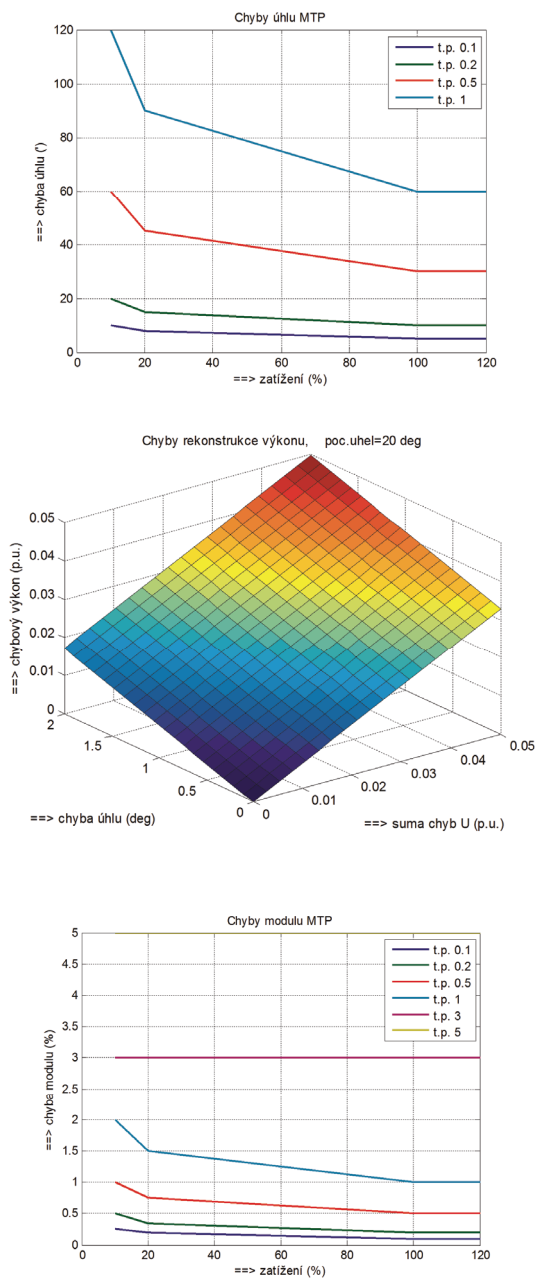
Integrovaně vzniká hybridní estimační systém charakteristický tím, že nelineární estimační systém operuje nad všemi daty paralelně.





## Sekvenčně - postprocessing

Výsledky nelineární estimace se jako pseudoměření předají lineárnímu rychlému estimátoru majícího jako vstup také měření PMU.



Obr. 8.27: a, b, c: Chyby MTP a chyba rekonstrukce výkonu

Doplnění o informaci z měření fázorů může vlastnosti estimace zlepšit v oblasti zvýšení robustnosti a podmíněnosti řešení, snížení neurčitosti a zvýšení přesnosti výsledků.

### 8.3.8. Spínání oblastí

Při vytváření modelu spínacího procesu se vychází z modelu soustavy před prováděnou manipulací. V pracovním bodě před manipulací lze napsat pro jeho okolí rovnice:

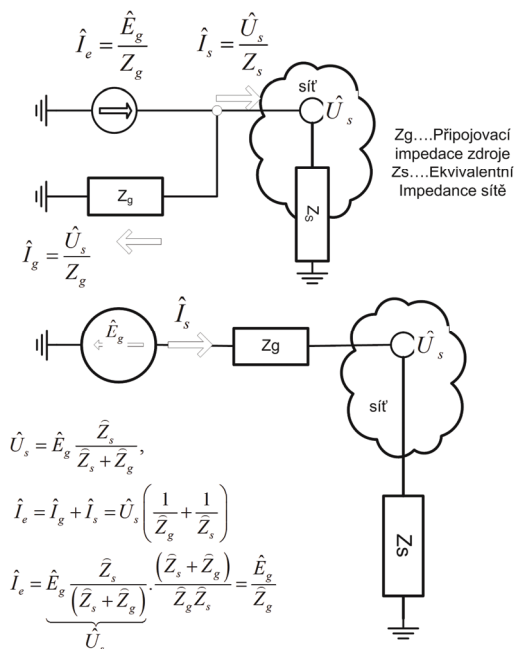
$$\hat{\mathbf{U}} = [\mathbf{Z}]\hat{\mathbf{I}}, \quad \hat{\mathbf{I}} = [\mathbf{Y}]\hat{\mathbf{U}} \quad (8.60)$$

$\hat{\mathbf{I}}, (\hat{\mathbf{U}})$  .... vektor uzlových proudů (napětí)

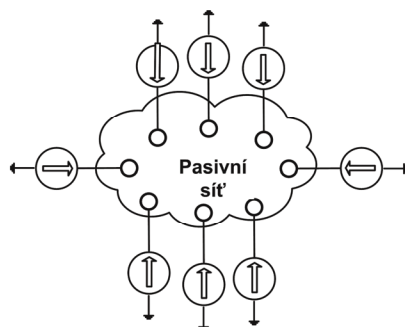
$[\mathbf{Z}], [\mathbf{Y}]$  .impedanční (*admitanční*) matice

V rozsáhlém schématu existuje pro řešení ekvivalentu několik významných bran:

- Brána zdrojů
- Brána poruchy (podélná, příčná)
- Brána připojení ekvivalentního zdroje.



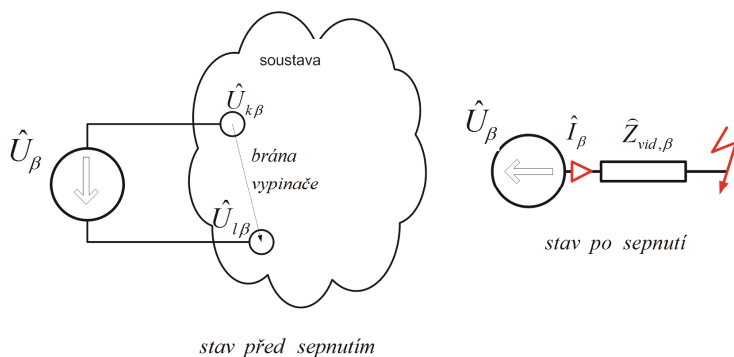
Obr. 8.28: Ekvivalence mezi aktivními zdroji



**Obr. 8.29: Ustálený stav**

Provozní stav celého systému lze znázornit schématem s vyjádřenými aktivními a pasivními prvky. Takový systém lze nahradit z hlediska vybrané brány ideálním napěťovým (či proudovým) zdrojem a ekvivalentní impedancí. Mezi aktivními zdroji existuje ekvivalence umožňující přecházet z jednoho typu zdrojů na druhé, případně je účelově mixovat.

Pro spínací proces je zkoumanou branou brána ohraničená svorkami rozepnutého vypínače. Vliv všech aktivních zdrojů systému se promítá do napětí této brány.



**Obr. 8.30: Spínací operace**

Napětí na bráně  $\hat{U}_\beta$  protlačuje přes viděnou impedanci brány  $\hat{Z}_{\text{vid},\beta}$  spínací proud  $\hat{I}_\beta$ . Hodnotu viděné impedance lze zjistit z prvků uzlové impedanční matice podle vztahu:

$$\hat{Z}_{\text{vid},\beta} = Z(k\beta, k\beta) + Z(l\beta, l\beta) - 2 \cdot Z(k\beta, l\beta) \quad (8.61)$$

$k\beta, l\beta$  .....indexy brány  $\beta$  v impedanční matici  $[Z]$

Spínací proud je definován vztahem:

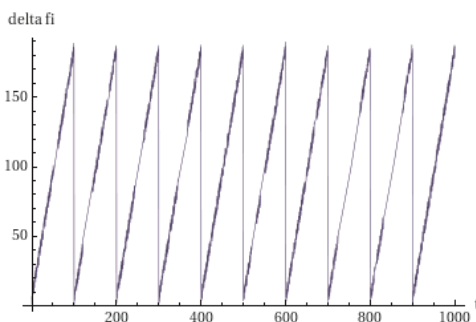
$$\hat{I}_{\beta} = \frac{\hat{U}_{k\beta} - \hat{U}_{l\beta}}{\hat{Z}_{\text{vid},\beta}} = \frac{U_{k\beta} e^{j\delta_{k\beta}} - U_{l\beta} e^{j\delta_{l\beta}}}{\hat{Z}_{\text{vid},\beta}} = \frac{\hat{U}_{\beta}}{\hat{Z}_{\text{vid},\beta}} \quad (8.62)$$

Z výrazu pro proud je vidět výhodnost použití měření modulů a fází, které je možné využít přímo pro zajišťování spínacích podmínek při známém modelu soustavy.

Spínání oblastí pomocí měření fázorů může být náhradní alternativou ke standardnímu způsobu pomocí synchrochecku jestliže se budou znát příslušné ekvivalentní impedance.

### 8.3.9. Detekce ostrovního režimu

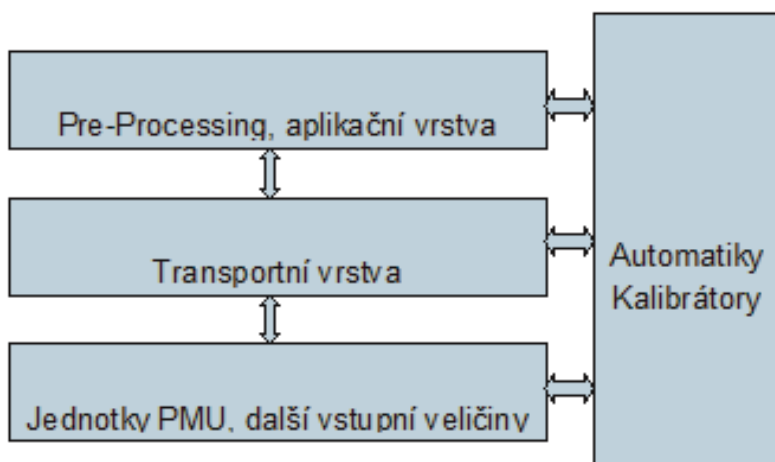
Detekce ostrovního režimu s využitím jednotek PMU je možná (v takovém případě je možné pozorovat vzájemné protáčení fázorů napětí mezi ostrovy úměrné rozdílové frekvenci). Pro přesné určení hranice ostrova je nutný dostatečný počet jednotek (zejména v hraničních bodech ostrova). Vznik ostrova lze velmi dobře detekovat stávajícími prostředky, přínos PMU v této aplikaci je v přesné časové synchronizaci (tj. určení okamžiku rozpadu pro zpětnou analýzu). V oblasti řízení lze jednotky PMU využít pro spínání ostrovů obdobně jako stávající prostředky.



**Obr. 8.31: Průběh rozdílů úhlů při ostrovním režimu**  
(ostrov č. 1 – 50 Hz, ostrov č. 2 kolísá  $49,99 \pm 0,001$  Hz)

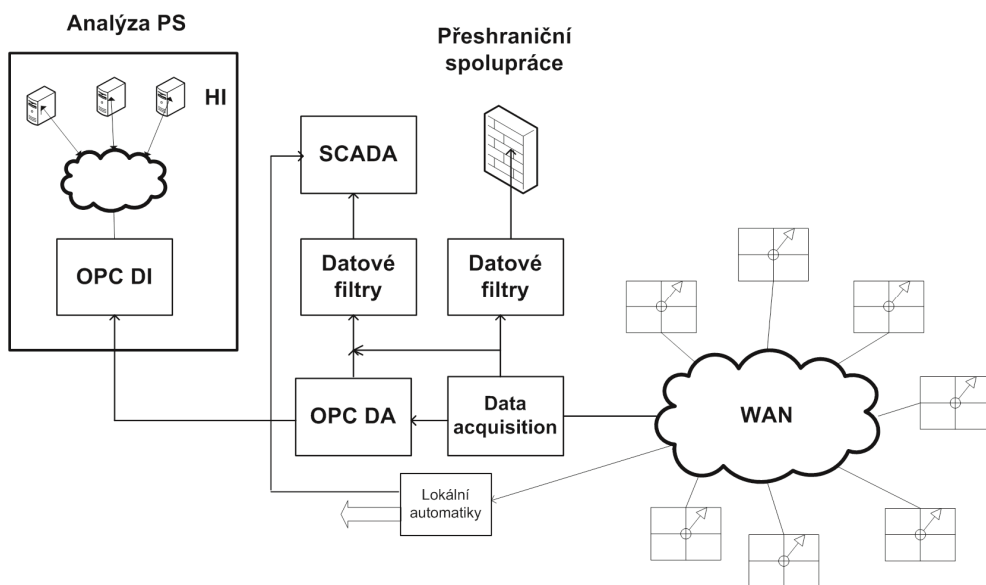
## 8.4. Architektura systému WAMS

Pilotní projekt je koncipován ve třech vertikálních vrstvách nezávislých na dodavateli. Výměna dat probíhá podle protokolu IEEE C37.118. Jako volitelná část projektu je navržena koncepce lokálních automatik a kalibrátorů (distribuovaná estimace). Koncepci popisuje obr.8.32.



**Obr. 8.32: Koncepte systému WAMS**

Měřené veličiny jsou jednotkami PMU posílány prostřednictvím sítě ethernet do switchů, které zajistí jejich odeslání do řídicího systému. Jedná se tedy o topologii logické hvězdy. Při rozšíření systému by potom bylo nutné zaručit redundanci pomocí záložních komunikačních cest. Řídicí systém pak data vyhodnotí a vloží do databáze a SCADA systému, v případě kritických hodnot dá povel k akčnímu zásahu a informuje operátora.



**Obrázek 8.33: Koncepte systému WAMS**

### 8.4.1. Sběr dat, síť WAN

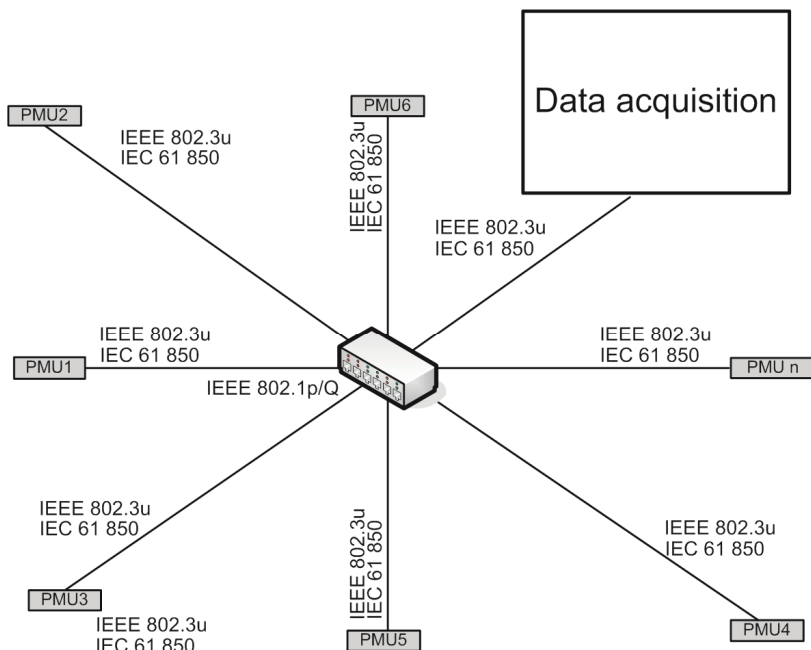
Jako přenosové médium je voleno optické případně metalické vedení, na kterém je provozována síť alespoň Ethernet 802.3ac s přenosovou rychlostí alespoň 2 Mbps. Dále je na přenosovou cestu kladen požadavek na kvalitu QoS splňující standardy IEEE 802.1p (zaručuje prioritu přístupu k médiu) a IEEE 802.1Q (pro podporu směrování paketů). V neposlední řadě je potřeba dodržet standard IEC 61850, který zaručuje nízkou dobu odezvy pro řízení. Pro popsané požadavky by byla vhodná dedikovaná linka.

#### Přenosová cesta

Přenosová cesta pro vzdálený transport měřených dat z rozvodny závisí na způsobu připojení rozvodny. Preferovaný způsob je přenos pomocí optických vláken, kde na obou koncích musí být umístěny modemy (modulátor/demodulátor), které zaručí připojení na metalický ethernet na obou koncích. Jednou z dalších voleb, která není tak vhodná jako optický přenos je přenos pomocí bezdrátových pojítek v některém z komerčních radiových pásem.

#### Připojení centrálního sběrného bodu

Jednotky PMU budou do centrálního sběrného bodu připojeny prostřednictvím sítě Ethernet (viz. Přenosová cesta), kde budou zapojeny do centrálního ethernetového switchu. Centrální switch bude napojen na řídicí systém, který provede vyhodnocení dat měření a vykoná další zpracování.



Obr. 8.34: Navrhovaná koncepce systému WAMS

Shrnutí požadavků na datové spoje:

- Síť WAN
- Redundance přenosových cest
- Protokol TCP/IP
- Jako přenosové médium je voleno optické, výjimečně metalické vedení (odolnost EMC)
- Síť nejméně standardu Ethernet 802.3ac s přenosovou rychlostí alespoň 2 Mbps
- Požadavek na kvalitu QoS splňující standardy IEEE 802.1p (priorita přístupu k médiumu) a IEEE 802.1Q (podpora směrování paketů)
- Potřeba dodržet standard IEC 61850, který zaručuje nízkou dobu odezvy pro řízení

#### 8.4.2. Práce s daty, ukládání

Měřená data z jednotek PMU jsou prostřednictvím WAN sítě přenášena do části „Data acquisition“, kde dochází k jejich zpracování. Do sítě WAN mohou být připojeny i jiné jednotky PMU, než jsou využívány pro lokální automatiku. Z toho důvodu je blok „Data acquisition“ řešen separátně od lokální automatiky.

Data acquisition provádí předzpracování procesních dat a konverzi protokolů měření do formy ukládané v databázi OPC DA.

OPC DA – datové sklady pro skladování měřených synchronizovaných, případně se zde mohou skladovat data přeshraniční spolupráce

OPC DI – rozhraní pro přístup k uloženým datům. Využití je především analýza stavů a průběžná identifikace modelu vybraných částí soustavy. Přes OPC DI je možné také připojení vizualizace např. pro prezentaci dat.

#### 8.4.3. Výměna dat s ostatními systémy

**Datové filtry** – slouží k výběru a převodu procesních dat mezi dvěma systémy. Datové filtry se vyskytují ve dvou variantách:

Propojení mezi blokem zpracování dat (Data acquisition) a Firewall. Filtry jsou navrženy pro oba dva směry toku dat. Výhoda tohoto návrhu je úplná kontrola nad daty tekoucími oběma směry.

a) filtr ve směru Data acquisition k Firewallu.

V tomto případně slouží datové filtry pro výběr hodnot veličin, které budou poskytnuty pro přeshraniční spolupráci s dalšími sítěmi. V návrhu filtru je volně přecházeno mezi měřením a estimovanými hodnotami, protože „správnost“ hodnot je závislá na výkladu a z hlediska filtru ji není nutné rozlišovat – je možné poskytnout obě možnosti. Hodnoty estimace a měření jsou zahrnuty pod pojmem procesní veličiny. Základní volby pro filtr by mohly vypadat takto:

- Celkový počet přenášených veličin (např. 5 fázorů napětí)

- Volby lokalit, z kterých budou poskytována měření, případně estimace stavů z modelu.
- Volba estimovaných (měřených) veličin, pro každou lokalitu zvlášť. Volba veličin je značně závislá na zvolené verzi a výrobci zařízení PMU a nemusí být tedy ve všech lokalitách stejná (dle dostupnosti).
- Počet přenášených veličin za jednotku času (může být závislý i na lokalitě měření)
- Kvalita předávané veličiny (věrohodnost, ztracení synch. GPS, velké zašumění vlivem přechodových jevů ... )

b) filtr ve směru od Firewallu k Data acquisition

Účelem filtru je kontrola dat a jejich integrity a dále jejich konverze a vložení do oddělené části databáze OPC DA pro přeshraniční spolupráci. Mimo vlastní měření (příp. estimace) synchronních měření by měly být součástí i další dostupná data, jako je kvalita hodnot, lokalita měření, případně použitý PMU (v průběhu času se může měnit vlivem rekonstrukcí). I v případě nedostupnosti některých dat je vhodné, aby se počítalo koncepčně s možností jejich začlenění.

Filtr může také na základě poškození integrity dat provést požadavek na opětovné poslání měření, případně poslat informaci o poškození (záleží na implemetaci na partnerské straně).

## **Propojení mezi OPC DA a SCADA systémem**

Zajišťuje výběr dat, které se budou vkládat do systému SCADA. Výběrem dat je myšleno nejen výběr dané veličiny (např. daného konkrétního fázoru napětí), ale i četnost měření tj. počet hodnot za jednotku času, případně předzpracovaná data jako je např. průměrná hodnota veličiny a dále případně dalších doplňujících informací – záleží na podpoře systému SCADA.

Doplňujícími informacemi může být např. kvalita měřených hodnot, výpadek GPS synchronizace atp. Výběr významných dat je prováděn i z bezpečnostních důvodů, aby nedošlo k přetížení SCADA systému a následné nefunkčnosti.

V případě potřeby je možné přenášet a zpracovávat data také ve směru SCADA a OPC DA.

## **Firewall**

Firewall má klíčovou roli, která zajišťuje bezpečnost celého systému. Jeho význam je zabránit neoprávněnému přístupu do systému, případně přetížení vlivem potíží partnerských TSO.

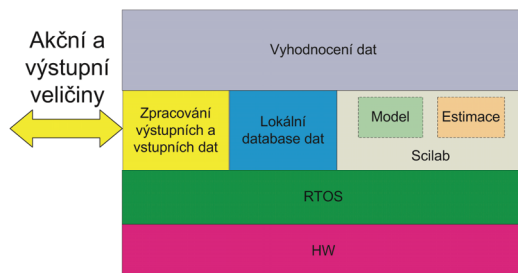
## **Lokální automatiky**

Lokální automatiky budou dodávat přímo filtrovaná data do SCADA systému (a do dalšího úložiště). Výhodou tohoto řešení je lepší využitelnost dat, protože mezi dobou měření a vložení do systému, případně vyhodnocením bude menší zpoždění, než v případě průchodu přes další prvky systému, případně databáze.



#### 8.4.4. Lokální automatiky

Řídicí systém lokální automatiky je rozdělen do několika vrstev (viz obr. 8.35), které vykonávají vždy určitou specifickou činnost.



Struktura systému lokální automatiky

**Obr. 8.35: Navrhovaná koncepce vnitřní architektury lokální automatiky / distribuovaného estimátoru**

#### Hardware

Hardwarová úroveň zajišťuje dostatečné výpočetní prostředky a připojení k okolním zařízením. Může se jednat např. o PowerPC MPC5200.

#### RTOS (real-time operating system) – systém reálného času

Na rozdíl od běžně dodávaných systémů pro kancelářské aplikace jako je Microsoft Windows, či jiné běžné distribuce je několik hlavních zásadních rozdílů, které RTOS mají např.:

- 1) Pod RTOS existuje více priorit běhu aplikace, případně její části, oproti běžnému operačním systému nereálného času.
- 2) Jednotlivé úlohy (aplikace) jsou deterministicky plánovány v čase, tzn. je možné exaktně určit, kdy a jak se který výpočet, případně jiná operace, uskuteční. U jiných systémů než RTOS to není tak zcela jednoznačné a závisí to na „způsobu plánování“, který daný operační systém používá.
- 3) Malé rozlišení časovače. Rozlišení časovače určuje minimální kvantum času, které může být jednotlivé aplikaci poskytnut. Tento parametr souvisí s plánováním úloh.
- 4) Rychlost přepínání kontextu. Jde o časovou režii, při které doběhla jedna aplikace, ale není ještě spuštěna druhá.
- 5) Příkladem operačního systému reálného času jsou: RTAI, RTLinux, VxWorks, PikeOS, QNX a mnoho dalších.

## Lokální databáze dat

Slouží k lokálnímu uložení aktuálních sebraných dat pro výpočty a jako mezi-paměť. Počet dat v této paměti by měl být s ohledem na výpočetní požadavky, technické důvody a účelnost omezen hloubkou historie.

## Zpracování výstupních a vstupních dat

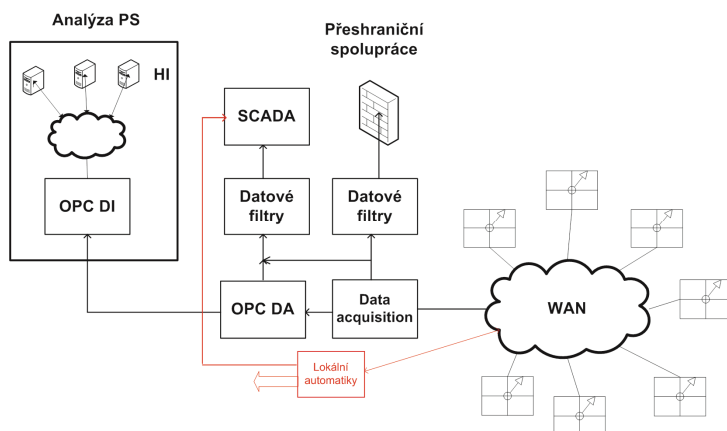
Účelem tohoto modulu je sběr a interpretace vstupních dat z měřicích jednotek PMU a dále příprava dat pro odesílání do dalších systémů. Jedná se především o dekódování standardu IEEE C37.118 (formát synchrofázorů) a jejich modifikace.

## Vyhodnocení dat

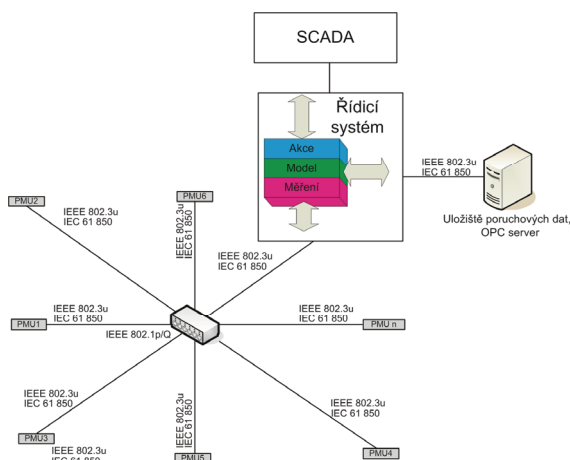
Algoritmy pro vyhodnocení dat využívající podpůrná data z vnitřního modelu a databáze dat, případně další externí data. Do této skupiny patří i nastavení alarmů a specifických událostí.

## Úložiště poruchových dat

OPC server zajišťuje skladování procesních dat např. synchronní fázory, stavy systému a další dostupné hodnoty. Dle potřeby je možné nastavit množství dat a jejich hloubku historie. Hlavní výhodou této technologie je jednoduché napojení na případné budoucí systémy, která je zajištěna jeho unifikací připojení. Na rozdíl od běžných serverů, které neslouží na ukládání procesních dat, je možné docílit priority přístupů a rychlost přístupu do databáze.



**Obr. 8.36: Spolupráce lokální automatiky (červeně) se systémem WAMS**



**Obr. 8.37: Logická topologie sítě pro lokální automatiku (využívá infrastrukturu WAMS)**

Algoritmus lokálních automatik je založen na matematickém modelu využívajícím ekvivalenty a skalárním měření amplitud a úhlů napětí a proudů složených do vektorů časově posunutých o  $\Delta T_1$ , čímž získáme řadu vektorů. Matici vektorů vynásobíme její vlastní transponovanou maticí a určíme její vlastní čísla. Nedominantní vlastní čísla signalizují přítomnost mimořádných stavů. Automatika má k dispozici dvě sady vlastních čísel – výpočet z modelu a výpočet z měřených hodnot. Tím je dosaženo zvýšení spolehlivosti signalizace mimořádných stavů. Algoritmus lokálních automatik je založen na matematickém modelu využívajícím ekvivalenty a skalárním měření amplitud a úhlů napětí a proudů složených do vektorů časově posunutých o  $\Delta T_1$ , čímž získáme řadu vektorů. Matici vektorů vynásobíme její vlastní transponovanou maticí a určíme její vlastní čísla. Nedominantní vlastní čísla signalizují přítomnost mimořádných stavů. Automatika má k dispozici dvě sady vlastních čísel – výpočet z modelu a výpočet z měřených hodnot. Tím je dosaženo zvýšení spolehlivosti signalizace mimořádných stavů.

## 8.5. Literatura

- [1] A.P.Sakis Meliopoulos et al. Advances in the SuperCalibrator Concept-Practical Implementations, Proceeding of the 40th Hawai International Conference on System Science-2007.
- [2] Phadke, A.G., Thorp, J.S.; Synchronized Phasor Measurements and Their Applications. Wiley New York 2008, X, 247 p.
- [3] Premerlani, W.; Kasztenny, B.; Adamiak, M.; Development and Implementation of a Synchrophasor Estimator Capable of Measurements Under Dynamic Conditions. Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 23, Issue 1, Jan. 2008 Page(s):109 - 123
- [4] Sykes, J.; Koellner, K.; Premerlani, W.; Kasztenny, B.; Adamiak, M.; Synchrophasors: A primer and practical applications. Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2007. PSC 2007, 13-16 March 2007 Page(s):213 – 240.
- [5] Demeter, E.; Faried, S.O.; Sidhu, T.S.; Signal phase shifting during synchrophasor

- measurements. Electrical and Computer Engineering, 2005. Canadian Conference on, 1-4 May 2005 Page(s):557 – 560.
- [6] Phadke, A.G.; Kasztenny, B.; Synchronized Phasor and Frequency Measurement Under Transient Conditions. Power Delivery, IEEE Transactions on, Volume 24, Issue 1, Jan. 2009 Page(s):89 – 95.
  - [7] Guzman, A.; Tziouvaras, D.A.; Schweitzer III, E.O.; Martin, K.; Local- and Wide-Area Network Protection Systems Improve Power System Reliability. Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2006. PS '06, 14-17 March 2006 Page(s):174 – 181.
  - [8] Mai, R.; Kirby, B.; Zhengyou He; Bo, Z.; Research on synchronized phasor measuring method for dynamic signals. Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE, 20-24 July 2008 Page(s):1 – 8.

## 9. Smart Grids

### 9.1. Právní rámec smart grids sítí v ČR a EU

#### 9.1.1. Státní energetická koncepce

Státní energetická koncepce (SEK) je dokument, který stanovuje strategické cíle a priority státu v energetickém hospodářství s výhledem na 30 let. Tento dokument odráží zodpovědnost státu za stabilní energetickou politiku, efektivní užití energie, které nebude ohrožovat životní prostředí. Koncepce byla schválena vládou 10. 3. 2004 a ukotvena je v §3 zákona 406/2000Sb. O hospodaření energií.

Naplnování státní energetické koncepce vyhodnocuje Ministerstvo průmyslu a obchodu (MPO) nejméně jedenkrát za 5 let a o výsledcích vyhodnocení informuje vládu. V případě potřeby ministerstvo zpracovává návrhy na změnu státní energetické koncepce a předkládá je ke schválení vládě. [1]

#### 9.1.2. Aktualizace státní energetické koncepce

V únoru 2010 došlo k aktualizaci koncepce. Nově byly zařazeny partie věnující se sítím a principům inteligentních sítí (smart grids). Uvedené zmínky vedou na dvě samostatné části – a to část věnující se zákazníkům a měření jejich spotřeby a část věnující se řízení sítě.

#### Inteligentní měřicí zařízení a legislativní partie v SEK

V kapitole 4.3 [1] – Rozvoj síťové infrastruktury ČR v kontextu zemí střední Evropy, posílení mezinárodní spolupráce a integrace trhů s elektřinou a plynem v regionu včetně podpory vytváření účinné a akceschopné společné energetické politiky EU, se objevuje zmínka o inteligentních měřicích a to (článek 4): “Zajistit do roku 2020 vybavení až 80 % odběrných míst inteligentními měřicími systémy a jejich zapojení do řízení distribučních soustav na podkladě zpracované studie ekonomických dopadů do regulované složky ceny.”

V návaznosti na tento bod je v další části SEK více specifikovaná studie, podle které se bude rozhodovat o plošném nasazení měřičů. Konkrétně se zde píše, že je třeba vypracovat do roku 2013 analýzu instalace inteligentních měřicích systémů jako součást komplexu tzv. inteligentních sítí zajišťujících koordinaci decentralizovaného řízení distribučních soustav a stanovení ekonomicky efektivního rozsahu jejich implementace.

Na základě analýzy je třeba definovat v kodexech závazná pravidla pro vybavení odběrných míst těmito systémy a nezbytná pravidla a regulační rámce pro decentralizované řízení a navazující úpravy v odběrných zařízeních a současně vypracovat oddůvodňující zprávu vyžadovanou směrnicí 2009/72/ES (kapitola 6.1 – 9 v [1]).

Jaké dopady by měly mít kladné výsledky analýzy je uvedeno v kapitole 6.5, části 3 v [1].

Implementace inteligentních měřicích systémů v distribučních soustavách by měla přispět k efektivnímu chování a prostřednictvím cenových stimulů optimalizovat užití spotřebičů.

Na základě výstupů studie a po posouzení Energetickým regulačním úřadem (ERÚ) vypracuje Ministerstvo průmyslu a obchodu program implementace, který kodifikuje na úrovni sekundární legislativy a současně jej předloží Evropské komisi v souladu se směrnicí 2009/72/ES. Součástí studie a programu implementace bude analýza navazujících opatření v domácích rozvodech a instalacích umožňující maximální využití úsporných efektů.

V návaznosti na rozvoj inteligentních měřicích systémů zajistí ERÚ další rozvoj regulovaných tarifů a struktur, které budou s dostatečnou účinností promítat nákladové efekty v oblasti spolehlivosti a využití sítí do tarifů. V této souvislosti zváží odlišení sazeb za systémové služby pro konečné zákazníky podle charakteru spotřeby a možností přerušitelné, omezené dodávky.

Pomocí srovnávacích informačních systémů (kalkulátory, cenové analýzy a srovnání) a standardizace požadavků na informace a účtování zajistí orgány státní správy srozumitelnost cenových podmínek jednotlivých produktů pro konečné spotřebitele.

### **Nové přístupy k řízení sítě dle SEK**

Jde především o zajištění možných ostrovních provozů jak legislativními kroky, tak technickými prostředky, které budou schopny tento provoz zajistit a řídit.

V kapitole 4.5 [1] – Zvýšení energetické bezpečnosti a odolnosti ČR a posílení schopnosti zajistit nezbytné dodávky energií v případech kumulace poruch, vícenásobných útoků proti kritické infrastruktuře a v případech déletrvajících krizí v zásobování palivy, se v článku 8 píše: “Vybudovat řídicí systémy a propojení zajišťující ostrovní napájení elektřinou všech aglomerací nad 50 tisíc obyvatel.” V článku 9 se píše: “Zajistit implementaci systému inteligentních sítí a decentralizovaného řízení umožňující dálkové řízení všech zdrojů s výkonem nad 1 MW a významné části (až 80 %) spotřeby do roku 2020 na základě dříve provedené analýzy.”

V kapitole 5 v části zabývající se rozvojem přenosové soustavy je kladen důraz na zlepšení řízení a mezinárodní spolupráci. V rámci rozvoje přenosových sítí se má podporovat vybudování přiměřených technických prostředků obrany proti šíření síťových poruch a kontroly přetížení.

Pro distribuční sítě je zde výslovně uvedeno: “Zabezpečit schopnost distribučních sítí v případě rozpadu přenosové sítě pracovat střednědobě v ostrovních provozech a zajistit minimální úroveň dodávek elektřiny nezbytných pro obyvatelstvo a kritickou infrastrukturu. V této souvislosti zajistit aktualizaci územních energetických koncepcí krajů tak, aby směřovaly k zabezpečení schopností ostrovních provozů v havarijních situacích.”

“Implementovat soubor nástrojů umožňujících zapojení spotřeby i distribuované výroby elektřiny do decentralizovaného řízení a regulace soustavy (řízení malých domácích a lokálních zdrojů, selektivní řízení skupin spotřebičů, řízení akumulčních možností elektromobilů, atd.). V této souvislosti připravit vhodný systém

technického řízení, regulace a cenotvorných a tarifních mechanismů stimulující účast decentralizovaných zdrojů výroby a lokální spotřeby na řízení rovnováhy elektrizační soustavy.”

### **Řízení spotřeby a zatížení v domácnostech (inteligentní sítě - smart grids)**

Podporovat rozvoj inteligentních měřicích systémů a s tím související rozvoj systémů selektivního řízení spotřeby v domácnostech.

Zajistit rozvoj infrastruktury umožňující skupinové řízení spotřeby u zákazníků na úrovni nízkého napětí jako součást systémů inteligentní sítě.

Podporovat další rozvoj distribučních tarifů stimulující využívání řízení spotřeby u konečných zákazníků.

Využít synergických efektů budování společného systému měření napříč dodávkou jednotlivých energetických komodit (elektrina, plyn).

Speciální pozornost bude zaměřena na rozvoj řídicích systémů na úrovni přenosových i distribučních sítí. Na úrovni distribučních sítí zejména na rozvoj inteligentních sítí a využívání decentralizovaného řízení sítí, výroby a spotřeby, včetně možnosti řízení akumulace v elektromobilech. Na úrovni přenosových sítí pak na systémy řízení spolehlivosti soustav a jejich regionální integrace, systémy řízení rizik a na havarijní mechanismy řízení ostrovních subsystémů.

### **9.1.3. Legislativa vztahující se k smart grids sítím v EU**

V Evropské komisi se zřídil výbor pro inteligentní sítě, který vydává doporučení a nařízení pro Evropskou komisi, která to poté dále projednává a schvaluje.

Evropská pracovní skupina pro inteligentní sítě definuje inteligentní sítě jako elektrické sítě, které mohou efektivně začlenit chování a akce všech uživatelů na ně napojených – výrobců, spotřebitelů a těch, kteří představují obě skupiny – k zajištění ekonomicky efektivní, udržitelné energetické soustavy s malými ztrátami a vysokou úrovní jakosti a bezpečnosti a zabezpečení dodávek.

Za modernizovanou elektrickou síť je považována síť, do níž byla začleněna dvousměrná digitální komunikace mezi dodavatelem a spotřebitelem, inteligentní měření a monitorovací systémy. Inteligentní měření je obvykle nedílnou součástí inteligentních sítí.

Legislativa zahrnující smart grids sítě se dotýká zavádění inteligentního měření a služeb s tímto spojených a dále s legislativou ohledně elektromobility. Konkrétně se píše:

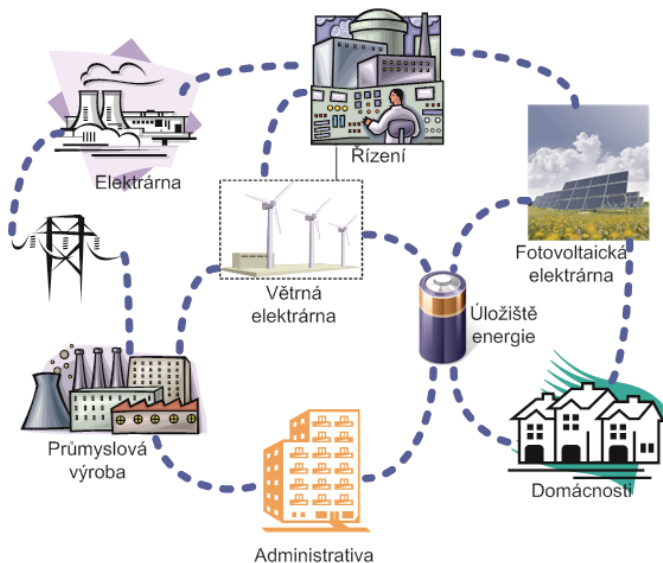
„Inteligentní sítě tak mohou významně přispět k nové strategii inteligentního a udržitelného růstu podporujícího začlenění, včetně cílů navrhovaných v rámci stěžejní iniciativy „Evropa účinněji využívající zdroje“ a evropských cílů v oblasti energie a klimatu, které jsou jádrem vnitřního trhu s energií. Ustanovení třetího balíčku a zejména přílohy I bodu 2 směrnice o elektrické energii (2009/72/ES) členské státy výslovně zavazují, aby posoudily zavádění inteligentních měřicích systémů jako klíčového kroku při realizaci inteligentních sítí a zavedly 80 % těch systémů, které byly zhodnoceny kladně. Inteligentní sítě jsou rovněž považovány za způsob, jak mohou členské státy splnit své závazky související s prosazováním

energetické účinnosti. Vedle toho vyzývá směrnice o energetické účinnosti u konečného uživatele a o energetických službách (2006/32/ES), jejíž revizi Komise právě zvažuje, k měření, které přesně odráží skutečnou spotřebu energie konečného spotřebitele a poskytuje informace o skutečném čase využívání. Evropská rada v únoru 2011 uznala významnou úlohu inteligentních sítí a vyzvala členské státy, aby ve spolupráci s evropskými normalizačními orgány a průmyslem „urychlily práci na přijetí technických norem pro systémy nabíjení elektrických vozidel do poloviny roku 2011 a pro inteligentní sítě a měřicí přístroje do konce roku 2012“. Ve sdělení Komise „Plán přechodu na konkurenceschopné nízkouhlíkové hospodářství do roku 2050“ jsou inteligentní sítě v dlouhodobém horizontu identifikovány jako klíčový prvek pro budoucí nízkouhlíkový systém výroby elektřiny, který napomáhá účinnosti na straně poptávky, zvyšuje podíl energie z obnovitelných zdrojů a decentralizované výroby energie a rovněž umožňuje elektrifikaci dopravy.

Dále se legislativa potýká s problémy se shromažďováním údajů z inteligentních měřidel a zákonem na ochranu osobních údajů. Konkrétně směrnice 95/46/ES, která je základem právních předpisů o zpracování osobních údajů. Jsou-li zpracovávány údaje technické a nevztahují se na identifikovanou či identifikovatelnou fyzickou osobu, mohli by provozovatelé distribučních systémů, inteligentních měřicích přístrojů a společnosti poskytující energetické služby zpracovávat tyto údaje tak, aniž by potřebovali předchozí souhlas uživatelů sítí.

## 9.2. Smart Grids

Cílem nové struktury je přejít k řízení sítě podobné jako je struktura dnešního internetu. Na *obr. 9.1* je zobrazen model sítě smart grids.

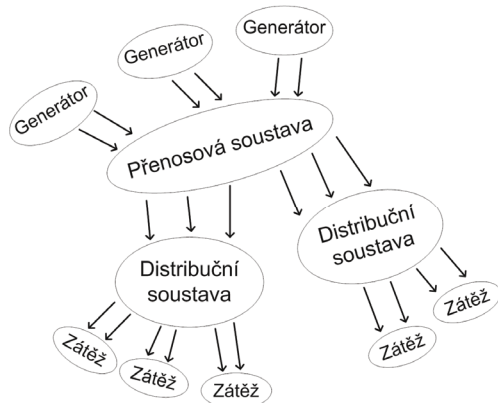


**Obr. 9.1: Inteligentní síť (Smart grids)**



Pojem smart grids lze definovat jako inteligentní, samočinně se regulující elektrické sítě, schopné přenášet vyrobenou energii z jakéhokoli zdroje centralizované i decentralizované výroby elektrické energie až ke koncovému zákazníkovi.

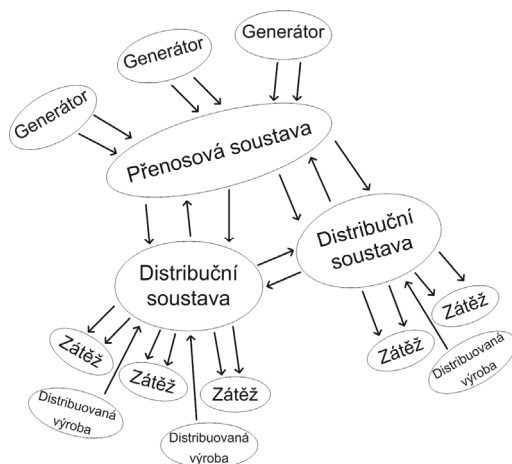
Rozdíl mezi sítí smart grids a klasickým modelem sítě, jak ho známe dnes, je vidět na obr. 9.2 a 9.3. Klasické schéma (obr. 9.2) začíná u výroby elektrické energie, dále pokračuje přes přenosovou soustavu (v ČR 400, 220 a 110 kV) a distribuční soustavu (nejčastěji 22, 6 a 0,4 kV) do míst spotřeby energie, jako jsou průmyslové objekty, administrativní a nákupní centra a rodinné sídla.



**Obr. 9.2: Stávající elektrická soustava**

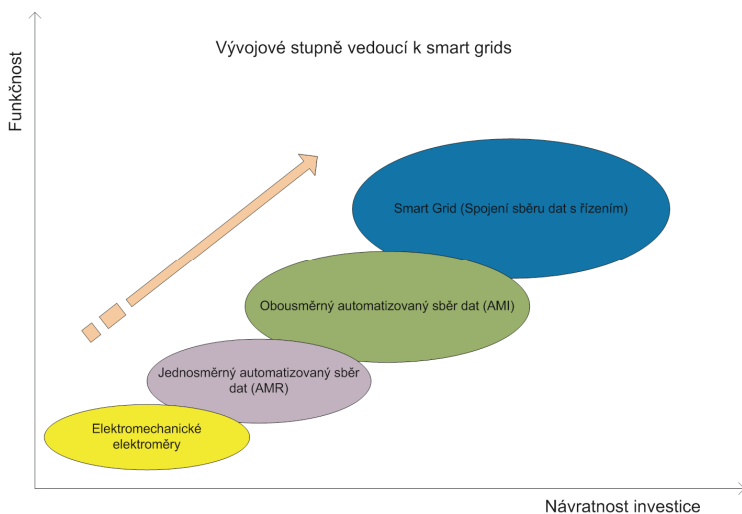
Naopak, stavba budoucích sítí se nebude držet klasického schématu, ale využije se principu počítačové sítě. Tedy, bude jedno, jak se co a kam zapojí a vše se bude řídit automaticky. Tím se zajistí větší spolehlivost dodávky elektřiny, protože při výpadku jedné části se bude moci dodávka přepojit a bude se dodávat z jiné strany (jako u počítačových sítí, dojde-li k výpadku jednoho routeru, nedojde k odpojení spojení, ale signál se pošle přes jiné routery).

Smart grids umožní maximální využití elektrické energie z jakéhokoli výrobního zdroje. Jsou schopny sofistikovaně reagovat na možné nesouměrné parametry, které se při provozu distribuční soustavy mohou vyskytnout. Jedná se zejména o špatné napěťové poměry, přetížení sítě, nesouměrné zatížení třífázové soustavy nebo případný deficit výkonu.



**Obr. 9.3: Energetická soustava založená na principech Smart Grids**

Na obr. 9.4 je vidět, jak docházelo a dochází k vývoji smart grid sítě. Na svislé ose je vynesena funkčnost jednotlivých prvků a na ose horizontální jejich cena. Na začátku se pracovalo s elektromechanickými elektroměry, které jsou z dnešního pohledu levné, ale neperspektivní. Pracovník distribuční společnosti musí obcházet každý elektroměr a odečítat hodnotu. Na dalším stupni je jednosměrný automatizovaný sběr dat (AMR), který je v současné době předstupněm obousměrného sběru dat (AMI), na kterém se pracuje a již se zavádí do praxe. Náklady jsou zde vyšší, neboť je třeba zaplatit vývoj takového elektroměru, ale budoucím ziskem je úspora lidské činnosti na odečet.



**Obr. 9.4: Stupně vedoucí k smart grids**

Posledním stupněm by poté měla být síť smart grid, která v sobě spojí sběr dat a zároveň řízení sítě a spotřeby. V této části je uvažováno právě o zapojení

zákazníků do systému hromadného dálkového ovládání tím, že si nakoupí chytré elektrospotřebiče a jejich řízení bude ponecháno na smart elektroměru, který v případech, kdy to půjde (myčka nádobí, pračka či sušička) dohlédne na jejich spuštění v nízkém tarifu (menším odběru). Tím dojde k rozložení spotřeby i do míst, kde je přebytek energie a tento přebytek se sníží a sníží, a sníží se i špička odběru

Koncepce smart grids má mnoho pozitivních efektů. Jedním z mnoha je úspora emisí CO<sub>2</sub> (díky efektivnější výrobě, ať již klasických nebo obnovitelných zdrojů a také plánovanému optimalizovanějšímu provozu), dále úspora primárních vstupů (uhlí, ropa, plyn). Nejvýraznější efekt má úspora finanční, která je hnacím motivem pro zavádění tohoto konceptu. Konečný zákazník je motivován právě finančním bonusem a na pozadí těchto motivací je poté ekologický aspekt a přístup k trvale udržitelnému rozvoji.

Díky výborným vlastnostem elektřiny jako energetického média (oproti plynu, ropě – problém s dopravou, ekologií) získává navrch v jiných oblastech, než bylo doposud zvykem. Začíná se prosazovat i na úkor petrochemických firem – především v rozvoji elektromobility.

### 9.2.1. Elektroměry

Pro budoucí zavedení sítí smart grids spolu s jejich koncepcí řízení bude třeba zajistit čtení všech energetických dat v reálném čase. Prvním a základním krokem je nasazení inteligentních elektroměrů. Veškeré rozhodování o aktuální bilanci elektřiny se děje na základě aktuálně shromážděných údajů o spotřebě a výrobě.

V současné době se nasazují inteligentní elektroměry do systému AMI (z anglické zkratky Automated Meter Infrastructure). Tento systém pomocí AMM (z anglické zkratky - Automated Meter Management) na vyžádání nebo v rámci pevného naprogramování sbírá a potom dále posílá naměřená data z elektroměrů, které mají u sebe nainstalované zákazníci. Odečítají se jak aktuální hodnoty, tak i čtvrt-hodinové hodnoty.

#### Přínos pro zákazníka

Ke každému takovému odečtenému údaji je v systému distributora zaveden uživatelský účet, který se plánuje zpřístupnit v blízké době přes internet a zákazník tak bude moci sledovat svou spotřebu on-line, stejně jako dnes může sledovat např. své internetové bankovníctví. Zákazník tak bude mít přehled o své spotřebě. Na základě těchto znalostí bude moci změnit své chování, co se spotřeby elektřiny týče. Např. přesune spouštění energeticky náročných procesů (myčka, pračka, apod.) do oblasti mimo největší špičku odběru energie, tedy mimo nejdražší pásmo platby za elektřinu.

V blízké budoucnosti budou mít zákazníci v domácnosti informační smart displej, na kterém také uvidí aktuální spotřebu, případně statistická vyhodnocení svého energetického chování. Pokud by se v budoucnu přešlo na nákup elektřiny přes předplatný systém, zákazník na tomto displeji uvidí výši zbývajících kreditů (jednálo by se o podobný systém, jako předplatné u mobilních operátorů).

## **Přínos pro distributora**

Pro distributora má zavedení inteligentních elektroměrů přínos v úspoře nákladů za odečet z elektromechanických elektroměrů. Dříve bylo nutné obejít každé odběrové místo a manuálně zjistit stav. Díky infrastruktuře AMI již toto není nutné.

Díky integrovanému odpojovacímu relé bude mít distributor možnost dálkově odpojit zákazníka, který například po určité období neplatí za odběr elektrické energie. Dalším účinným nástrojem distributora je možnost kontroly, zda někdo neodebírá elektrickou energii tzv. "na černo". To lze díky odečtu v jednom daném okamžiku u všech zákazníků připojených na jednu distribuční stanici a zároveň odečtu dodávaného výkonu v distribuční stanici napájecí dané zákazníky.

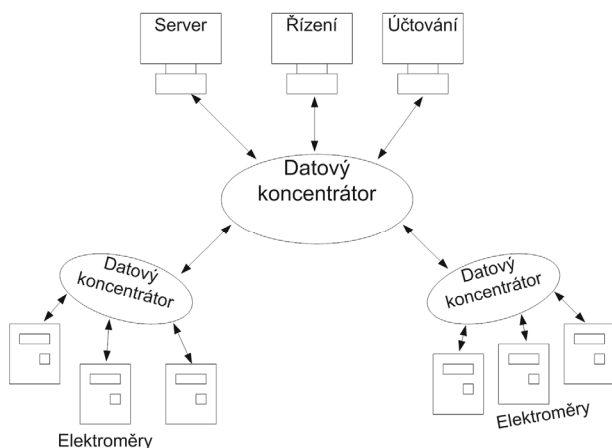
## **Prvky zajišťující novou strukturu**

Aby byla zajištěna správná funkce konceptu AMI, je nutné současnou infrastrukturu modernizovat. Inteligentní měření pro správnou funkci potřebuje obousměrnou komunikaci mezi měřidlem a centrálou distributora.

V energetických aplikacích je třeba zajistit správnou komunikaci mezi miliony uzlů. Nejprve se musí zajistit správná komunikační cesta mezi inteligentním elektroměrem a datovou centrálou distributora. Vybrat optimální cestu a způsob komunikace je základem. Taková optimalizace několika odběrných míst může trvat i několik dnů.

Velkou výhodou inteligentní infrastruktury je, že každý prvek v síti má jednoznačnou identifikaci, tedy lze přesně identifikovat každé koncové zařízení. Tím se otevírají možnosti zmíněné výše, např. možnost odpojení odběrného místa na dálku.

Na *obr. 9.5* je znázorněna základní topologie inteligentní sítě. Data z elektroměrů jsou shromažďována v datových koncentrátorech. Přenos těchto dat je možný několika způsoby. Data se přenáší buď po silovém vedení (komunikace PLC – power line communication), po síti LAN, wi-fi, nebo přes GPRS. Již v této fázi přenosu informací se musí zajistit bezpečnost a šifrování dat, aby nedošlo k nežádoucímu odposlechu a zneužití. Tento problém je také předmětem mnoha diskuzí – především bezpečnost přenosu a nakládání s daty – také legálnost jejich ukládání (zde se místy objevuje střet se zákonem na ochranu osobních údajů).



**Obr. 9.5: Topologie inteligentní sítě**

Datový koncentrátor je zařízení sloužící ke sběru dat v předem definovaných časových okamžicích, v reálné době a nebo na vyžádání. Takovéto zařízení slouží zároveň také jako místo, kde se ukládají a zálohují data. V systému inteligentního měření je takovýchto datových koncentrátorů několik. Ty základní jsou na úrovni panelového domu, nebo na úrovni několika odběrných míst v ulici. Sdružují několik desítek elektroměrů. Nad těmito koncentratory v první řadě jsou další koncentratory sdružující data z předchozích úrovní tak, aby nedošlo k zahlcení sítě, případně ke ztrátě nějakých dat při přenosu a zpracování. Další funkcí datového koncentrátoru je přijímání zpráv od nadřazeného pracoviště a předání těchto zpráv podřízeným elektroměrům. Jedná se zejména o pokyny k odpojení elektroměru a vyžádání si aktuálních hodnot.

Na konci celého řetězce přenosu informací je řídicí systém distributora elektrické energie. Ten zajišťuje dohled a správu nad celou sítí, dále zpracování dat a fakturaci za spotřebovanou elektrickou energii.

Distributor zde má server, který zajišťuje a řídí odečty spotřeby. Zajišťuje ověření správnosti měření (porovná odečtený údaj s předchozím). Zpracovává automaticky statistiky – výkaz spotřeby za den, týden, měsíc nebo rok.

Další systém je předávání dat zainteresovaným stranám na trhu s elektrickou energií. Předávají se zákonná data operátorovi trhu elektřinou (OTE, a.s.), obchodníkům s elektrickou energií, zákazníkům a dalším.

SCADA systém umožňuje zobrazovat provozní informace o soustavě. Distributor zde může sledovat zatížení v dané lokalitě nebo v daném čase. Případně při poruše systém zobrazí hlášení, kde k poruše došlo a informacemi nutnými pro brzkou opravu. Tento systém také umožňuje dálkové odpojení zákazníka.

Řízení umožní upozorňovat na nutnou regulaci odběru (přetížení sítě, špičkový výkon, apod.). Další informace může být upozornění na překročení limitů sjednaných pro účinník, což je penalizováno. Tento systém je také připraven na další rozšíření smart grids sítě – rozšíření o více tarifů (zlepšení využití systému HDO).

### 9.2.2. Systém HDO a jeho další využití

Systém HDO (hromadné dálkové ovládání) se u nás využívá již několik desítek let. Slouží pro regulaci spotřeby elektrické energie. Zodpovědnost za odchylku se přenáší na zákazníka, neboť ten si může velké spotřebiče energie (elektrotopení, ohřev vody, apod.) sepnout až ve chvíli, kdy mu to distributor povolí (tedy v čase mimo špičku odběru el. energie). Regulace spotřeby elektrické energie je nutná, protože spotřeba se v průběhu dne mění. Aby nebylo nutné posilovat výrobní kapacity elektráren a zvyšovat přenosovou schopnost vedení kvůli několika hodinám poptávky po elektřině v době špičky, vznikla myšlenka přesunout provoz elektrotepelných spotřebičů do doby nízkého zatížení elektrizační soustavy s pomocí zařízení HDO.

Signálu HDO se využívá nejen v domácnostech, ale i v průmyslových podnicích. V rozvodu průmyslového objektu se takto dají spínat nevýrobní zařízení – např. klimatizační jednotky, vodní hospodářství, aj. Jiné využití systému je pro sepnutí veřejného osvětlení, dopravních značek, osvětlení výloh nebo pouličních reklam.

Systém HDO využívá ke komunikaci a pro přenos informací silové vedení. Principem je umístění vysílače signálu do každé fáze v rozvodnách distribuční sítě (110/22 kV) do sítě 22 kV. Vysílač signálu vysílá impulsní tvar kódu nasuperponovaný na základní frekvenci 50 Hz. Signál je v ČR nejčastěji modulován na frekvencích 183,33; 216,66; 283,33; 760 a 1060 Hz. Takovýto signál prochází přes transformátory až k zákazníkovi, který má vedle elektroměru (v tomto případě vícetarifového) umístěn přijímač. Přijímač podle došlého pokynu vypne nebo sepne všechny spotřebiče, které jsou k tomuto přijímači přes stykač připojeny (nejčastěji elektrotopení, ohřev teplé vody) a zároveň přepne měření spotřeby na elektroměry v nižší sazbě.

Současné přijímače HDO dokáží pracovat samostatně, aniž by musely obdržet pokyn k sepnutí či vypnutí. Řídí se vlastním nastaveným programem, který jim distributor dokáže na dálku změnit (stejným principem, jako když vysílá signál sepnout vypnout).

Systém se začal rozvíjet z důvodu přesunu spotřeby do pásma levnější výroby elektřiny – mimo špičku. To je dnes i jeden z cílů nasazení smart grids. V blízkém období plánují distributoři nasadit "vícetarifový" systém HDO – tím se myslí systém, který bude mít několik pásem podle aktuálního zatížení energetické soustavy. Zákazník si bude moci navolit jednotlivé spotřebiče do daných pásem. Lze to ukázat na příkladu myčky nádobí. Zákazník si tento spotřebič umístí do pásma s nejlevnější elektřinou (tedy tam, kdy je síť nejméně zatížena). Poté, co zákazník spotřebič zapne, čeká, na pokyn distributora, že je cena elektrické energie nejnižší. Zákazník bude mít samozřejmě možnost spustit spotřebič i v době, kdy on to potřebuje (znevýhodněn bude vyšší cenou za elektrickou energii). Tento stav by měl ještě více motivovat zákazníky přesouvat energeticky náročnější spotřebu do oblastí s převisem nabídky elektrické energie (ještě se více přenese zodpovědnost za odchylku na zákazníka).

Výhoda systému HDO je také v reakční době. Po vydání pokynu může sepnout relativně velká oblast. Namísto současně plánovaných inteligentních elektroměrů, které by v sobě měly integrovaný systém HDO a jejich jednotlivé spuštění

(díky jedinečnému identifikátoru) by v současné době trvalo o mnoho déle. S vývojem nových algoritmů a řízení ovšem tato překážka může být překonána. Omezením HDO bylo také to, že ho mohl ovládat pouze distributor, nově by tuto pravomoc mohl mít i operátor přenosové soustavy k vyrovnaní bilance poptávky a nabídky v rámci ČR.

Všechny nové přínosy rozšíření systému HDO a jeho flexibilnější nasazení budou možné pouze za předpokladu, že distributor bude moci nabídnout vícetarifové účtování. S tím ovšem velmi úzce souvisí legislativa, která se pro tuto možnost teprve projednává v odborných kruzích.

### 9.3. Elektromobilita

V rámci konceptu smart grids je elektromobilita jedním ze základních viditelných aplikací, která svou koncepcí výrazně přispěje k řízení elektrizační soustavy.

Elektromobilem rozumíme automobil poháněný elektrickým motorem napájeným z dobíjecích baterií. Chemická energie baterií je transformována na energii mechanickou, která je následně použita v pohonu automobilu. Počátek rozvoje elektromobilů sahá už do 1. poloviny 19. století, kdy bylo sestaveno v roce 1839 první elektrické vozidlo. K dalšímu rozvoji došlo na přelomu 19. a 20. století, v té době se poprvé objevují na silnicích. Elektromobil byl navíc prvním vozidlem, které v roce 1899 překonalo rychlost 100 km/hod. Přes tuto skutečnost byly elektromobily zejména díky levné ropě a omezeným možnostem baterií nahrazeny vozidly se spalovacím motorem.

V poslední době dochází k opětovnému rozvoji elektromobility a to z důvodu ubývajících zásob ropy a snížení ekologické zátěže životního prostředí. Za tímto účelem vzniklo v Evropské unii již několik iniciativ a se vzrůstajícím podílem elektromobilů počítá i Státní energetická koncepce ČR. K zavedení elektromobilů přispívá i rozvoj technologií akumulátorů. Baterie mají v současné době výrazně vyšší kapacitu, jsou lehčí a jejich životnost byla značně prodloužena. Technologický rozvoj navíc umožnil zdokonalení řízení dobíjení, vyšší rychlost obnovení kapacity a zároveň snížení pořizovací ceny.

Jednou z výhod elektromobilů je ekologičnost jejich provozu, kdy je jízda nehlukná a nedochází k uvolňování škodlivých plynů jako je např. CO<sub>2</sub>. Jelikož se však elektřina potřebná pro nabití akumulátorů nezdědka vyrábí v uhelných elektrárnách, stane se elektromobil plně ekologickým pouze tehdy, bude-li poháněn výhradně energií z obnovitelných zdrojů (např. palivovými články). Mezi další výhody lze řadit fakt, že elektromobily pracují s vyšší účinností než běžné automobily. V případě asynchronního motoru je možné převést energii na pohyb s 90 % účinností. Celková účinnost elektrického pohonu závisí navíc také na energetické účinnosti použitých akumulátorů nebo palivových článků. Dle použité technologie (NiMH, Li-ion nebo Li-pol) se účinnost elektromobilu pohybuje kolem 50 ÷ 80 %, zatímco v případě spalovacího motoru je to pouze 30 ÷ 40 %. Z dalších výhod lze zmínit jednoduchou konstrukci elektromotoru, což se projeví v nižších nákladech na údržbu a možnost rekuperace kinetické energie jedoucího vozidla.

Za nejčastěji zmiňovanou nevýhodou elektromobilů je označována jejich krátká dojezdová vzdálenost (akční rádius), která je závislá na typu baterie a pohybuje se průměrně kolem 150 km. Další nevýhodou je vysoká pořizovací cena nového

elektromobilu, současným trendem je proto koupě automobilu se spalovacím motorem a jeho následná přestavba na elektromobil. Jako další nevýhodu elektromobilů je možné uvést nedostatečně rozvinutou infrastrukturu dobíjecích stanic. Lze však poznamenat, že se v ČR v současné době nachází více než 130 dobrovolných dobíjecích stanic, které budou v budoucnu doplněny profesionálními stanicemi.

Rozšířením elektromobilů by se zvětšily možnosti distributora, jak řídit elektrizační soustavu. V případě poklesu poptávky by získal možnost vydat pokyn a začít nabíjet tyto elektromobily. Naopak v případě vzrůstu poptávky nebo výpadku výrobního bloku by mohl čerpat z baterií těchto automobilů a rychle si vypomoci, než by najely záskokové zdroje. To je ovšem nutné nejprve ošetřit po legislativní, ale i technické stránce. Nesměl by takovouto energii vyčerpat úplně, aby nebyl omezen zákazník (uvažuje se, že by využíval energii baterie mezi  $75 \div 100 \%$ ).

## 9.4. Ukládání energie

Jedním z důvodů, proč se dnes hovoří o skladování elektrické energie je masivní nasazování obnovitelných zdrojů. Dalším důvodem je možnost vykrývání diagramů spotřeby energie tak, že v době špiček se použije uložená energie a naopak, když není spotřeba, tak se energie ukládá. Doposud nejlepším a nejpožívanějším způsobem ukládání jsou vodní přečerpávací elektrárny.

Přečerpávací elektrárna v době útlu spotřeby (typicky v brzkých ranních hodinách) pracuje v motorickém režimu, tedy spotřebovává elektřinu na načerpání vody z dolní nádrže do nádrže horní (zásobníku). Když přijde požadavek od operátora na výrobu elektřiny z důvodu vykrytí špičky odběru nebo výpadku většího zdroje v soustavě, tak přečerpávací elektrárna přejde do generátorického režimu, kdy se voda vypouští přes turbíny z horní do dolní nádrže.

Výhodou tohoto skladování energie je vysoká účinnost, rychlá doba nasazení a velký výkon, který je takto uložen. Nevýhodou jsou poté ekologické aspekty výstavby takového akumulátoru.

### 9.4.1. Elektrochemické akumulátory

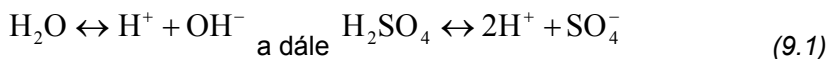
Také známé pod pojmem baterie, využívají principu přeměny elektrické energie na energii chemickou. Tu je pak třeba v případě potřeby transformovat zpět na elektrickou.

Baterie je soubor článků řazených do série, protože jeden článek má napětí v rozmezí  $1,2 \div 3,7$  V podle druhu článku. Tím se dosáhne vyššího napětí.

Nejběžnější používaný typ pro energetické aplikace je olověný akumulátor. V obalu jsou umístěny do série propojené kladné a záporné olověné desky oddělené od sebe separátorem. Mezi nimi je jako elektrolyt použita zředěná kyselina sírová. Přesné umístění elektrod a elektrolytu je různé u různých výrobců, kteří se snaží prodloužit životnost těchto baterií, zmenšit vnitřní odpor a zabránit samovolnému vybíjení.

Jaké jsou chemické pochody uvnitř akumulátoru při vybíjení a nabíjení? Vodný roztok kyseliny sírové se rozpadá vlivem elektrolytické disociace na systém volně rozptýlených iontů (horní index plus je kladný iont (kationt), mínus záporný iont (aniont)) dle rovnice:





Jednotlivé ionty se pak účastní vlastního nabíjení a vybíjení a reagují s aktivními hmotami elektrod.

Stav nabití či vybití akumulátoru lze zjistit změřením hustoty elektrolytu. Plné nabití odpovídá hustotě  $1,28 \text{ g/cm}^3$ . Dnes se toto u otevřených baterií měří hustotoměrem, případně jsou-li baterie zavřené, mají indikátor nabití integrovaný ve víku nádrže.

### Vybíjení

Proud prochází od záporné elektrody ke kladné. Na kladné elektrodě probíhá následující děj:



(vzniká čtyřvalentní iont olova)



(čtyřvalentní olovo redukuje 2 elektrony na dvojvalentní)



(dvojvalentní olovo reaguje a vzniká síran olovnatý)



(vznikají 4 molekuly vody)

Na záporné elektrodě probíhá oxidační děj:

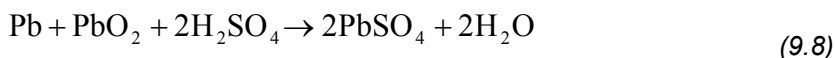


(vzniká dvojvalentní olovo a uvolňují se 2 elektrony)



(dvojvalentní olovo reaguje a vzniká síran olovnatý)

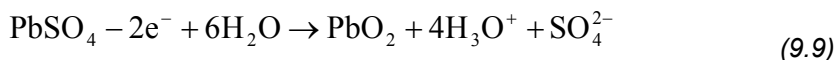
Celkový zápis výše uvedených vybíjecích procesů představuje rovnice:



## Nabíjení

Nabíjení akumulátoru je opačný děj než vybíjení. Síran olovnatý se přeměňuje na aktivní hmoty. Na kladné elektrodě se tvoří červenohnědý oxid olovičitý, na záporné šedé houbovitě olovo, přičemž do elektrolytu se vylučuje kyselina sírová, elektrolyt houstne.

Proces na kladné elektrodě:



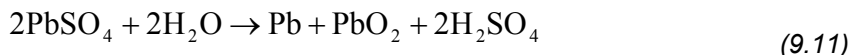
(síran olovnatý oxiduje na oxid olovičitý)

Proces na záporné elektrodě:



(síran olovnatý redukuje na olovo)

Celkový zápis výše uvedených nabíjecích procesů představuje rovnice:



Ukládání elektřiny do baterií nabývá na významu hlavně v důsledku rozvoje elektromobility. S plánovaným nasazením elektromobilů do provozu vzroste počet akumulátorů v síti. S plánovanou změnou legislativy a zapojením zákazníků tak dostává distributor do ruky nástroj, jak vyrovnávat diagram zatížení. V době přebytku uloží energii do baterií (elektromobilů), v případech nouze a nebo k vykrytí rychlého poklesu bude moci zase zpětně krátkodobě využít tuto uloženou energii. Ovšem musí zajistit, aby baterie nevybil příliš, tedy, aby zákazník mohl elektromobil bez obavy využít (distributor by například využíval energii mezi 75 ÷ 100% nabití akumulátorů).

### Typy akumulátorů:

Pb akumulátory – olovené akumulátory patří mezi nejstarší, nejznámější a nejvíce rozšířené. Mají větší odolnost vůči nízkým teplotám, dále jsou bezpečnější (nejsou výbušné) a také jejich cena patří k nejnižším. Nevýhodou jsou zejména ekologické aspekty – práce s kyselinou, olovem a kadmii. Jsou nahrazovány Li-ion akumulátory, které však nelze použít ve všech aplikacích.

NiCd akumulátory - kladná elektroda alkalického akumulátoru v nabitém stavu je tvořena oxo-hydroxidem nikelnatým  $\text{NiO}(\text{OH})$ , který při vybíjení přechází na hydroxid nikelnatý. Záporná kadmiová elektroda při vybíjení reaguje s kyslíkem za vzniku  $\text{CdO}$ . Elektrolytem je rozpuštěný hydroxid draselný ve vodě. Napětí jednoho článku je 1,2 V. NiCd baterie lze použít pro krátkodobou zálohu a jejich příbuzný typ NiMH v přenosných zařízeních.

Li-ion akumulátory - katoda Li-ion akumulátorů tvoří oxid kovu ( $\text{LiCoO}_2$ ), anoda je z uhlíku s vrstevnatou strukturou. Elektrolyt tvoří lithná sůl ( $\text{LiPF}_6$ ) rozpuštěná

v organickém karbonátu. Při nabíjení lithiové ionty interkalují do vrstevnaté struktury uhlíkové elektrody. Li-ion akumulátory mají velkou hustotu energie i účinnost se jmenovitým napětím 3,6 V. Nedostatkem je vysoká cena a škodlivost hlubšího vybíjení projevující se snižováním životnosti baterie. Díky malé velikosti a hmotnosti jsou Li-ion akumulátory vhodné pro použití v přenosných zařízeních a pro krátkodobé zálohování.

### 9.4.2. Superkondenzátory

Jejich vlastností je možnost uschování velkého množství energie během velmi krátké chvíle. Oproti akumulátorům se zde energie neuchovává v chemickém procesu, ale díky fyzikálním principům. Elektrostatická síla udrží náboj na povrchu elektrod. Elektrody bývají tvořeny uhlíkem s velkým specifickým povrchem (kolem 1000 m<sup>2</sup>/g), elektrolyt je buď na vodné bázi neboje tvořen bezvodným organickým rozpouštědlem. Svorkové napětí se pohybuje v rozmezí od 1 - 1,2 V ve vodném a 2,5 - 3 V v organickém elektrolytu.

Nevýhodou superkondenzátorů je jejich samovybíjení. Výhodou naopak je značná cyklovatelnost. Superkondenzátory se velice dobře hodí na krátkodobé pokrytí špičkových proudů.

V dnešní době se objevují hybridní systémy spojující výhody akumulátorů a superkondenzátorů. Použitím tohoto systému se zmenší velikost akumulátorů, které by jinak byly potřeba. Spojením také vzrůstá hustota energie hybridního zdroje. Dalším přínosem je, že superkondenzátor poskytuje nárazovou energii v případech požadavku na dodání velkého proudu – např. ve využití v elektromobilitě při rozejzdu, akceleraci, startování a rekuperaci energie.

Protože ultrakondenzátory mají mnohem nižší vnitřní odpor a mnohem vyšší rychlost nabíjení než akumulátory, zajišťují mnohem efektivnější provoz akumulátorově napájených systémů. Superkondenzátory prodlužují životnost akumulátorů, protože nesou hlavní nápor práce při prvním spuštění zátěže a umožňují akumulátoru přebírat napájení zátěže postupně, což zabraňuje rychlému odběru proudu z akumulátoru. Zamezení vysokému proudovému odběru z akumulátoru snižuje jeho tepelné, chemické a mechanické zatížení. Omezení proudových špiček prodlužuje v závislosti na aplikaci životnost akumulátoru.

Superkondenzátory fungují v širším rozsahu klimatických podmínek než akumulátory a jejich komfortní rozsah činí 70 °C až -40 °C. U akumulátorů se uvádí pracovní rozsah 60 °C až -20 °C, ovšem při teplotách pod nulou ztrácejí většinu dostupné energie. Superkondenzátory rovněž nabízejí vyšší počet cyklů. Akumulátory využívají chemickou reakci a jejich životnost znamená stovky až několik tisíc cyklů. Superkondenzátory ukládají energii v elektrostatickém poli a nabízejí více než milion cyklů. Superkondenzátory mají účinnost 95 až 98 %, zatímco olověné akumulátory nabízejí maximálně 70 %.

### 9.4.3. Setrvačníky

Dalším možným způsobem, jak ukládat špičkovou energii jsou setrvačníky. Výhodou oproti jiným způsobům skladování energie je jejich jednoduchost a minimální ekologická zátěž okolí.

V tomto zařízení se kinetická energie ukládá do otáčející se hmoty rotoru. Podle otáček se pak rozlišují setrvačníky nízkootáčkové a vysokootáčkové. Množství uložené energie se pak spočítá:

$$E_k = J\omega^2 \quad (9.12)$$

U válcového rotoru je moment setrvačnosti dán hmotností setrvačníku a poloměrem, úhlová rychlost je limitována pevností. Materiály s nízkou hustotou umožňují vyšší rychlosti, a tudíž mohou uložit více energie na jednotku hmotnosti i objemu.

Vysokootáčkové setrvačníky mají rotory vyrobené z plastů vyztužených vlákny a vydrží rychlosti více než 100 000 otáček za minutu.

Hlavní výhodou setrvačníku je, že mohou být připojeny a dodávat, případně odebírat energii během pár vteřin. Setrvačníky v tomto zařízení rotují rychlostí cca 16 000 ot/min, což znamená povrchovou rychlost okraje cca 2 machy (dvakrát rychleji než zvuk). Proto se setrvačníky nacházejí ve vakuu, aby se omezilo jejich tření a další energetické ztráty. Aby se také omezilo tření v ložiscích, využívá se principu levitace za pomoci permanentních magnetů a elektromagnetických ložisek. Největší setrvačníky mají výkony kolem 1,6 MW po dobu 10 s.

#### 9.4.4. Systém uchování stlačeného vzduchu

Na podobném principu, jako funguje přečerpávací elektrárna pracuje i systém ukládání stlačeného vzduchu. Tento projekt je pod zkratkou CAES (Compressed Air Energy Storage) znám již od 70. let.

V době nízkého odběru elektřiny se tato energie využívá na pohon kompresoru, který stlačí vzduch do podzemních zásobníků. Naopak, v době potřeby energie je tento vzduch vypouštěn přes turbínu, která roztáčí generátor vyrábějící elektřinu.

Nevýhodou tohoto systému je, že stlačením vzduchu dochází k jeho ohřívání a toto teplo se musí odvádět. Naopak, při jeho vypouštění se vzduch ochlazuje a zařízení musí být ohříváno. Zde se musí uvažovat s rekuperací tepla, která tento proces zefektivní.

Pro skladování plynu se využívá vytěžených vrtů po zemním plynu, kde je zaručena vzduchotěsnost (tedy vzduch nebude unikat do okolí). Účinnost takového skladování se pohybuje kolem 50 %.

#### 9.4.5. Palivový článek

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které přímo přeměňuje chemickou energii paliva a okysličovadla na energii elektrickou. Palivový článek je v principu galvanický článek, skládá se ze dvou elektrod, které jsou odděleny membránou a nebo elektrolytem. Elektrody se neúčastní chemické reakce mezi aktivními materiály, je tedy možné provozovat články teoreticky neomezenou dobu. Životnost je pak prakticky omezena pouze životností samotných elektrod. Funkce elektrod v elektrochemické reakci těchto systémů je pouze katalytická, což je hlavní rozdíl oproti primárním a sekundárním zdrojům.

Chemická reakce:

Na anodě:



Na katodě:



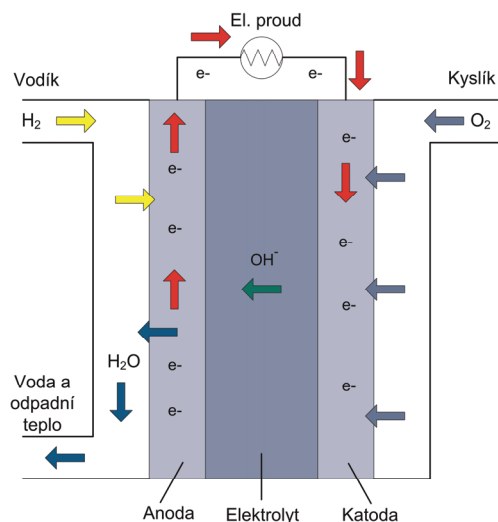
Souhrn:



Při reakci dochází ke spotřebovávání paliva (vodíku) na anodě a oxidantu (kyslíku) na katodě – to platí pro dnes nejpoužívanější systém, a sice článek kyslíko-vodíkový. Schematicky je princip palivového článku zachycen na *obr: 9.6*.

Vcelku výrazná nevýhoda palivového článku je jeho pomalá reakce na změnu zátěže, což vede k tomu, že palivový článek není schopen dostatečně rychlé odezvy na změnu proudových nároků. V praxi by to pak znamenalo omezení využitelnosti na aplikace s předpokládaným konstantním odebíraným proudem. Tento nedostatek je v současnosti odstraňován použitím paralelně řazeného velkého elektrochemického kondenzátoru nebo akumulátoru.

V současné době je známa celá řada typů palivových článků, které lze dělit podle nejrůznějších kritérií.



**Obr. 9.6: Schéma palivového článku**

V následujícím výčtu jsou uvedeny pouze ty nejvýznamnější.

- Alkalický palivový článek (AFC – alkaline fuel cell)
- Palivový článek s polymerním elektrolytem (PEFC – polymer electrolyte fuel cell)
- Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC – phosphoric acid FC)
- Methanolový palivový článek (DMFC – direct methanol fuel cell)
- Palivový článek s roztavenými uhličitany (MCFC – molten carbonate fuel cell)
- Palivové články s tuhými oxidy (SOFC – solid oxide fuel cell)

Účinnost palivových článků je závislá na mnoha vnějších i vnitřních parametrech, které závisí na zvoleném typu článku, ale i aplikaci. Laboratorní účinnost je samozřejmě vyšší než účinnost reálná. V praktických aplikacích se pohybuje cca od 45 % do 60 %, při využití odpadního tepla může být vyšší.

Výhody:

- Vysoká účinnost energetické transformace
- Modulární koncepce – realizace různých výkonových celků při takřka stejné účinnosti
- Nízké emise škodlivých látek
- Vysoká bezporuchovost
- Variabilita volby paliva – možnost využití různých plynných paliv
- Velmi tichý provoz – vhodné pro aplikace v domácnostech

Nevýhody:

- Citlivost na čistotu paliva i okysličovadla
- Poměrně vysoké investiční náklady
- Účinnost klesá s dobou provozu

## 9.5. Literatura

- [1] Aktualizace státní energetická koncepce České republiky, vydalo Ministerstvo průmyslu a obchodu, Praha, únor 2010.
- [2] Mareček, P.: Smart grids v podmínkách České Republiky. In Intelligenten und effizienter Einsatz von (er)neu(erbar)en Energien in Sachsen und Tschechien. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2010, s. 161-170. ISBN 978-3-86367-003-0.
- [3] ETMCZ. ETMCZ [online]. 1.11.2010 [cit. 2011-12-10]. Dostupné z: <http://www.etm.cz/rubriky/energetika/554-elektromery-a-smart-grids>
- [4] Skoro vše o akumulátorech a nabíjení. Marconi. prosinec 2008. [cit. 2011-12-10]. Dostupné z: <http://www.cezeta487.ic.cz/Documents/akumulatory.pdf>
- [5] ControlEngCesko. Control Engineering Česko [online]. 19.5.2011 [cit. 2011-12-11]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/hybrid-ultrakondenzatoru-a-akumulatoru/>
- [6] Dokument Evropské komise – Sdělení komise Evropskému parlamentu, Radě, Evropskému hospodářskému a sociálnímu výboru a výboru regionů, ze dne 12. 4. 2011, vydané v Bruselu pod číslem SEK(2011) 463



## 10. Telekomunikační sítě pro elektroenergetické systémy

Tato kapitola se zabývá problematikou nasazení datových sítí v oblasti průmyslových a hlavně pak energetických systémů. V kapitole jsou popsány základní principy a rizika provozu těchto komunikačních systémů, včetně jejich nasazení jako podpůrných prvků koncepce smart grid. Kromě popisu komunikačních systémů a jeho standardních modifikací pro nasazení v oblasti energetických systémů je v závěru této kapitoly uveden i stručný přehled použitelných standardů a komunikačních protokolů pro nasazení v energetických sítích.

### 10.1. Komunikace energetických systémů

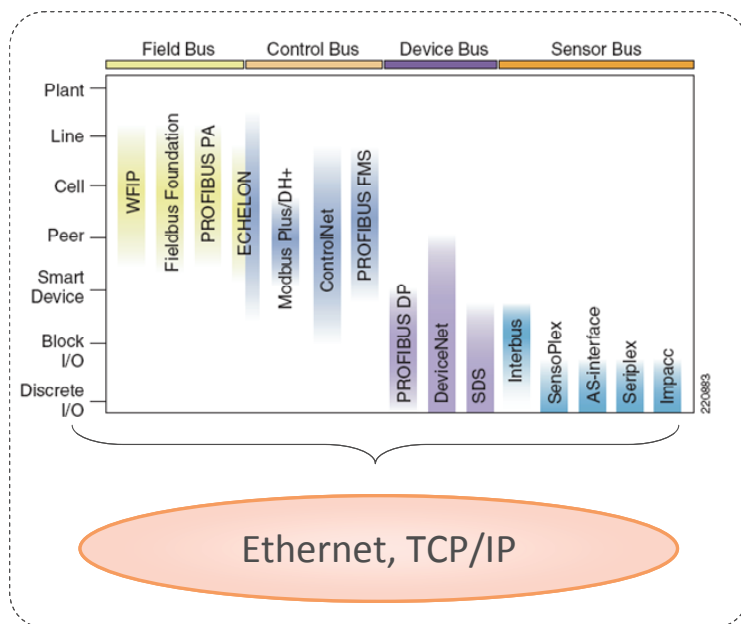
Stále komplikovanější energetická síť vyžaduje v rámci zvýšení spolehlivosti a omezení provozních ztrát mnohem sofistikovanější způsob řízení a dohledu. Tyto požadavky lze velmi efektivně řešit použitím inteligentních řídicích prvků. Tyto prvky neumožňují jen včasnou přednastavenou reakci na nastalou situaci (rozpínáče apod.), ale jsou schopny svůj aktuální stav hlásit do dispečerského centra řízení a sběru dat. Kromě zasílání hlášení lze řídicího centra tyto inteligentní řídicí prvky také vzdáleně ovládat nebo alespoň parametrizovat. Dispečerské centrum řízení a sběru dat je označováno zkratkou SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition).

Komunikaci mezi jednotlivými zařízeními a systémy v oblasti průmyslové automatizace a energetiky zprostředkovává průmyslová síť. Komunikace může probíhat v několika rovinách. Kromě již zmíněné komunikace mezi dispečerským řídicím centrem a podřízenými (ovládanými) systémy mohou spolu komunikovat i podřízené systémy navzájem bez přímé účasti řídicího centra (typicky komunikace ochran). Existuje řada požadavků, které ovlivňují výběr vhodné komunikační technologie pro nasazení v průmyslové síti. Tyto požadavky na komponenty průmyslové sítě se ve většině případů velmi odlišují od požadavků na běžné komunikační sítě známé z běžného života (síť v domácnosti, kanceláři, Internet apod.), ve kterých je kladen důraz především na co největší přenosovou kapacitu a spolehlivost je většinou řešena jako kompromis mezi cenou a dostupností dané služby. U tohoto typu sítí není, až na malé výjimky požadována komunikace v reálném čase (typicky VoIP, videokonference) [1], ale i přesto nejsou tyto požadavky tak kritické jako u řady služeb v průmyslových sítích (typicky řízení nebo sběr dat v reálném čase).

### 10.2. Průmyslová síť v oblasti energetických systémů

Jak bylo uvedeno v předchozím odstavci, hlavním a nejdůležitějším úkolem průmyslové sítě je zajistit komunikaci mezi řídicími prvky a jejich podřízenými subsystémy jako jsou čidla, akční členy, apod. Vývoj průmyslových sítí je z hlediska technologie mnohem rozmanitější než u jejich vzoru - sítí informačních. Pokud je porovnávána jednotnost technologie mezi oběma typy sítí, lze říci, že informační sítě jsou dnes velice homogenní a standardizačně na globální úrovni lépe „ukotvené“ než je tomu obecně u sítí průmyslových (standards IEEE, ETSI, ITU). Duplicita určité funkce u informačních sítí je dnes často odstraněna používáním jednotné

technologie či protokolu. Na druhou stranu u průmyslových sítí je situace díky specifickým požadavkům zákazníků a omezené standardizaci mnohem komplikovanější a méně přehledná jak ilustruje *obr. 10.1*. Z obrázku je rovněž patrné, že v dlouhodobém trendu veškeré komunikační technologie a protokoly konvergují k jednotné platformě založené na technologii Ethernet a rodině protokolů TCP/IP.



**Obr. 10.1: Konvergence v prostředí průmyslových sítí**

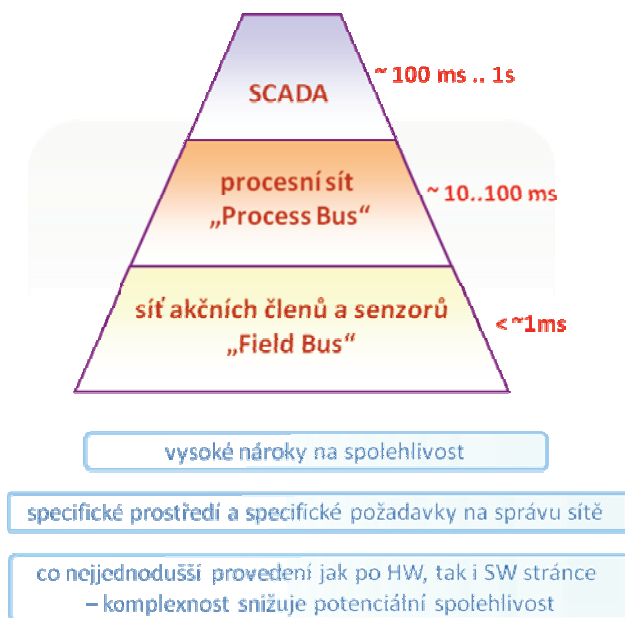
Průmyslové sítě se typicky používají ve dvou až třech účelových rovinách, viz. *obr. 10.2*:

- 1) senzory a akční členy (digitální senzory, akční členy, IED),
- 2) procesní (propojení PLC a RTU v dané procesní buňce),
- 3) globálně řídicí (SCADA systémy, server historie, hlavní procesní servery apod.).

Pro každou úroveň průmyslové sítě se dnes stále ještě používají různé proprietární technologie, které komplikují provoz, prohlubují závislost na jednom výrobcí a mohou zvýšit provozní náklady. Roztříštěné technologie plnící stejnou funkci komplikují situaci i vlastním výrobců komponent síťových komponent, kteří musí neustále zvažovat, jakou technologii mají ve svých zařízeních podporovat. To vede ke zvýšeným nákladům na vývoj, podporu a ve výsledku ke zvýšení ceny zařízení.

Z hlediska aplikací se průmyslové, řídicí a monitorovací sítě diametrálně odlišují od sítí informačních. Zatímco aplikace provozované v informačních sítích mnohdy souvisí s člověkem a jeho vlastním specifickým chápáním kvality dané aplikace, u průmyslových sítí je tomu zcela jinak. Určité části průmyslové sítě jsou nedílnou součástí procesů řízení v reálném čase. Z toho pohledu jsou v nejnižších rovinách vyžadovány přísné požadavky na včasné a deterministicky určitelné doru-

čení datových paketů mezi např. senzorem a řídicím prvkem daného subsystému (PLC).



**Obr. 10.2: Reakční doba různých úrovní průmyslové sítě v energetickém prostředí**

Na průmyslové sítě je kladena řada specifických požadavků. Ty nejkritičtější jsou shrnuty v následujících bodech:

- podpora komunikace v reálném čase, a to deterministickým způsobem,
- nepřetržitá dostupnost 24 hodin x 7 dní v týdnu x 365 dní v roce,
- vysoký stupeň bezpečnosti provozu,
- dostatečná rezerva přenosového pásma,
- jednoduchost implementace,
- snadná správa,
- snadná detekce problémů a jejich rychlé odstranění,
- podpora standardizovaných řešení, kompatibilita zařízení více výrobců,
- snadná škálovatelnost a rozšiřitelnost,
- jiná filozofie odpovědnosti ke správě sítě a řešení krizových opatření než mají klasické informační sítě; přesně nadefinovaný krizový plán postupu řešení problému, který není plošně zcela obvyklý u běžných informačních sítí.

## 10.3. Kvalitativní parametry komunikačních sítí

Komunikační síť je soubor vzájemně propojených komunikačních zařízení, který umožňuje přenos informací mezi koncovými body této sítě. Komunikační služba (dále jen služba) je soubor technických, provozních a organizačních opatření a pravidel umožňujících přenos informace s definovanými parametry.

Souhrnně se schopnost poskytovat služby na určité úrovni pomocí komunikační sítě posuzuje pomocí parametrů kvality (jakosti) služby QoS (Quality of Service). Kvalita služby je tedy soubor opatření, která zajistí určitý stupeň uspokojení uživatele danou službou.

Mezi základní sledované parametry při implementaci kvality služby patří:

**Zpoždění** – parametr představuje čas mezi odesláním požadavku na straně odesílatele a jeho přijetím na straně příjemce. Obvykle je uváděn v jednotkách ms nebo s.

**Propustnost** – obecně je tento parametr udáván jako počet datových jednotek za jednotku času (sekundu). Typicky pak v rámci datových sítí jde o bity či bajty za sekundu.

**Ztrátovost** – parametr je uváděn v procentech ztraceného nebo chybného objemu přenášené informace (typicky paketů nebo rámců) vzhledem k celkovému objemu přenesených dat.

**Spolehlivost** – parametr představuje minimální hodnotu činitele spolehlivosti a je udáván v procentech (viz kapitola 10.3.1).

Zpoždění a propustnost jsou primárně technologicky závislé parametry, které lze za určitých podmínek velmi přesně predikovat. Spolehlivost je velmi komplexní parametr, který závisí na mnohem širším okruhu parametrů a společně se ztrátovostí ovlivňuje i propustnost a zpoždění.

Kromě těchto základních parametrů existují další, které již nelze přímo změřit, ale pro chod sítě a bezpečnost přenášených dat jsou velmi kritické. Typickým zastupcem těchto parametrů je informační bezpečnost, elektromagnetická kompatibilita a jiné. (viz kapitola viz kapitola 10.4).

### 10.3.1. Spolehlivost datové sítě

Jak bylo uvedeno v předchozím textu, velice důležitou charakteristikou každé datové sítě a průmyslových zvláště je její spolehlivost a pohotovost, dosti často dnes také nepřesně označovaná jako dostupnost. Ať už je síť jakkoliv topologicky nebo technologicky vyspělá, vždy slouží jako prostředek komunikace a výměny dat mezi minimálně dvěma koncovými systémy. Z tohoto pohledu lze definovat jen dva obecněné základní parametry, které od každé sítě telekomunikační služba očekává:

- odpovídající kvalitu služby z hlediska přenosových parametrů kam se řadí:
- požadovaná přenosová rychlost,

- požadovaná maximální chybovost při přenosu (věrnost přenosu informace),
- maximální velikost zpoždění přenosu se zachovaným maximálním rozptylem časů příchodů paketů (popř. rámců).
- zajištění požadované pohotovosti nabízené telekomunikační služby.

Dostatečná spolehlivost je základním požadavkem na funkčnost technických prostředků komunikačních sítí. V oblasti telekomunikačních sítí se problematikou spolehlivosti zabývá doporučení **ITU-T G.911**.

Pro provoz méně náročných služeb, jako je nekritický sběr dat apod., je možné v průmyslovém prostředí požadovat činitel pohotovosti „3 devítky“, tj. 99,9 %, což znamená, že je nutno zajistit střední dobu mezi poruchami cca 1 rok (za předpokladu, že střední doba pro obnovení provozu je 10 hodin). Za zvýšený požadavek na spolehlivost lze považovat činitel pohotovosti „4 devítky“, tj. 99,99 %, což znamená, že je nezbytné zajistit střední dobu mezi poruchami řádově v jednotkách let až více než 10 let, podle maximální doby prostoje, kterou jsme schopni garantovat. Vysokou spolehlivost na „5 devítek“, tj. 99,999 % (případně více – též označováno jako 99,999+) je možno prakticky zajistit výhradně zálohováním síťových prvků a cest v síti. Typické hodnoty pohotovostí a jejich přepočty na celkovou dobu poruchy jsou uvedeny v *tab. 10.1*.

| Pohotovost % | Celková doba poruchy za rok | Celková doba poruchy za měsíc | Celková doba poruchy za týden |
|--------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 90           | 36,5 dní                    | 72 h                          | 16,8 h                        |
| 95           | 18,25 dní                   | 36 h                          | 8,4 h                         |
| 98           | 7,3 dní                     | 14,4 h                        | 3,36 h                        |
| 99           | 3,65 dní                    | 7,2 h                         | 1,68 h                        |
| 99,5         | 1,83 dní                    | 3,6 h                         | 50,4 min                      |
| 99,8         | 17,52 h                     | 86,23 min                     | 20,16 min                     |
| 99,9         | 8,76 h                      | 43,2 min                      | 10,1 min                      |
| 99,95        | 4,38 h                      | 21,56 min                     | 5,04 min                      |
| 99,99        | 52,6 min                    | 4,32 min                      | 1,01 min                      |
| 99,999       | 5,26 min                    | 25,9 s                        | 6,05 s                        |
| 99,9999      | 31,5 s                      | 2,59 s                        | 0,605 s                       |

**Tab. 10.1: Maximální doby poruch za rok**

## 10.4. Problematika bezpečnosti datových sítí

V následující kapitole jsou popsána základní technologická, procesní i bezpečnostní rizika spojená s provozem sítí průmyslových sítí a jejich napojením na síť informační. Informace zde uvedené pouze nastiňují problematiku bezpečnosti průmyslových a energetických datových sítí. Bližší informace lze nalézt v uvedených standardech nebo v doporučené literatuře.

### 10.4.1. Bezpečnostní hrozby v průmyslovém prostředí

Bezpečnost souvisí s opatřeními realizovanými s cílem zabránit úmyslnému nebo i neúmyslnému narušování funkce či ničení technických zařízení, strojů, budov, technologických a dalších procesů.

Otázky bezpečnosti jsou zásadní pro správné fungování průmyslových sítí, zvláště u těch, kde je vyžadována vysoká spolehlivost a odolnost.

#### Technologické a technické problémy

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – elektronická řídicí a komunikační zařízení musí vykazovat odolnost proti elektromagnetickému rušení. Nedostatečná odolnost může zapříčinit chybnou funkci zařízení, případně i jeho zničení.

Rizika způsobená propojením sítí průmyslových a informačních – současné řídicí prvky průmyslových sítí jsou méně odolné proti vnějším kybernetickým útokům (např. Denial of Service) v porovnání se zařízeními používanými v informačních sítích.

Rizika způsobená propojením průmyslových a informačních sítí z pohledu řízení služeb informačních technologií ITSM (IT Service Management) posuzovaná z hlediska ITIL (Information Technology Infrastructure Library) [4] a [5]. Veškeré činnosti prováděné nad komunikační sítí jsou v něm rozděleny do dílčích procesů:

- proces Správa kontinuity služeb,
- proces Správa dostupnosti,
- proces Správa incidentů,
- proces Správa problémů,
- proces Správa úrovně služeb,
- proces Správa přístupů,
- proces Správa změn,
- proces Správa služeb a konfigurací,
- proces Správa uvolnění (Release) a nasazení.

Podpora současných bezpečnostních mechanismů / protokolů používaných v informačních sítích je u průmyslových koncových zařízení minimální. Navíc u některých průmyslových zařízení, s ohledem na povahu jejich činnosti, je implementace bezpečnostní mechanismů nežádoucí.

Při realizaci zabezpečení průmyslové sítě je nutné ověřit, zda zabezpečovací prvky zachovávají její přiměřený výkon a splňují všechny požadavky průmyslového automatizačního systému.

Většina zařízení určených pro informační sítě není uzpůsobena pro provoz v podmínkách, které jsou charakteristické pro průmyslová prostředí (vysoké teploty, prašnost, vibrace apod.).

## Kybernetické hrozby

Kybernetické hrozby se ve své podstatě týkají počítače, který představuje souhrn technického a programového vybavení (včetně dat), nebo pouze některých z jeho komponent, případně většího množství počítačů samostatných nebo propojených do počítačové sítě. Jednotlivé typy možných útoku lze nalézt v odborné literatuře.

## Provozní problémy

Žádný systém není absolutně spolehlivý. Funkční bezpečnost zařízení jako celku se vztahuje na celý řetězec včetně průmyslových sítí a musí být zaručena i při selhání bezpečnostních funkcí řídicího systému. Celková pravděpodobnost výskytu chyby je odvozena z pravděpodobností chybných funkcí jednotlivých komponent řetězce, tedy i jednotlivých komponent průmyslové sítě. Základní možné chyby, které se mohou vyskytovat při přenosu dat, ukazuje tab. 10.2. Norma ČSN EN 61508 (IEC 61508) se zabývá funkční bezpečností elektrických, elektronických a programovatelných elektronických systémů E/E/EP včetně rozboru zajištění integrity dat v průmyslových sítích.

Při budování a provozu průmyslové sítě, která má vykazovat vysokou spolehlivost a bezpečnost, je nutno brát v úvahu řadu faktorů. Jejich seznam je uveden v následujících bodech:

- dohled a dostupnost,
- správa a řízení,
- rizika sběru a ukládání dat,
- šíření informací řízení v reálném čase z průmyslové do informační sítě,
- přestup nežádoucích dat mezi různými úrovněmi sítě,
- nekontrolovatelný přístup k informacím v produkční části sítě průmyslové sítě,
- nekontrolovatelné připojování koncových systémů (koncových zařízení) do sítě,
- existence případných cizích zařízení v průmyslové síti, která mohou ovlivňovat správnou funkčnost klíčových protokolů (STP, SNMP),
- útoky infikovaných počítačů uvnitř sítě,
- úmyslné útoky od vnitřních uživatelů,
- vzdálené přístupy do průmyslové sítě.

| Možné chyby při přenosu dat | Metody eliminace chyb |               |                  |                                     |            |            |                    |
|-----------------------------|-----------------------|---------------|------------------|-------------------------------------|------------|------------|--------------------|
|                             | Sekvenční číslování   | Časová značka | Potvrzení příjmu | Identifikace odesílatele a příjemce | Zálohování | Redundance | Kontrola platnosti |
| Opakování                   | x                     | x             |                  |                                     |            | x          |                    |
| Ztráta                      | x                     |               | x                |                                     |            | x          |                    |
| Vkládání                    | x                     |               | x                | x                                   |            | x          |                    |
| Špatné pořadí               | x                     | x             |                  |                                     |            | x          |                    |
| Nekonzistence               |                       |               | x                |                                     | X          |            | x                  |
| Zpoždění                    |                       | x             |                  |                                     |            |            |                    |
| Propojení safe a non-safe   |                       |               | x                | x                                   |            |            | x                  |
| Přetečení paměti směrovače  |                       | x             |                  |                                     |            |            |                    |

**Tab. 10.2: Možné chyby při přenosu dat a metody jejich eliminace**

## 10.5. Datová komunikace v koncepci smart grid

Stávající struktura a filozofie klasických silových sítí, kdy se energie přenáší od jednoho výkonného zdroje (elektrárna) ke spotřebitelům (zákazníkům), je v režimu smart grid změněna. Princip Smart grid je založen na velkém množství rozptýlených zdrojů mezi které nepatří jen elektrárny s výkonem ve stovkách MW, ale i menší zdroje, které jsou schopny dodat jen stovky kW až jednotky MW.

Aby energetická síť vlivem velkého množství různých zdrojů nezkolabovala, je nutné zavést do sítě velmi sofistikované a efektivní řízení, které umožní ovládat energetickou síť až na úrovni jednotlivých zdrojů. Síť v režimu Smart grid umožní provést na základě znalosti informací o aktuální spotřebě rekonfiguraci sítě tak, aby bylo dosaženo co nejmenších ztrát při přenosu energie a zároveň byly optimálně využity všechny její zdroje. Rozptýlenost jednotlivých zdrojů a inteligentní řízení umožňuje velmi efektivní řešení kritických stavů, které na stávají při poruchách rozvodné sítě vlivem výpadků zdrojů nebo poškozením vedení.

Účinnost úspěšného řízení energetické sítě je kriticky závislá na typu a množství dodaných informací ze zdrojů a spotřebičů energie. Energetická síť v režimu smart grid je tvořena velkým počtem zdrojů (stovky) a několikanásobně větším počtem odběrných míst (stovky tisíc). Aby bylo možné zajistit efektivní řízení, je



nutné vytvořit dostatečně dimenzovanou datovou infrastrukturu mezi jednotlivými zdroji / spotřebiči, datovým centrem a řídicím dispečinkem.

Budování komunikačních sítí ve smart grid bylo mělo být v úzkém souladu s potřebami efektivního řízení energetické sítě. Není to jen otázka komunikačních, ale také informačních technologií. Z hlediska praktické implementace se zatím jeví jako velice výhodné směřovat návrh komunikačních sítí do oblasti Ethernetu a protokolového modelu TCP/IP [2], a to i přesto, že nemusí být tato řešení vždy zcela optimální. Výhodou TCP/IP a Ethernetu je jejich velká a stále rostoucí podpora ze strany výrobců, což je pro vlastní implementaci bezesporu více než podstatné.

Do problematiky smart grid lze začlenit i dnes často proklamovanou problematiku inteligentních budov s jejich fotovoltaickými systémy a kogeneračními jednotkami. Celý dům se tak chová jako plně samostatný subjekt, který je sám sobě výrobcem, distributorem i spotřebitelem energie. Takovýto objekt vyžaduje svůj vlastní systém mikrořízení, ve kterém musí jednotlivé prvky automatizace mezi sebou komunikovat. Pro komunikační síť tohoto rozsahu se vžila zkratka HAN (Home Area Network), která je dnes hojně používána. Komunikační infrastruktura inteligentního domu se nijak zvlášť neodlišuje od komunikační infrastruktury distributora či výrobce energie. Principiálně je vše podobné, jen použité technologie jsou optimalizovány pro toto nasazení a jsou rovněž cenově mnohem výhodnější.

### **10.5.1. Standardizace**

Principy smart grid jako takové nejsou prozatím standardizovány, ale již nyní vznikají první standardy v této oblasti. Standardizací těchto principů a z nich odvozených technologií se v současné době zabývají IEC (International Electrotechnical Commission), ITU (International Telecommunication Union) a v neposlední řadě IEEE (Institute of Electrotechnic and Electronic Engineers) viz standard IEEE 2030P (kapitola 10.8). Do problematiky smart grid se zapojuje i organizace TeleManagement Forum, která je odborným garantem NGOSS a iniciátorem tvorby doporučení ITU. Zdá se, že to všechno nasvědčuje, že vývoj v oblasti standardizace řízení Smart grid se bude ubírat stejným směrem jako u telekomunikačních podpůrných systémů nové generace (NGOSS), to znamená, že základem jejich řízení by mohla být standardizovaná procesní definice smart grid, což by přineslo prospěch jak uživatelům, tak i dodavatelům. Procesní standardizace smart grid si vyžádá ještě dlouhou dobu. K jejímu vývoji přispívají i realizované pilotní zkoušky. Přehled standardů, které se věnují problematice smart grid je uveden v *tab. 10.3*.

| Aplikace ve Smart Grid                                                                             | Reference                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Systém AMI ( <i>Advanced Metering Infrastructure</i> ) a bezpečnost mezi koncovými body Smart Grid | AMI-SEC System Security Requirements      |
| Model přenosu měřených dat                                                                         | ANSI C12.19/MC1219                        |
| Automatizace budov                                                                                 | BACnet ANSI ASHRAE 135-2008/ISO 16484-5   |
| Rozvodny a automatizace napájecích zařízení                                                        | DNP3/IEEE 1815                            |
| Komunikace mezi řídicími centry                                                                    | IEC 60870-6/TASE.2                        |
| Ochrana a automatizace rozvodu                                                                     | IEC 61850                                 |
| Aplikační úroveň rozhraní řídicího energetického systému                                           | IEC 61968/61970                           |
| Informační bezpečnost řízení energetického systému                                                 | IEC 62351 části 1-8                       |
| Komunikace PMU ( <i>Phasor Measurement Unit</i> )                                                  | IEEE Std C37.118                          |
| Fyzická a elektrická komunikace mezi utilitami a DER                                               | IEEE Std 1547                             |
| Bezpečnost inteligentních elektronických zařízení IEDs ( <i>Intelligent Electronic Devices</i> )   | IEEE Std 1686-2007                        |
| Elektronické systémy domů a budov HBESs ( <i>Home and Building Electronic Systems</i> )            | ISO/IEC 14543-3                           |
| Předpisy počítačové bezpečnosti pro energetické systémy                                            | NERC CIP 002-009                          |
| Reakce na poptávku energie a přímá redukce zatížení                                                | Open Automated Demand Response (Open ADR) |
| Komunikace, měření a řízení zařízení HAN ( <i>Home Area Network</i> )                              | OpenHAN, IEEE Std 1451 řady, HomePlug®    |
| Informační model HAN                                                                               | ZigBee® Smart Energy Profile              |

**Tab. 10.3: Přehled standardů použitelných ve smart grid**

## 10.6. Topologie komunikačních sítí

Moderní informační sítě jsou založeny na koncepci vrstvené hierarchicky členěné sítě. Každá vrstva v tomto modelu plní specifickou funkci a účel. Jejich názvy jsou následující:

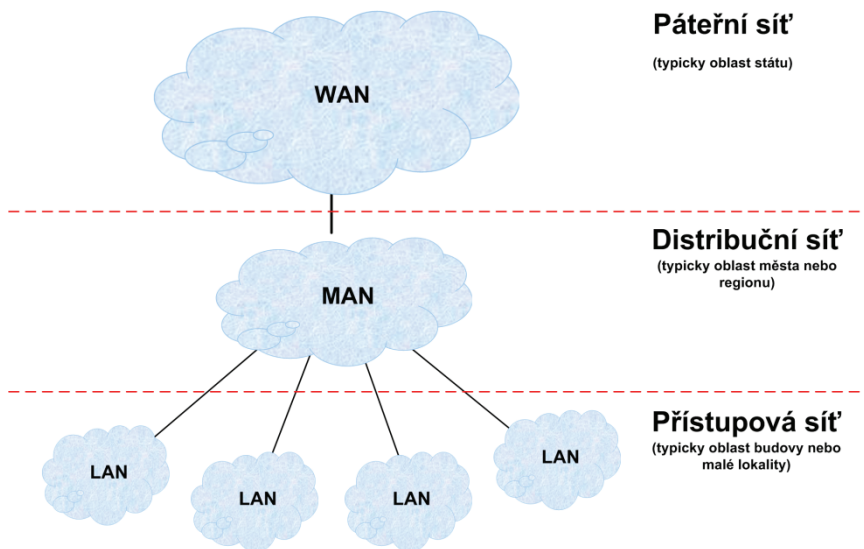
- přístupová (Access),
- distribuční (Distribution),
- páteří (Core).

Vzájemné provázání jednotlivých vrstev je pak zobrazeno na *obr. 10.3*. Jejich popisu jsou pak věnovány následující kapitoly.

Na rozdíl od jiných modelů, je tento model navržený s ohledem na splnění následujících požadavků:

- zajištění odpovídajícího stupně redundance a tedy odolnosti proti výpadku uzlů nebo propojovacích datových okruhů,
- náklady spojené na výstavbu sítě versus optimální stupeň redundance,
- optimální rozdělení zátěže v různých částech sítě,
- zajištění odpovídajícího stupně bezpečnosti a filtrace provozu a autentizovaného přístupu do sítě,
- optimální zajištění kvality služby,
- optimální rozmístění prvků s různou výkonností do jiných vrstev sítě, tak aby se např. pro připojení klientů nepoužívaly zbytečně nákladná zařízení a naopak v páteřní síti nebylo použito zařízení s malým výkonem.

Jak bylo zmíně výše, do popředí průmyslových sítí se stále častěji dostává technologie Ethernet, doplněná o rodinu protokolů TCP/IP. Tato kombinace tvoří velmi ucelenou, flexibilní a škálovatelnou síťovou architekturu, která umožňuje optimalizovat síť nejen v oblasti její přenosové kapacity (přenosové rychlosti), ale i spolehlivosti spočívající v zálohování jednotlivých přenosových cest, uzlů a stanic. Aby mohly být tyto vlastnosti dodrženy je třeba při návrhu sítě respektovat určitou hierarchii uspořádání síťových prvků v rámci topologie sítě vycházející právě z použití technologie Ethernet a protokolů TCP/IP.



**Obr. 10.3: Typická hierarchie datových sítí**

### 10.6.1. Páteřní segment sítě - WAN

Páteřní síť představuje hierarchicky nejvyšší propojení jednotlivých uzlů v datové síti. Pro tuto síť je charakteristická velká geografická rozlehlost a vysoká pře-

nosová kapacita. Tento typ sítě se nejčastěji označuje zkratkou WAN (Wide Area Network). Síť WAN vysokorychlostně propojuje všechny lokality (MAN sítě) k ní připojené. Jednotliví uživatelé a koncové stanice jsou do páteřní sítě připojeni pomocí přístupových sítí (LAN), které jsou na páteřní síť napojeny přímo nebo pomocí distribučních sítí (MAN). Páteřní síť není určena pro přímé připojení ke koncovým stanicím a uživatelům. Páteřní síť využívá vysokorychlostních přenosových technologií založených na systémech vysokorychlostního Ethernetu s využitím technologie MPLS (MultiProtocol Label Switching). Typické přenosové rychlosti se v této síti pohybují od jednotek až po desítky a stovky Gbit/s. V síti se vyskytují desítky až stovky uzlů, které jsou propojeny vysokorychlostními optickými trasami. Použití prostředků páteřní sítě na úrovni přístupové je zatím ekonomicky nevýhodné a v rámci posílání přístupové sítě jsou zde tyto prostředky rovněž nevyužitelné, a proto zde není předpokládáno jejich nasazení.

Páteřní síť je koncipována takovým způsobem, aby byla schopna zajistit přenos velkého množství dat z různých zdrojů s různou garancí kvality služby. Díky implementaci kvality služby lze touto sítí přenášet i data třetích stran, a to bez toho aniž by jejich přenos negativně ovlivňoval vlastní data provozovatele sítě.

Činitel pohotovosti se v páteřní síti pohybuje v rozmezí 99,9 % až 99,999 %. Nižší hodnota odpovídá méně důležitému uživatelskému provozu v podobě aplikací, jakými jsou emaily nebo běžné webové služby. Nejvyšší pohotovost a garanci přenosu naopak vyžadují data reálného času nesoucí ve většině případů řídicí informace a zprávy dohledu nad energetickou sítí. Na této úrovni je možné propojit jak informační tak průmyslové sítě.

Účel a použití páteřního segmentu sítě:

- Propojení distribučních a přístupových sítí.
- Vysokorychlostní přenos dat založen na přenosu dat po optických kabelech.
- Přenos mnoha služeb s garantovanou kvalitou služby.
- Použití technologií IP, MPLS, QoS (Quality of Service).
- Přenosová rychlost minimálně 1 Gbit/s, optimálně 10 Gbit/s a více.

### 10.6.2. Distribuční segment sítě - MAN

Distribuční síť neboli MAN, obdobně jako páteřní síť, neslouží k přímému připojení uživatelů a koncových stanic, ale zprostředkovávají propojení mezi páteřní sítí a přístupovými sítěmi a mezi přístupovými sítěmi navzájem. Na rozdíl od páteřních sítí, lze v distribučních sítích použít širší spektrum komunikačních technologií. Páteřní sítě jsou budovány s velkým důrazem kladeným na velkou přenosovou kapacitu sítě, jež je ale sdružena do menšího počtu přenosových tras používajících optických vláken. Úkolem distribuční sítě je zprostředkovat přístupovým sítím, kterých mohou být i tisíce, napojení na páteřní síť. Distribuční síť geograficky pokrývá rozlohu města nebo regionu, kde je tato síť provozována.

Nároky na přenosovou kapacitu v distribuční síti jsou obvykle nižší a ve větším rozsahu než v síti páteřní. Typicky jednotky kbit/s až Gbit/s. Distribuční síť sdružuje datové toky vždy minimálně z jedné nebo několika přístupových sítí.

V případě nedostupnosti vhodného vysokorychlostního přenosového média, jakým je např. optické vlákno, je nutné použít jiné přenosové prostředky než ty, které jsou použité v páteřních sítích. Tam, kde je již instalován optický kabel, lze s výhodou použít rychlejší variantu fyzické vrstvy standardu Ethernet. V místech, kde je k dispozici jen metalické vedení, lze za předpokladu nepřekročení maximální délky kabelu použít např. fyzickou vrstvu 1000BASE-T (Gigabit) nebo 100BASE-T (Fast) standardu Ethernet, případně technologii xDSL (Digital Subscriber Line). V případě nedostupnosti vedení (optického nebo metalického), je nutné použít bezdrátové přenosové systémy založené např. na technologiích WMAN (Wireless Metropolitan Area Network), případně FWA (Fixed Wireless Access) nebo GSM Global System for Mobile Communications), UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) či LTE (3GPP Long Term Evolution). Alternativou je rovněž technologie bezdrátového přenosu pomocí systému rádio-modemů. Bližší informace k těmto technologiím jsou uvedeny v kapitole 1.7.

Technologie použité v distribučních sítích musí stejně jako v páteřní síti podporovat kvalitu služby, která je nutná pro přenos dat různé povahy z různých zdrojů. V sítích, kde nelze kvalitu služby technicky garantovat, typicky datové sítě mobilních operátorů, je nutné tuto skutečnost vzít do úvahy a nepřenášet těmito sítěmi data aplikací a služeb, která vyžadují striktní dodržení požadované kvality přenosu.

Již ze samotné povahy použitých síťových zařízení, a to hlavně bezdrátových, vyplývá, že nelze klást tak velké požadavky na pohotovost tak jako v páteřních sítích. Ta se zde pohybuje v rozmezí od 99,5 % až do 99,999 %. Stejně jako v předchozím případě, nižší pohotovost odpovídá běžnému uživatelskému provozu a ta vyšší řídicím informacím a dohledu nad sítí. Pro dosažení maximální pohotovosti musí být použita technologie, která to umožňuje. Většina bezdrátových systémů nedokáže z fyzikální podstaty datového přenosu této maximální hodnoty dosáhnout.

Účel a použití distribučního segmentu sítě:

- Propojení páteřní sítě s přístupovými.
- Přenos dat založen na širokém spektru přenosových technologií.
- Využití bezdrátového přenosu dat.
- Přenos mnoha služeb s garantovanou kvalitou služby.
- Přenosová rychlost od desítek kbit/s po jednotky gigabitů za sekundu.

### 10.6.3. Přístupový segment sítě - LAN

Hlavním účelem přístupové sítě (LAN) je zpřístupnit připojení do distribuční (MAN) sítě koncovým stanicím a uživatelů. Topologie a technologie těchto sítí je přímo závislá na jejich účelu (řízení energetické sítě, přenos informačních zpráv, aplikace třetích stran apod.). Oproti technologiím používaných v páteřní a distribučních sítích je nutné v tomto segmentu sítě počítat i s nasazením technologií, které jsou ryze proprietární a v rámci jejich síťové komunikace není uplatňován žádný standard. Nasazení takových technologií na úrovni páteřní a distribuční sítě je z důvodu absence kompatibility a škálovatelnosti nepřijatelné.

V rámci přístupové sítě hovoříme o jednotkách až desítkách koncových stanic připojených na jeden přístupový uzel a nároky na přenosovou kapacitu směrem do páteřní sítě nejsou tak velké jako u distribuční sítě. Díky velké rozmanitosti koncových zařízení je ale nutné počítat s použitím velkého množství technologií.

Kvalita služby se v tomto segmentu sítě jako celku řeší velmi obtížně, protože řada síťových prvků a technologií nemá zatím tuto podporu integrovanou. Velkým problémem je rovněž široké spektrum rozsahu činitele pohotovosti, který se pro systémy ochrany pohybuje v řádu > 99,999 %, kdežto klasické informační systémy vyžadují v průměru pouze 99,9 %. Ve hře jsou rovněž přenosy dat třetích stran, jejichž pohotovost se pohybuje minimálně na úrovni pohotovosti informačních systémů.

Na rozdíl od páteřní a distribuční sítě, kde lze zajistit řadu služeb společně, je situace v tomto segmentu mnohem složitější. Obecně se nedoporučuje využívat síťové prvky určené pro řízení a dohled nad energetickou sítí pro další služby, protože musí splňovat mnohem vyšší pohotovost. Provázanost služeb na úrovni sdílení přenosové technologie lze umožnit pouze na technologii, která umožní dodržet požadovanou pohotovost. Typicky může jít o různé kombinace služeb informační sítě, nebo služeb třetích stran. Účel a použití přístupového segmentu sítě:

- Napojení koncových stanic a uživatelů na páteřní síť.
- Přenosové rychlosti v řádech 10 kbit/s u bezdrátových technologií až po desítky až stovky Mbit/s.
- Přenos dat založen na širokém spektru přenosových technologií.
- Využití proprietárních přenosových technologií.
- Vysoká pohotovost pro systémy ochrany energetické sítě.

#### **10.6.4. Domácí síť – HAN**

Síť HAN (Home Area Network) se obvykle rozkládají na úrovni domu či komerční budovy. Jejich primárním úkolem je síťově propojit prvky domácí automatizace. Obdobně jako síť LAN je tento typ sítí situován do přístupového segmentu hierarchického modelu.

Obdobně jako v sítích LAN se zde používá převážně technologie Ethernet, případně některý ze standardizovaných komunikačních protokolů, jejichž seznam lze nalézt v kapitole 10.5.1. Kromě standardizovaných protokolů jsou mnohem častější proprietární řešení firem dodávající domovní automatizaci. V tomto druhu sítí je velmi obvyklá i technologie Bluetooth.

#### **10.6.5. Osobní síť - PAN**

Síť PAN (Personal Area Network) jsou sítě s nejmenším rozlehlostí. V energetice se uplatňují hlavně v oblasti telemetrie pro bezdotykové vyčítání naměřených údajů, typicky z elektroměrů apod.

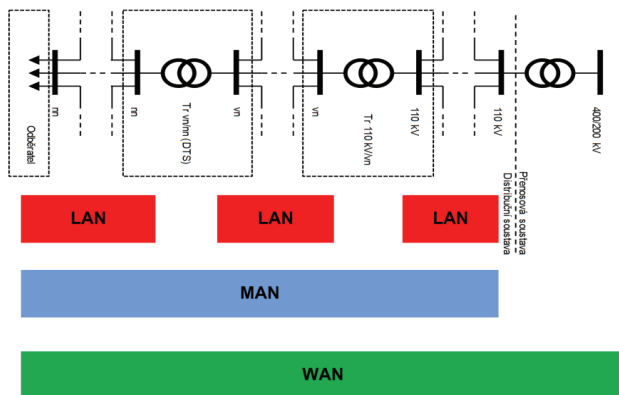
Tento typ sítí je v hierarchickém modelu situován na pozici přístupové sítě.

Přenosové technologie používané v těchto sítích se vyznačují vysokou odolností proti rušení, nízkou spotřebou a především snadnou použitelností. Přenosová

rychlost a dosah jsou velmi omezené. Typickými zástupci přenosových technologií jsou IR, Bluetooth a ZigBee.

### 10.6.6. Propojení komunikační sítě s energetickou soustavou

Na *obr. 10.4* je uvedeno typické namapování hierarchického modelu komunikační sítě na síť energetickou. Obrázek ukazuje typickou vazbu, která je běžná na území ČR, kdy provoz datové sítě v lokální distribuční stanici je realizován na přístupové úrovni – LAN síť. MAN síť propojuje jednotlivé lokální sítě distribučních trafostanic. WAN síť pak zastřešuje jednotlivé MAN sítě a utváří tak nejvyšší hierarchický celek celé datové infrastruktury.



**Obr. 10.4: Vazba komunikační sítě na energetické systémy**

## 10.7. Přehled komunikačních technologií

Následující kapitola uvádí ucelený přehled komunikačních technologií, které jsou použitelné na všech úrovních komunikační infrastruktury energetických sítí.

| Komunikační technologie | Segment sítě |     |     |     |
|-------------------------|--------------|-----|-----|-----|
|                         | PAN          | LAN | MAN | WAN |
| WDM                     |              |     |     | X   |
| SDH                     |              | X   | X   | X   |
| Ethernet                |              | X   | X   | X   |
| WiMAX                   |              |     | X   |     |
| Wi-Fi                   |              | X   |     |     |
| Síť rádiových modemů    |              |     | X   |     |
| FWA                     |              |     | X   |     |
| xDSL                    |              |     | X   | X   |
| ADSL/ADSL2/ADSL2+       |              |     | X   |     |
| VDSL                    |              |     | X   |     |
| SHDSL/SHDSL.bis         |              |     | X   |     |
| IR                      | X            |     |     |     |
| Bluetooth               | X            |     |     |     |
| ZigBee                  | X            |     |     |     |
| NPL                     |              | X   |     |     |
| BPL                     |              | X   | X   |     |
| GSM                     |              |     |     | X   |
| GPRS                    |              |     |     | X   |
| EDGE                    |              |     |     | X   |
| UMTS                    |              |     |     | X   |
| HSDPA/HSUPA             |              |     |     | X   |
| LTE                     |              |     |     | X   |

**Tab. 10.4: Přehledová tabulka komunikačních technologií**



## 10.7.1. Systémy přenosu dat po optických vláknech

### WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Vlnový multiplex představuje v optických sítích technologii, kterou se při přenosu sdružuje více optických signálů v jednom optickém vlákně s použitím rozdílných vlnových délek (barev) laserů. Je tak umožněno rozšířit kapacitu média nebo provést obousměrnou komunikaci na jednom optickém vlákně. Optické vydělovací muldexy OADM (Optical Add-Drop Multiplexor) umožňují realizovat sítě s kruhovou topologií s velmi rychlým ochranným přepínáním (zálohováním) na úrovni vlnových délek (na fyzické vrstvě). Svými parametry je vhodná pro přenos telemetrických dat a kritických řídicích povelů v průmyslových sítích.

DWDM (Dense WDM) - DWDM se používá hlavně na dálkových optických trasách a vyžaduje precizní laserové chlazené zdroje a ostatní náročné optické komponenty, jako jsou optické zesilovače EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier), kompenzátory disperze apod. Pro další použití v metropolitních sítích je vhodné omezit technologii DWDM pouze na využití C pásma v oblasti 1530 až 1565 nm (optické kanály definované dle ITU-T G.692), kdy existují vhodné cenově dostupné komponenty (výměnné transceivery DWDM v provedení SFP (Small Form Factor Pluggable), XFP a Xenpak a EDFA zesilovače pro C pásmo). Zapouzdření Ethernetu 1G, 10G, 40G a dalších formátů pro přenos DWDM je standardizováno dle ITU-T G.709 - optická hierarchie OTH (Optical Transport Hierarchy).

CWDM (Coarse WDM) - ITU standardizovala 20 nm kanálové rozteče pro použití s CWDM za použití vlnových délek mezi 1270 nm a 1610 nm (ITU-T G.694.2). Širší kanál 20 nm může využívat teplotně nestabilizovaný laser DFB (Distributed Feedback Laser) a z tohoto důvodu jsou tyto systémy levnější než multiplexy s hustým dělením (DWDM). V současné době se převážně využívá pásmo 1470 nm až 1610 nm. Vlnové délky mezi 1350 nm až 1450 nm se nepoužívají z důvodu nasazení na optická vlákna G.652.B, která mají zvýšený útlum vlivem „waterpeeku“ v okolí vlnové délky 1383 nm a tyto zvýšené hodnoty zasahují i do dalších kanálů. Též kanály v okolí 1310 nm nejsou obvyklé. S nástupem nových vláken standardu G.652.C a G.652.D (eliminace zvýšení útlumu v okolí 1383 nm) lze očekávat využití celého pásma od 1270 nm do 1610 nm (20 kanálů). Připravují se i aplikace CWDM pro projekty FTTx (Fiber to the x).

### SDH (Synchronous Digital Hierarchy)

Synchronní digitální hierarchie dle ITU-T G.707 je technologií vycházející z klasických telekomunikačních sítí založených na časovém multiplexu TDM. Navazuje na plesiochronní hierarchii PDH a vznikla na základě amerického standardu SONET. Přenos po optických vláknech je uskutečňován digitálními signály nazývanými synchronními transportní moduly STM-N, kde N vyjadřuje hierarchický stupeň od STM-1 (155,52 Mbit/s) do STM 256 (39 813,12 Mbit/s). Nejnižší v hierarchii je STM-1, další se tvoří sdružováním (prokládáním po bajtech) vždy čtyř signálů nižšího řádu, takže následují STM-4, STM-16, STM 64 a STM 256.

Pro různé příspěvkové signály jsou určeny různé typy tzv. virtuálních kontejnerů. Do nich lze ukládat a přenášet jimi signál PCM 1. řádu (E1), PDH toky, ATM buňky, IP pakety, Ethernet rámce. Vysoká spolehlivost SDH je využívána i pro podporu energetické sítě, typicky pro ochrany silových vedení a datovou komuni-

kaci mezi řídícími systémy. Signály klasických datových okruhů (rozhraní RS232, RS485) se zapouzdřují do rámce PCM30/32 (E1 s rychlostí 2,048 Mbit/s) a poté do rámce STM-N

Pro Ethernet se využívá zapoždření pomocí protokolu GFP (Generic Framing Procedure) a techniky zřetězení virtuálních kontejnerů, pomocí níž lze dosáhnout takřka libovolnou přenosovou kapacitu skrze síť SDH. Pomocí SDH lze tak realizovat rozsáhlé globální sítě s kombinací klasických okruhů i paketového provozu.

Mezi hlavní výhody SDH patří: léty ověřená funkce a vysoká spolehlivost, vysoká kvalita poskytovaných služeb - nízká chybovost, zpoždění a garantovaná propustnost, rychlé ochranné přepínání na zálohu (do max. 50 ms), precizní systém monitorování přenosu a sledování poruch a chybovosti, podpora rozvodu synchronizačního signálu s velice nízkou odchylkou taktu, standardizovaný systém managementu sítě.

## **Ethernet**

Dnes nejčastěji nasazovaná technologie, pochází z prostřední místních sítí LAN. Tato technologie je specifikována standardy IEEE 802.3. Ethernet byl původně vyvinut společností Xerox na základě specifikace Alohanet a posléze dále vyvíjen společnostmi Xerox, DEC a Intel, původně bylo využíváno koaxiálního kabelu, jakožto přenosového media. Dnes je možné na fyzické vrstvě použít jak metalické, tak optické vedení a tím dosahovat vysokých přenosových rychlostí, formát Ethernet rámce na 2. vrstvě RM OSI však zůstává zachován.

Přenos dat po optických vláknech je odolný vůči elektromagnetickému rušení, proto není problém provozovat tuto technologii uvnitř trafostanic či jiných energetických systémů. Optická vlákna rovněž umožňují přenos dat na mnohem větší vzdálenosti než u verze metalické. Běžný teoretický limit metalické varianty 100 m je u optické verze několikanásobně překonán a pohybuje se v řádech desítek km.

Pro použití v průmyslových sítích se zaměřením na procesy automatizace a komunikace v reálném čase vzniklo několik specializovaných variant této technologie, protože původní varianta je nedeterministická a nevhodná pro aplikace blízké reálnému času. Některé z nových variant vyžadují použití speciálního HW, takže se od původní koncepce technologie

### **10.7.2. Systémy přenosu dat po metalických vedeních**

## **Ethernet**

Obdobně jako u přenosu dat po optických vláknech lze technologii Ethernet provozovat i na metalických vedeních. Díky nižší odolnosti vycházející z podstaty přenosu dat po metalických vedeních je zde dosahováno řádově nižších vzdáleností mezi komunikujícími body. V informačních sítích není problém komunikovat na vzdálenost desítek metrů. Pokud je tato technologie nasazena v místech se silným elektromagnetickým rušením je mezní vzdálenost v řádech jednotek metrů, nebo je komunikace znemožněna úplně.

## xDSL (Digital Subscriber Line)

Hlavním úkolem přípojek xDSL je efektivnější využití potenciálu již nainstalovaných metalických symetrických párů. Tyto symetrické páry jsou v dnešní době obvykle instalovány v metalických přístupových sítích telekomunikačních operátorů nebo například i v rozlehlých podnikových areálech. Zkratka xDSL vyplývá z anglických slov Digital Subscriber Line (digitální účastnická přípojka). Písmeno „x“ zastupuje jednotlivé varianty (např. A, H, V a jiné), které vznikly na základě nutnosti poskytnout různé služby. Přípojky xDSL lze dělit podle několika kritérií do různých skupin. Jedním kritériem může být například způsob přenosu dat. Podle toho kritéria se přípojky dělí na přípojky s přenosem dat v přeloženém pásmu a na přípojky s přenosem dat v základním pásmu. Přípojky s přenosem v přeloženém pásmu jsou charakteristické svou nesymetrií přenosových rychlostí. Přenosová rychlost od koncového zařízení na straně uživatele směrem ke koncovému zařízení k poskytovateli připojení (vzestupný směr) je podstatně nižší než přenosová rychlost v opačném směru (sestupný směr). Do této skupiny dnes spadají především Asymetrická digitální účastnická přípojka (ADSL – Asymmetric Digital Subscriber Line) a přípojka VDSL (Very High Speed DSL). Takto koncipované přípojky jsou určeny především pro poskytování vysokorychlostního přenosu dat domácím koncovým uživateli. Pro druhou skupinu přípojek s přenosem v základním pásmu je charakteristická rovnost přenosových rychlostí v obou směrech. V současné době sem patří Digitální účastnická přípojka na jednom páru (SHDSL – Single pair High speed Digital Subscriber Line). Takto koncipované přípojky jsou určeny především malým a středním firmám.

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) - pracuje v souladu s doporučením ITU-T G.992.1. Tato tzv. první generace ADSL existuje ve variantě ADSLoverPOTS (ADSL systém nad analogovou telefonní přípojkou) a ve variantě ADSLoverISDN (ADSL systém nad BRA-ISDN přípojkou). Hlavním úkolem přípojky ADSL je zejména poskytování vysokorychlostního připojení domácnostem a menším podnikatelům. Reálně dosažená přenosová rychlost spojení odpovídá aktuálním podmínkám přenosu. Podmínky přenosu jsou určeny délkou a parametry metalického vedení, charakterem a úrovní rušení. Teoreticky je možné dosáhnout přenosovou rychlost v sestupném směru 8 Mbit/s (dle výrobce koncového zařízení, minimálně však 6144 kbit/s) a v směru opačném 800 kbit/s (dle výrobce koncového zařízení, minimálně však 640 kbit/s). Překlenutelná vzdálenost je přibližně do 5 km, přenosová rychlost se však v takovém to případě pohybuje v řádu stovek kbit/s. První generace ADSL se v současné době považuje za zastaralou.

ADSL2 - pracuje v souladu s doporučením ITU-T G.992.3. ADSL2 se označuje jako tzv. druhá generace ADSL a přináší mírné navýšení maximální dosažitelné rychlosti oproti první generaci. Přibližně 10 Mbit/s v sestupném směru a 1 Mbit/s ve vzestupném směru. To je umožněno především optimalizací struktury rámce (zjednodušení záhlaví). Přípojka ADSL druhé generace rovněž může adaptivně měnit přenosovou rychlost na základě aktuálního stavu přenosového prostředí (útlumová charakteristika vedení, šumové poměry na vedení), aniž by byla nutná jejich reinitializace. Přípojka ADSL2 zavádí významné zlepšení spektrální kompatibility v přístupové síti tím, že omezuje vzájemné přeslechy mezi jednotlivými páry díky implementaci úsporného režimu a režimu spánku pro případ delší neaktivity koncového zařízení. K reálnému rozšíření ADSL2 v praxi nedošlo, byla nahrazena přípojkou ADSL2+.

ADSL2+ - pracuje v souladu s doporučením ITU-T G.992.5. Druhá rozšířená generace ADSL2+ přináší další navýšení přenosové rychlosti v sestupném směru, díky rozšíření pásma až do 2,208 MHz u ADSL2+, až na 24 Mbit/s (minimálně však dle doporučení ITU-T G.992.5 16 Mbit/s). Tuto teoretickou rychlost je však možné dosáhnout jen při kratším účastnickém vedení cca do 3 km (malá vzdálenost mezi účastníkem a poskytovatelem připojení). Maximální rychlost s narůstající délkou účastnického vedení klesá a při délce vyšší než 3 km dosahují všechny varianty ADSL (tedy první generace, ADSL2, ADSL2+) zhruba stejné maximální přenosové rychlosti v řádu jednotek Mbit/s. Vzhledem k tomu, že došlo pouze k úpravě parametrů pouze pro sestupný směr, parametry vzestupného směru jsou stejné jako u ADSL2. Druhá rozšířená generace je v současné době dominantní technologií v přístupových sítích telekomunikačních operátorů v ČR, kteří poskytují služby přístupu k síti internet a k přenosu digitalizovaného video signálu.

VDSL2 (Very high Speed Digital Subscriber Line) - Následovníkem přípojky ADSL je přípojka VDSL. Koncepce VDSL dovoluje dosažení ještě vyšších přenosových rychlostí v řádech desítek až stovek Mbit/s. Takové to zvýšení přenosové rychlosti je dosaženo rozšířením využívaného frekvenčního pásma a adekvátním zkrácením délky účastnického vedení. Přestože je přípojka VDSL řazena mezi asymetrické přípojky, s maximální přenosovou rychlostí až 52 Mbit/s ve vzestupném směru a 6,4 Mbit/s v sestupném směru, je schopna pracovat i v režimu se symetrickými přenosovými rychlostmi do 26 Mbit/s. Koexistence přípojky VDSL a další služby přenosu hovorového signálu je realizovatelná, protože přípojka VDSL pracuje v tzv. přeloženém pásmu do 12 MHz. Přípojka VDSL (doporučení ITU-T G.993.1) se označuje jako první generace VDSL. S reálným využitím v praxi se počítá však s tzv. druhou generací VDSL2 (doporučení ITU-T G.993.2). VDSL2 poskytuje nejvyšší přenosové rychlosti ze všech současných systémů xDSL. Vyšších přenosových rychlostí se zde dosahuje reálným rozšířením kmitočtového pásma až do 30 MHz. Teoretické přenosové rychlosti pro pásmo 30 MHz mohou být až 200 Mbit/s – pro vzdálenosti pár desítek až stovek metrů a při nasazení jediné technologie v kabelu. Reálné hodnoty přenosových rychlostí, s ohledem na rušení v přístupové síti, se předpokládají okolo 100 Mbit/s na vzdálenost 0,5 km ve vzestupném směru. Ve sestupném směru se přenosová rychlost bude pohybovat v řádech desítek Mbit/s. V ČR nejsou v současné době stanoveny podmínky pro provoz technologií VDSL/VDSL2 v přístupové síti dominantního operátora. Zavedení přípojek VDSL/VDSL2 si také vyžádá změnu koncepce přístupové sítě na hybridní typu FTTC (Fiber To The Curb) či FTTCab (Fiber To The Cabinet).

SHDSL (Single pair High speed Digital Subscriber Line) – Symetrická přípojka SHDSL (někdy označována jako G.SHDSL) je určena pro obousměrný datový provoz po metalickém symetrickém vedení. Primárně, podle svého doporučení ITU-T G.991.2, přípojka SHDSL využívá pouze jeden pár metalického vedení a na účastnickém rozhraní umožňuje nastavit přenosovou rychlost od 192 kbit/s do 2312 kbit/s. V případě požadavku na vyšší, až dvojnásobnou přenosovou rychlost, nebo v případě požadavku na překlenutí větší vzdálenosti, je standardizována i dvoupárová varianta SHDSL. Reálně dosažená přenosová rychlost spojení odpovídá aktuálním podmínkám přenosu. Podmínky přenosu jsou určeny délkou a parametry metalického vedení, charakterem a úrovní rušení. Maximální délka vedení je obvykle 3 km a zpoždění se pohybuje v řádu desítek ms.

SHDSL.bis - Druhá generace přípojky SHDSL se někdy označuje jako SHDSL.bis nebo G.SHDSL.bis a pracuje v souladu s druhou verzí doporučení ITU-T G.991.2. SHDSL.bis přináší řadu vylepšení oproti první generaci. Definuje podmínky pro datové přenosy s využitím většího počtu paralelních vedení (až na 4 párech současně). Přináší vyšší výkonnost přenosu (až 5,69 Mbit/s) zavedením nových modulačních principů. Definuje způsoby pro přenos více vzájemně nezávislých spojení na společné fyzické vrstvě a definuje podporu pro dynamické změny přenosových rychlostí mezi jednotlivými typy spojení na fyzické vrstvě. Definuje způsobu přechodu koncového zařízení do klidového režimu bez vysílání a procesu znovuoobnovení spojení. Definuje nové postupy zapouzdření uživatelských dat. Technologie SHDSL dle IEEE 802.3ah zařazena jako 2Base-TL mezi technologie standardizované pro přenos Ethernetu v přístupových metalických sítích (Ethernet in the First Mile). Při sdružování více vedení do svazku (Pair Bonding) lze dosáhnout rychlostí až v desítkách Mbit/s. Dnes je běžné sdružování 2 a 4 párů.

### **PLC (Power Line Communication)**

Obecným termínem PLC se označuje technologie umožňující širokopásmový přenos dat prostřednictvím energetické sítě. Zkratka PLC není jednou zkratkou, která se v souvislosti s datovými přenosy po energetické síti používá. V praxi se též můžeme setkat se zkratkami BPL (Broadband Power Line Communication) či v energetice používanější NPL (Narrowband Power Line Communication). Využití PLC je omezeno EMC limity. Z hlediska aplikace je možno rozlišit vnitřní systémy (In-Door) zajišťující konektivitu uvnitř bytů a domů a venkovní (Out-Door) systémy řešící připojení lokalit (např. připojení chytrých elektroměrů k transformovně). Technologie PLC jsou obecně vhodné pro přenos telemetrických dat a nekritických řídicích povelů v průmyslových sítích.

NPL - Technologie představuje jednoduchý systém pro pomalý přenos dat jedním nebo oběma směry prostřednictvím elektrorozvodných sítí. Typicky se používá pro sběr dat z měřidel nebo dálkové ovládání odběrných míst (HDO). NPL technologie dosahuje přenosových rychlostí řádově stovky kbit/s.

BPL - Koncová zařízení pracující v souladu s nejstarším PLC standardem Homeplug 1.0 umožňují realizovat datové přenosy o rychlosti až 14 Mbit/s. Jeho modifikací vznikl standard označovaná jako Homeplug 1.0 Turbo s maximální dosažitelnou přenosovou rychlostí až 85 Mbit/s. Posledním standardem pak je Homeplug AV s teoretickou přenosovou rychlostí až 200 Mbit/s.

## **10.7.3. Bezdrátové přenosové systémy**

### **Wi-Fi (Wireless Fidelity)**

Bezdrátová technologie Wi-Fi, která slouží pro propojení a připojení přenosných Wi-Fi zařízení do lokální sítě LAN nebo do distribučního segmentu sítě. K tomu využívá elektromagnetických vln v bezlicenčním ISM (Industrial, Scientific and Medical) frekvenčním pásmu (2,4 a 5 GHz). Technologie je definována v rámci rodiny standardů IEEE 802.11x. Řada výrobců přizpůsobuje tuto technologii i pro průmyslové nasazení. Typické přenosové rychlosti se pohybují okolo 54 Mbit/s a s novým standardem IEEE 802.11n až 600 Mbit/s při použití technologie MIMO

(Multiple In – Multiple Out), která je zvláště vhodná pro nasazení do průmyslového prostředí.

### **WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)**

Technologie WiMAX je bezdrátová technologie založená na standardech vytvořených sdružením IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), konkrétně na IEEE 802.16d (pevná služba WiMAX) a IEEE 802.16e (pohyblivá služba WiMAX). Technologie WiMAX je určena pro bezdrátový, širokopásmový datový přístup domácností i firem k síti. Používá se tedy k budování metropolitních sítí MAN (Metropolitan Area Network), kde by měl postupem času nahradit technologii WiFi, která byla původně určena pro lokální síť LAN (Local Area Network) a pro výstavbu větších sítí není vhodná. Jedná se o technologii určenou především pro poskytovatele, a proto klade důraz zejména na podporu kvality služeb QoS (Quality of Service) a možnost řízení a správy sítě, což umožní nasazení moderních aplikací, které vyžadují spolehlivý přenos a malé zpoždění (např. VoIP – Voice over Internet Protocol, přenos videa apod.). Technologie WiMAX umožňuje přenos dat při přímé viditelnosti v oblastech s nízkým rušením až na vzdálenost přibližně 50 km. Maximální dosažitelná přenosová rychlost na fyzické vrstvě pro komunikaci na přímou viditelnost je 268 Mbit/s. Komunikace bez přímé viditelnosti mezi vysílající a přijímající stanicí je možná až na vzdálenost přibližně 5 km maximální přenosovou rychlostí 75 Mbit/s. Je vhodná pro přenos telemetrických dat a kritických řídicích povelů v průmyslových sítích.

### **Síť radiových modemů**

Bezdrátová technologie pracující v licencovaných i bezlicenčních pásmech. Provoz sítě je možný v režimech bod – bod a bod – mnoho bodů. Maximální dosažitelná rychlost do 30 kbit/s. Přenosová rychlost je sdílená se všemi účastníky. Dosah bezdrátové sítě se pohybuje od 1 do 20 km v závislosti na použitém výkonu. Zpoždění se pohybuje v řádu desítek až stovek ms. Radiové modemy jsou vhodné pro přenos telemetrických dat a nekritických řídicích povelů; ve vhodné konfiguraci lze přenášet i kritické řídicí povelů.

### **FWA (Fixed Wireless Access)**

Též nazývaná Wireless Local Loop je bezdrátová síť poskytující širokopásmové propojení typu Point-to-Multipoint. Bezdrátová síť FWA představuje tzv. řešení poslední míle, kdy poskytovatel telekomunikační služby má možnost přímého přístupu ke koncovým zákazníkům. Význam slova fixed v názvu značí a předpokládá, že přípojka koncového uživatele bude fixní (stálá). FWA je spíše typem (druhem) sítě, a nikoli konkrétní technologií která tento typ sítě realizuje. To v praxi znamená, že síť FWA mohou být realizovány pomocí produktů různých firem, které ani nemusí být mezi sebou funkčně kompatibilní. Dokonce se mohou i výrazněji lišit svou efektivností a dalšími vlastnostmi.

### **IR**

Komunikační technologie pracující v infračervené oblasti světelného spektra. Optické rozhraní umožňuje zprostředkovat obousměrnou komunikaci mezi dvěma body (Point to Point). Ve většině případů jde o bezdrátové rozšíření standardů

sériových linek RS232 a RS485. V oblasti energetiky je tímto rozhraním vybavena většina inteligentních elektroměrů. Komunikační protokol je pak založen na standardech ČSN EN 62056-21 a IEC 61107.

## **Bluetooth**

Technologie Bluetooth je definovaná standardem IEEE 802.15.1. Spadá do kategorie osobních počítačových sítí, tzv. PAN (Personal Area Network). Vyskytuje se v několika verzích, z nichž v současnosti nejvíce využívaná je verze 2.0 a je implementována ve většině aktuálně (2010) prodávaných zařízení jako jsou např. mobilní telefony, notebooky, ale i televize. V současné době (2011) je nově vyvinuto rozhraní Bluetooth 4.0, u kterého výrobci slibují větší dosah (až 100 metrů), menší spotřebu elektrické energie a také podporu šifrování AES-128. Verze 2.0 pracuje v bezlicenčním pásmu 2,4 GHz a dosahuje přenosových rychlostí až 1,4 Mbit/s. Průmyslová specifikace technologie Bluetooth je vhodná pro lokální přenos telemetrických dat v průmyslových a senzorových sítích.

## **ZigBee**

Bezdrátová komunikační technologie vystavěná na standardu IEEE 802.15.4. Zigbee je poměrně novým standardem platným od listopadu 2004. Podobně jako Bluetooth je určena pro spojení nízko-výkonových zařízení v sítích PAN na malé vzdálenosti do 75 metrů. Díky použití multi-skokového ad-hoc směrování umožňuje komunikaci i na větší vzdálenosti bez přímé radiové viditelnosti jednotlivých zařízení. Primární určen směruje do aplikací v průmyslu a senzorových sítích. Pracuje v bezlicenčních pásmech (generální povolení) přibližně 868 MHz, 902–928 MHz a 2,4 GHz. Přenosová rychlost činí 20, 40, 250 kbit/s.

## **GSM (Global System for Mobile Communications)**

Původně Groupe Spécial Mobile je standardizovaná technologie pro digitální buňkové mobilní radiotelefonní systémy. Síť GSM přináší vyšší kapacitu systému, vysokou odolnost proti odposlechu a rušení (dáno typem použité modulace a kódováním), možnost jednoduché realizace mezinárodního roamingu, menší a úspornější terminály, větší nabídku funkcí, větší kompatibilitou s pozemními systémy i družicovými. Systémy GSM se ve světě používají od roku 1992. GSM se využívá různá frekvenční pásma (900, 1800, 1900 MHz), ale principy, typy rámců a protokoly jsou vždy shodné. GSM umožňuje v základní variantě realizaci datových přenosů o rychlosti 9,6 kbit/s.

GPRS (General Packet Radio Service) - Služba GPRS umožňuje přenos dat v mobilní telekomunikační síti GSM prostřednictvím komutace paketů. Služba GPRS je dostupná všude tam, kde je pokrytí signálem GSM od daného operátora a dovoluje přenášet data teoretickou rychlostí až 171,2 kbit/s.

EDGE (Enhanced Data for GSM Evolution) - Technologie EDGE je rozšířením principu GPRS pro paketové datové přenosy v mobilní telekomunikační síti GSM. V porovnání s konvenčním GSM a GPRS je zde použit jiný druh modulace a vylepšeny stávající protokoly. Celkové teoretická přenosová rychlost se zvýšila až na 384 Kbit/s. Technologie EDGE je vhodné zejména pro provozovatele GSM sítí bez licence na síti třetí generace, kteří chtějí nabídnout poměrně rychlé datové přenosy.

## UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

Mobilní telekomunikační systém třetí generace, označovaný jako 3G (Third Generation). Cílem UMTS bylo od prvopočátku zdokonalit stávající technologie druhé generace mobilních systémů, především GSM. Tímto zdokonalením bylo zamýšleno vytvoření technologie, která bude primárně zaměřena na paketový přenos dat, dosáhne zvýšení přenosové rychlosti na rádiovém rozhraní a z uživatelského hlediska nabídne nové služby jako například přístup na Internet, videokonferenci, zábavu v podobě her, hudby či videoklipů. Teoreticky je možné dosáhnout rychlosti 384 kbit/s s plnou mobilitou (v dopravních prostředcích do 120 km/hod) a až 2 Mbit/s s omezenou mobilitou (pohyb chůzí méně než 10 km/hod).

HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) - Technologie HSDPA je zdokonalení stávající sítě UMTS. Standardizována je v UMTS Release 5 a zaměřuje se na vysokorychlostní přenos dat ve směru ke koncovému uživateli. Teoreticky dovoluje dosáhnout přenosovou rychlost až 14,4 Mbit/s u terminálu s omezenou mobilitou a 1,8 Mbit/s u terminálu s plnou mobilitou.

HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access) - Technologie HSUPA je zdokonalení stávající sítě UMTS. Standardizována je v UMTS Release 6 a zaměřuje se na vysokorychlostní přenos dat ve směru od koncového uživatele. HSUPA umožňuje dosažení teoretické přenosové rychlosti 5,76 Mbit/s.

LTE (3GPP Long Term Evolution) – Technologie je koncipována jako nástupce technologií GSM/EDGE a UMTS/HSPA. Jedná se o mobilní bezdrátovou technologii, která je určena pro vysokorychlostní přístup k síti Internet. Jako přenosové médium využívá volný prostor. Technologie LTE dosahuje přenosových rychlostí 64 Mbit/s pro sestupný směr a 30 Mbit/s pro vzestupný směr.

## 10.8. Přehled dostupných standardů

### 10.8.1. Technologie a protokol Ethernet

U systémů řízení technologie i řízení sítí jsou dílčí standardy a požadavky na jejich parametry obsaženy ve standardu IEC 61850, resp. v odkazech uvedených v tomto standardu. Komunikace dle tohoto standardu využívá pro přenos zpráv technologii Ethernet definovanou v IEEE 802.3. Dnes se jedná o nejčastěji používanou technologii v místních datových sítích. Fyzickou vrstvu této technologie lze realizovat na metalickém, ale i na optickém vedení, čímž lze dosáhnout velkých přenosových rychlostí. Formát Ethernet rámce na druhé vrstvě RM OSI zůstává zachován bez ohledu na typ použité fyzické vrstvy. Ethernet rámce lze rovněž přenášet pomocí různých bezdrátových komunikačních systémů (FWA, WiMAX apod.) a technologií pro komunikaci po silových vedeních - NPL.

V Ethernet sítích je také definována podpora virtuálních sítí dle standardu IEEE 802.1Q, tzv. VLAN, které umožní v rámci jedné fyzické datové infrastruktury provozovat několik vzájemně oddělených datových sítí. Tato technologie má přímo implementovanou podporu kvality služby QoS dle standardu IEEE 802.1P a tím i z toho vyplývající možnost prioritizace jednotlivých datových zpráv. Tuto vlastnost lze s výhodou využít pro přenos tzv. GOOSE zpráv definovaných v IEC 61850-8-1. Specifickou úlohou těchto zpráv je vytvoření potřebných horizontálních vazeb pro potřeby chránění v sítích vn, které vyžaduje zajištění vzájemné komunikace mezi



IED sousedících rozvodn. Aby mohly být tyto funkce vhodně implementovány, je nutné, aby síťová zařízení (přepínače) měla jejich plnou podporu.

Zálohování přenosových cest je u technologie Ethernet řešeno několika způsoby. V rámci standardu IEEE 802.1D existuje protokol RSTP (Rapid Spanning Tree Protocol), který dokáže přepnout na záložní cestu v řádu stovek ms. Existují speciální protokoly, u nichž se doba přepnutí na záložní cestu pohybuje v řádu jednotek až desítek ms. Tyto protokoly jsou firemní (proprietární) a jsou převážně užívány v zařízeních určených do průmyslového nasazení. Použití těchto protokolů je omezeno nutností použít síťové prvky jednoho výrobce v daném segmentu sítě.

Technologie Ethernet rovněž disponuje i metodami pro zajištění časové synchronizace. První metoda se nazývá synchronní Ethernet nebo též síťová synchronizace. Ta používá externí hodinový signál podle doporučení G.8261 a každý uzel v síti tuto informaci obnovuje a musí tedy tuto technologii podporovat. G.8261 definuje minimální tolerance zařízení pro jitter a wander. Výhodnou je, že přesnost synchronizace touto metodou nezávisí na celkovém zatížení dané linky. Druhá metoda se nazývá paketová synchronizace a je definována IEEE 1588v2. Tato metoda není závislá na fyzické vrstvě ale může být ovlivněna vlastnostmi přenosového řetězce (jitter). Poskytuje rovněž informaci o tzv. ToD (Time of Day), která je nezbytná pro přesné monitorování SLA. IEEE 1588v2 je založena na principu klient / server, kdy server distribuuje synchronizační informaci a uzly po cestě nemusejí nezbytně synchronizaci podle tohoto doporučení podporovat. Obě metody synchronizace lze kombinovat. Kromě těchto metod existují speciální varianty protokolu Ethernet zaměřené na aplikace reálného času, jak je zmíněno v textu dále.

Technologie Ethernet představuje základní komunikační systém celé Smart grid datové sítě. Kromě jejího použití pro přenos zpráv řízení, je využitelná i pro další služby provozované ve Smart Grid.

## **IEC 61850**

Standard IEC 61850 (český ekvivalent ČSN EN 61850) je souborem norem soustředěných pro komunikaci v energetice. Tento soubor definuje pravidla pro komunikaci mezi zařízeními v rozvodnách, stanovuje požadavky z hlediska komunikace na rozvodny a jejich zařízení, metodicky podporuje tvorbu komunikačních sítí a integrace jednotlivých zařízení.

Základním cílem při tvorbě tohoto souboru norem bylo umožnit vytváření systémů, v nichž budou komunikovat zařízení od různých výrobců. Tato zařízení, spojená komunikační sítí, se označují zkratkou IED (Intelligent Electronic Devices) a zajišťují ochranu rozvodny, dohled nad jejím provozem a automatizaci, měření a regulaci v rozvodně. Soubor norem IEC 61850 zajišťuje vzájemnou součinnost zařízení a systémů v rozvodnách tím, že standardizuje jejich rozhraní, protokoly a datové modely. To umožňuje snížit náklady na integraci zařízení rozvodn. Soubor norem IEC 61850 definuje také komunikace i mezi rozvodnami a dalšími prvky elektrizační sítě (elektrárnami, dispečinkem atd.).

Protože protokoly IEC 61850 vycházejí z Ethernetu, je možné využít mnoho stávajících nástrojů a zařízení pro dohled a řízení. Každý uzel sítě, dle IEC 61850, připojený jako klient může řídit provoz na síti a komunikovat se všemi servery i podřízenými zařízeními. Protože podřízená zařízení jsou zpravidla zařízení IED,

kteřá ovládají např. transformátory nebo spínače v rozvodnách, může klient sbírat množství provozních dat, která mu jednotlivá IED poskytují ke čtení.

Na rozdíl od mnoha jiných protokolů, které neumožňují vytvářet a přenášet soubory aktuálních a historických dat o provozu zařízení, protokoly IEC 61850 umožňují přenášet z IED do systémů SCADA soubory dat s informacemi o jejich aktivitách. Je možné také vytvářet profily časových průběhů provozních veličin, a to v režimu off-line. Zatímco u režimu on-line je doba obnovy dat až v jednotkách sekund, v režimu off-line mohou být data sbírána s periodou vzorkování v milisekundách, ukládána v zařízení a najednou přenesena do systému SCADA, kde potom mohou být použita k analýze událostí.

Soubor norem IEC 61850 má několik částí. Normy byly publikovány pod soubornými názvy v anglickém originále Communication networks and systems in substations a Communication networks and systems for automation of power utility.

**IEC 61850-1 až 4** - První čtyři části souboru norem IEC 61850 popisují a specifikují prostředí, terminologii, požadavky na zařízení atd.

**IEC 61850-5** - Standardizuje komunikaci mezi IED, jako jsou ochrany, odpojovače, nebo transformátory, a systémem rozvodny.

**IEC 61850-6** - Specifikuje formáty souborů pro popis konfigurace jednotlivých IED a souborů parametrů spojených s komunikací a konfigurací komunikačního systému. Zajišťuje, společně s částmi 5 a 7, kompatibilitu inženýrských nástrojů od různých dodavatelů.

**IEC 61850-7** - Sedmá část normy je rozdělena do dvou částí:

**IEC 61850-7-410** - Komunikace pro sledování a řízení, jenž definuje doplňkové obecné třídy dat, logické uzly a datové objekty speciálně pro vodní elektrárny

**IEC 61850-7-420** - Základní komunikační struktura – Logické uzly pro decentralizované zdroje elektrické energie, které definují informační modely pro výměnu informací v sítích s decentralizovanými zdroji elektrické energie a akumulacími stanicemi (agregáty s pístovými motory, palivové články, mikroturbíny, fotovoltaika, kombinovaná výroba tepla a elektrické energie a zařízení pro akumulaci elektrické energie).

**IEC 61850-8** - Osmá část má jediný díl, IEC 61850-8-1: Mapování specifických komunikačních služeb (SCSM) – Mapování na MMS (ISO 9506-1 a ISO 9506-2) a na ISO/IEC 8802-3. Tento díl specifikuje metody pro výměnu časově kritických i nekritických dat po místních sítích pomocí mapování na MMS a na ethernetové rámce z ISO/IEC 8802-3 (IEEE 802.3). Protokoly a služby MMS umožňují podporu systémů s centralizovanou i decentralizovanou architekturou. Díl specifikuje výměnu dat v reálném čase, řídicí činnosti a sdělování zpráv.

**IEC 61850-9** - Devátá část je rozdělena do několika částí a stejně jako předchozí část se rovněž zabývá mapováním specifických komunikačních služeb:

**IEC 61850-9-1** - Přenos vzorkovaných hodnot po sériovém jednosměrném (neorientovaném) vícebodovém spoji bod-bod definuje mapování specifických komunikačních služeb pro komunikaci na úrovni pole rozvodny. Norma platí pro elektronické transformátory proudu s digitálním výstupem přes slučovací jednotku,

používané v elektronických měřicích přístrojích a zařízeních ochrany jako součást automatizovaných systémů rozvodných.

**IEC 61850-9-2** - Vzorkované hodnoty z ISO/IEC 8802-3 je stanoveno mapování SCSCM pro přenos vzorkovaných hodnot v souladu s abstraktní specifikací podle IEC 61850-7-2. Je zde kombinován přímý přístup na sdílená přenosová média s metodou řízení přístupu CSMA/CD (ISO/IEC 8802-3) a mapování podle IEC 61850-8-1.

**IEC 61850-10** – Část s názvem: „Komunikační sítě a systémy v podřízených stanicích“. Zkoušky shody a definuje metody a abstraktní případy zkoušek pro zkoušení shody zařízení používaných v automatizovaných systémech rozvodu.

V protokolu IEC 61850 se vyskytují dva základní typy zpráv:

**GOOSE (Generic Object Oriented Substation Events)** - Generická, objektové orientovaná událost rozvodny. Stavová data a hodnoty proměnných jsou tu seskupeny do jednoho datového objektu a přenášeny v daném časovém intervalu. Účelem je nahradit konvenční zařízení pro logické řízení, potřebná pro koordinování vnitřní komunikace po sběrnici rozvodny. Když je detekována událost, zařízení IDE použijí přenos typu multicast, aby o ní informovala zařízení, která jsou registrována pro odběr jejich dat. Na komunikaci jsou kladeny přísné požadavky: od vzniku události do odeslání zprávy nesmí uplynout více než 4 ms.

**GSSE (Generic Substation State Events)** - Generická stavová událost rozvodny. Prostřednictvím GSSE se přenášejí pouze stavová data. Využívá se přitom stavový seznam, což je v podstatě řetězec bitů, nikoliv datový objekt. Zprávy GSSE jsou přenášeny prostřednictvím MMS. Ve srovnání s GOOSE trvá jejich zpracování a přenos déle.

## ProfiNET

Profinet, který je součástí standardu IEC 61158, byl vyvinut organizací PNO (Profibus Nutzerorganisation), jejímiž členy jsou přední světové firmy působící v oblasti automatizace. Dále se na vývoji významně podílela firma Siemens. Profinet je k dispozici od roku 2002. Profinet existuje ve dvou variantách založených na standardním provedení hardwaru pro Ethernet, a to jako Profinet CBA, který se typicky používá pro přenos velkého množství dat mezi CPU, a jako Profinet IO, který je používán pro komunikaci na úrovni senzorů a aktuátorů. Více informací k tomuto protokolu je uvedeno v [3].

## Ethernet PowerLink

První verze standardu Ethernet Powerlink byla uvedena na trh v závěru roku 2001 rakouskou firmou Bernecker & Rainer Industrie Elektronik GmbH. Rok nato byla ustavena organizace EPSG (Ethernet Powerlink Standardization Group) a v roce 2003 vyšla jako Ethernet Powerlink v2 druhá verze standardu, která rozšiřuje původní Ethernet Powerlink v1 především o aplikační vrstvu v podobě standardizovaného aplikačního rozhraní založeného na mechanismech definovaných ve standardu komunikačního protokolu CAN-open.

Systém Ethernet Powerlink důsledně vychází ze standardu Ethernet. Využívá všechny existující standardy Ethernetu, lze pro něj použít veškerá dostupná aktivní

i pasivní síťové komponenty určené pro klasický Ethernet. Tento protokol dosahuje výborných vlastností reálného času díky čistě softwarovým mechanismům. Více podrobností k tomuto protokolu lze nalézt v [3].

## 10.8.2. Rodina protokolů TCP/IP

Tato rodina protokolů využívá technologii Ethernet, rozšiřuje ji a umožňuje vytvářet mnohem sofistikovanější datovou infrastrukturu schopnou provozovat mnohem širší portfolio aplikací.

Vzájemná komunikace ve vertikálním směru mezi řídicími systémy technologie, sítě a dispečerským řídicím systémem je realizována protokolem IEC 60870-5-104, který vyžaduje odpovídající síťové propojení na třetí vrstvě RM OSI založené na protokolu IPv4 (případně IPv6), který je doplněn o protokoly TCP a UDP nacházející se na vrstvě čtvrté. Komunikační prostředky této úrovně se souhrnně nazývají rodina protokolů TCP/IP. Komunikace těmito protokoly převážně probíhá na úrovni MAN a WAN. V některých případech bude použití tohoto protokolu rozšířeno i do úrovně LAN (RTU, AMM apod.). Obdobně jako u technologie Ethernet, je do protokolu IP také implementována podpora kvality služby a tím je umožněna prioritizace přenášených dat. Komunikace na třetí vrstvě RM OSI rovněž umožňuje mnohem sofistikovanější směrování datových toků vedoucí k optimálnějšímu využívání přenosové kapacity sítě. Směrování lze provádět pomocí některého z dynamických směrovacích protokolů, které jsou schopny provádět i rozdělení zátěže (Load Balancing) v síti, a tím optimálně vyvažovat provozní zatížení sítě. Tyto protokoly umožňují provádět i zálohování přenosových cest podobně, jako u technologie Ethernet. Zde se však doba přepnutí na záložní cestu pohybuje v řádech stovek ms až jednotek s.

Typickým zástupcem těchto směrovacích protokolů je OSPF (Open Shortest Path First). Odlišný přístup pro úroveň sítě s vyšší přenosovou kapacitou a s garancí kvality služby nabízí systém MPLS (Multiprotocol Label Switching), který je obvykle nasazován ve WAN sítích, ale díky svým vlastnostem se hodí i do rozsáhlejších sítí MAN. Jeho nevýhodou pro nasazení v sítích MAN jsou mnohem vyšší pořizovací náklady a vyšší nároky na kvalitu síťové infrastruktury.

IP protokol podporuje mechanismy všesměrového (Broadcast) a směrového (Multicast) vysílání, které jsou využitelné například pro rozesílání hromadných příkazů a nastavení.

Transportní protokol TCP (Transmission Control Protocol) je spojově orientovaný protokol pro přenos libovolně dlouhého bloku dat s garancí jeho doručení příjemci. V současnosti je jeho základní koncept zdokumentován v IETF (RFC 793). Protokol IEC 60870-5-104 používá pro transport příkazů a dat právě protokol TCP.

Transportní protokol UDP (User Datagram Protocol) je navržen pro posílání zpráv, které nezbytně nevyžadují zpětné potvrzení o doručení. Tento protokol je definován v IETF (RFC 768). Protokol UDP je vhodný tam, kde je vyžadována jednoduchost a rychlost komunikace. Typickým příkladem je přenos digitalizovaného hlasového signálu a videa. Další aplikací jsou informační zprávy používané protokolem SNMP pro dohled nad sítí. V rámci Smart Grid standardizace není

tento protokol v současné době využíván a jeho použití se vztahuje pouze k segmentu ICT sítí.

## IEC 60870

Standard IEC 60870 (český ekvivalent ČSN EN 60870) je mezinárodní komunikační standard specifikující komunikační protokoly určené pro systémy dálkového řízení a systémy SCADA používané v geograficky rozlehlých soustavách, zejména v elektrizační síti. IEC standard zaručuje interoperabilitu pro systémy od různých dodavatelů.

IEC 60870 - část 5 - (v české soustavě norem ČSN EN 60870-5 Systémy a zařízení pro dálkové ovládání. Část 5: Komunikační protokoly) Část 5 specifikuje přenosové protokoly pro dálkové ovládání zařízení a soustav, které jsou založeny na sériovém přenosu binárně kódovaných dat a jsou určeny pro dohled a ovládání geograficky rozlehlých procesů. Normy IEC 60870-5 vycházejí z modelu master-slave a specifikují funkce užitečné pro systémy dálkového ovládání. Základní části tohoto standardu jsou:

IEC 60870-5-1 – Tato část definuje formáty přenosového rámce, asynchronní přenos dat s linkovými protokoly half-duplex a full-duplex, standardy pro kódování, formátování a synchronizování datových rámců s hodnotami proměnných a metody zajištění integrity dat,

IEC 60870-5-2 – Standard definující procedury spojového přenosu. Typicky procedury pro sériový přenos kódovaných digitálních dat,

IEC 60870-5-3 – Definice obecné struktury aplikačních dat. Tzn. pravidla pro strukturování jednotek aplikačních dat v přenosových rámcích,

IEC 60870-5-4 - Definice a kódování aplikačních informačních prvků. Stanovení pravidel pro definování informačních prvků, zvláště digitálních a analogových procesních proměnných, často používaných v systémech dálkového řízení,

IEC 60870-5-5 Základní aplikační funkce. Standardy pro zajištění interoperability různých zařízení elektrizační soustavy.

IEC 60870-5-101 - Společná norma pro základní úkoly dálkového ovládání. Primárním posláním je umožnit funkční interoperabilitu mezi kompatibilními zařízeními dálkového řízení. V normě jsou rovněž definovány principy asynchronní komunikace dle V.24 a přenos úplné časové značky události.

IEC 60870-5-102/103 - Specifikují další společné standardy, první pro přenos integrovaných součtových hodnot v elektrizačních soustavách a druhá pro informační rozhraní ochrany (zajišťuje interoperabilitu mezi ochranami a zařízeními řídicího systému podřízené stanice).

IEC 60870-5-104 – Norma nazvaná „Síťový přístup pro IEC 60870-5-101“ používá normalizované transportní profily. Zjednodušeně řečeno část -101 specifikuje mechanismy přenosu dat a část -104 doporučuje jejich použití v běžných komunikačních sítích jako je Ethernet a rodina protokolů TCP/IP.

IEC 60870-6 – Tato kapitola se týká protokolů pro dálkové ovládání kompatibilních se standardy ISO a doporučeními ITU-T. Od části 5 se liší zejména tím, že vychází z modelu klient-server a je využívána pro větší systémy zpracování dat

a počítačové sítě. Jde především o přenos informací mezi jednotlivými dispečinkami elektrizační soustavy a mezi nimi a dispečinkami elektráren.

## **IEC 61968/61970**

Standardy IEC618450 pro DMS systémy a IEC61970 pro EMS systémy definují pravidla pro výměnu informací mezi kontrolními centry za použití společného informačního modelu (CIM). Definují rozhraní a model předávání zpráv pro komunikaci mezi řídicími aplikacemi. CIM umožňuje aplikačnímu programovému vybavení výměnu informací o konfiguraci a stavu elektrické sítě.

Nejdůležitější části této normy jsou:

CIM datový model je popsán v IEC 61970 část 3 a IEC 61968 část 11 pomocí Unified Modeling Language (UML). CIM je abstraktní model, který představuje všechny hlavní objekty energetického podniku. Tento model zahrnuje veřejné třídy a atributů těchto objektů, ale i vztahy mezi nimi.

IEC 61970 část 4 a IEC 61968 část 1 popisují aplikace zapojené do výměny dat v rámci modelu CIM. Aplikace se může skládat z jedné nebo více složek. Komponenta je součástí aplikace, která poskytuje nedělitelnou jednotku funkcí a vystavuje rozhraní pro další komponenty. Standard definující rozhraní vystavované komponentou se nazývá Component Interface Specification (CIS).

## **10.8.3. Průmyslové komunikační standardy**

### **MODBUS**

Komunikační protokol používaný především v řídicích systémech průmyslových technologií. Jedná se o otevřený sériový protokol typu Master / Slave. Je to široce využívaný protokol vzhledem k jeho snadnému použití a spolehlivost. Velmi často je využíván i u zařízení používaných na úrovni sítí nn (řídicí systémy, komponenty pro monitorování, řízení a chránění, a dalších). Pakety protokolu jsou určeny pouze pro odesílání dat, nepodporují posílání parametrů, jako je název místa, rozlišení, jednotky atd. I přes omezení protokolu ModBUS stále existuje mnoho dobrých důvodů pro využití tohoto standardu.

V současné době je podporována celá řada komunikačních médií např. sériové linky typu RS-232, RS-422 a RS-485, optické a rádiové sítě nebo síť Ethernet s využitím protokolu TCP/IP. Komunikace probíhá metodou požadavek-odpověď a požadovaná funkce je specifikována pomocí kódu funkce, jež je součástí požadavku.

### **Profibus**

Průmyslová sběrnice používána při automatizaci výrobních linek a řízení výroby. Velmi často je využíván i u zařízení používaných na úrovni sítí nn (řídicí systémy, komponenty pro monitorování, řízení a chránění, a dalších). Mezi nejrozšířenější varianty komunikačního protokolu PROFIBUS patří PROFIBUS DP a PROFIBUS PA.

**PROFIBUS DP** - Využívá se ve většině zařízení průmyslové automatizace, výrobních linkách a CNC strojích, kde jsou do této sběrnice připojeny řídicí auto-

maty, frekvenční měniče, vzdálené periferie IO, operátorské panely apod. Kabel pro PROFIBUS DP je tvořen dvěma vodiči (červený/zelený), které zajišťují datový přenos o různých rychlostech (např. 500kB, 1,5Mb, 3Mb, 6Mb, 12Mb). Zařízení připojená do sběrnice PROFIBUS DP mají své vlastní napájení.

**PROFIBUS PA** – Používá se v procesní automatizaci a najdeme ho spíše v provozech, kde se sbírají data z velkých vzdáleností, kde není kladen důraz na rychlost čtení/zápis hodnoty, kde je výbušné prostředí apod. Na rozdíl od PROFIBUS DP je protokol PROFIBUS PA přenášen pouze jednou rychlostí 31,25kb a po stejných vodičích je zároveň napájeno připojené zařízení PROFIBUS PA.

#### 10.8.4. IEEE 2030

Pro inteligentní energetické sítě se postupně vytvářejí standardy pokrývající řízení energetické sítě, automatické odečty a ovládání odběrných míst i inteligentní budovy a inteligentní domácnosti. Za jeden z klíčových standardů se považuje IEEE P2030 (*Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation With the Electric Power System, and End-Use Applications and Loads*), který je ke dni 13. 7. 2011 dostupný v draftu D6.

Tento standard nabízí alternativní přístupy a osvědčené postupy pro dosažení vzájemné efektivní spolupráce inteligentních sítí. Jedná se o první standard organizace IEEE, který poskytuje základní rámec pro vytváření národních a mezinárodních norem IEEE zabývajících se problematikou inteligentních sítí. Vychází ze zkušeností získaných z komunikace v prostředí řídicích a průmyslových sítí.

IEEE Std 2030 zavádí referenční model SGIRM (Smart Grid Interoperability Reference Model), terminologii, základní vlastnosti, optimální výkon, zatížení a hodnotící kritéria pro inteligentní sítě a v neposlední řadě definuje použití těchto technických principů pro inteligentní sítě v prostředí přenosových elektrických soustav. Referenční model SGIRM představuje konstrukční nástroj, který ze své podstaty umožňuje rozšiřitelnost, škálovatelnost a možnost budoucího vývoje.

SGIRM definuje tři možné aspekty z hlediska architektury inteligentních sítí. A to z hlediska energetických systémů, komunikačních a informačních technologií. Dále definuje klasifikaci datového toku nezbytného pro efektivní spolupráci inteligentních.

Referenční model, kritéria a zásady při návrhu inteligentních sítí jsou řešeny s důrazem na funkční rozhraní identifikace, logické vazby, datové toky, komunikaci, management a efektivní využití elektrické energie.

## 10.9. Literatura

- [1] Boháč, L. – Bezpalec, P. Komunikace v datových sítích. Cvičení. 1. vyd. Praha, Vydavatelství ČVUT, 2006.
- [2] Pužmanová, R. TCP/IP v kostce. Nakladatelství Kopp, 2004.
- [3] ZEŽULKA, F. – HYNČICA, O.: Průmyslový Ethernet VIII: Ethernet Powerlink, Profinet. Automa, 2008, roč. 14, č. 1, s. 63–66.
- [4] Webové stránky ITIL IT Service Management. <http://www.itil.cz/>
- [5] ITIL Powering UP, Available: <http://www.baselinemag.com/c/a/IT-Management/Powering-Up-630320/>.



# 11. Dodatky

## 11.1. Přehled základních principů elektrotechniky

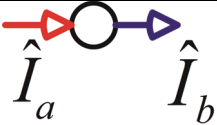
### 11.1.1. Koncepce volby kladných směrů

Funkce elementů a fragmentů elektrické části elektráren se matematicky zachycuje pomocí rovnic, nebo graficky znázorňuje fázorovými diagramy. Pro jejich správné sestavení je na začátku analýzy třeba zvolit znaménkovou koncepci pro volbu kladných směrů elektrických veličin napětí proudů a výkonů. Konzistentní fyzikální interpretace výsledků řešení, zejména aplikace bilančních zákonů zachování, vyžaduje jednoznačné vyhodnocení informací kterou poskytují. Po tomto vyhodnocení je možné ve schématu určit, kudy a jakým směrem teče proud a nebo jaký je aktuální směr napětí a znázornit poměry ve fázorovém diagramu, který musí být s rovnicemi vždy konzistentní a nese pro člověka názornou grafickou informaci. Existují v podstatě tři hlavní systémy, jejichž přívlstek je odvozen od kladné polaroty výkonu zdroje/spotřebiče:

| systém       | charakteristická vlastnost                      |
|--------------|-------------------------------------------------|
| spotřebičový | výkon spotřebiče je kladný                      |
| zdrojový     | výkon zdroje je kladný                          |
| smíšený      | výkon zdroje i spotřebiče mají stejnou polaritu |

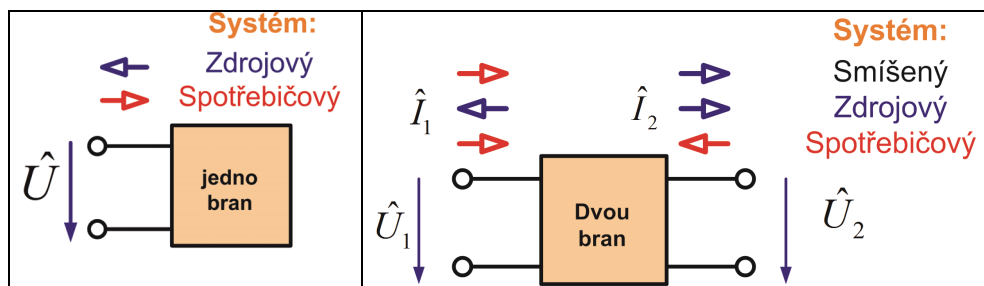
Tab. 11.1: Volba orientace proudů

Volba koncepce ovlivňuje i verbální formulaci bilančních zákonů: Například dle *tab. 11.2* v sytému smíšeném zní první Kirchhoffův zákon ve tvaru: Co do uzlu přitéká, to také z uzlu vytéká, a obě skupiny proudů mají stejnou polaritu. V systému spotřebičovém a zdrojovém stejný zákon říká, že součet proudů v uzlu je nulový. Přitékající a odtékající proudy musí mít v tomto případě navzájem obrácenou polaritu.

| název systému             | systém smíšený                                                                      | systém spotřebičový                                                                 | systém zdrojový                                                                      |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| matematický zápis bilance | $\hat{I}_a - \hat{I}_b = \hat{0}$                                                   | $\hat{I}_a + \hat{I}_b = \hat{0}$                                                   | $\hat{I}_a + \hat{I}_b = \hat{0}$                                                    |
| schéma                    |  |  |  |

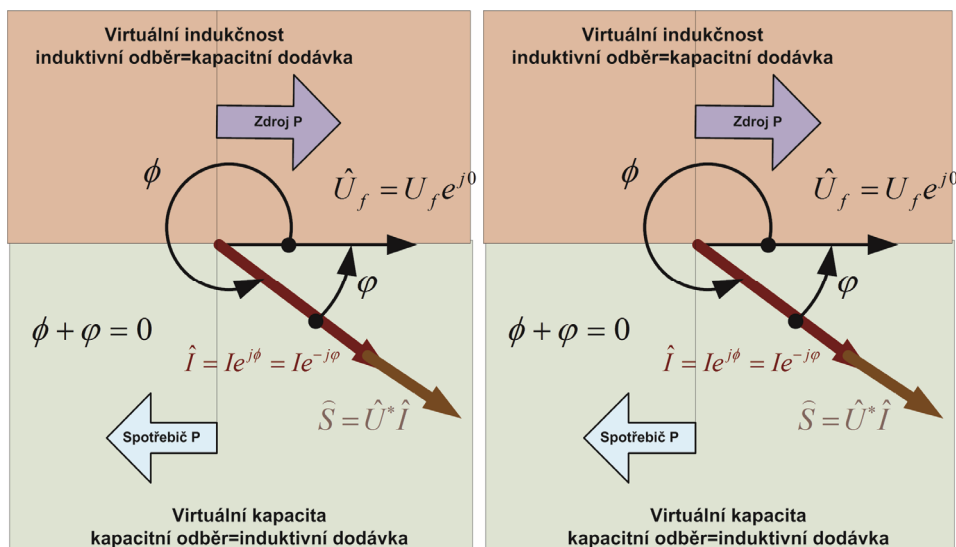
Tab. 11.2: Tabulka proudových bilancí uzlu

Analogickou situaci volby kladných směrů nabízí analýza poměrů na jedno a dvoubranech systému. Branou se v teorii obvodů označuje vzájemně přiřazená dvojice svorek tvořící hraniční body schématu.



**Tab. 11.3: Tabulka volby kladných směrů na jedno a dvoubranu**

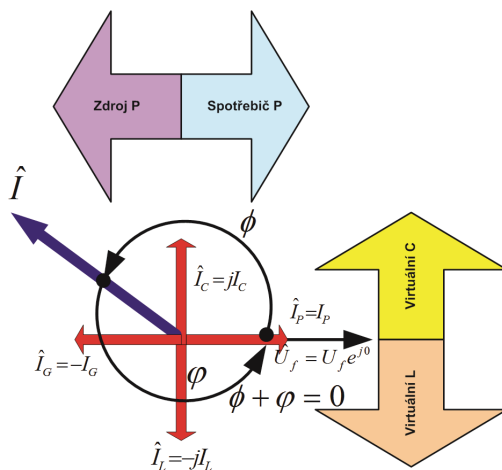
Problém polarit výkonu navíc komplikují komplexně sdružené možnosti pro definici zdánlivého výkonu:  $\hat{S} = \hat{U} \cdot \hat{I}^*$  nebo  $\hat{S}^* = \hat{U}^* \cdot \hat{I}$ . Jalové výkony indukčnosti a kapacity jsou při jedné zvolené možnosti navzájem komplementární. Spotřebič induktivního výkonu je současně zdrojem kapacitního výkonu a naopak spotřebič kapacitního výkonu je zdrojem induktivního výkonu. Dvě komplexně sdružené definice zdánlivého výkonu mají tu vlastnost, že je-li jalový výkon podle jedné definice spotřebičem, pak podle druhé definice je zdrojem. Tyto vlastnosti je nutné přesně respektovat a jsou znázorněny ve názorových diagramech zdroje ve spotřebičovém a zdrojovém systému a shrnuty v tabulce.



**Obr. 11.1: Fázorový diagram spotřebiče a zdroje**

| Poloha fázoru proudu |                    | chování<br>zdroje jako<br>virt. zátěž                                                                                              | P, lč           | Q, lj               |                     | systém                 |
|----------------------|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| $\phi$               | $\varphi$          |                                                                                                                                    |                 | $\hat{U}^* \hat{I}$ | $\hat{U} \hat{I}^*$ |                        |
| 0-0.5 $\pi$          | 2 $\pi$ -1.5 $\pi$ | spotř. Qc<br>zdroj Q <sub>L</sub>                                                                                                  | >0<br>spotřebič | >0                  | <0                  | s<br>p<br>o<br>t<br>ř. |
| 0.5 $\pi$ - $\pi$    | 1.5 $\pi$ - $\pi$  |                                                   | <0<br>zdroj     |                     |                     |                        |
| $\pi$ -1.5 $\pi$     | $\pi$ -0.5 $\pi$   | <br>spotř. Q <sub>L</sub><br>zdroj Q <sub>C</sub> | <0<br>zdroj     | <0                  | >0                  |                        |
| 1.5 $\pi$ -2 $\pi$   | 0.5 $\pi$ -0       |                                                                                                                                    | >0<br>spotřebič |                     |                     |                        |
| 0-0.5 $\pi$          | 2 $\pi$ -1.5 $\pi$ |                                                                                                                                    | >0<br>zdroj     | >0                  | <0                  | z<br>d<br>r            |
| 0.5 $\pi$ - $\pi$    | 1.5 $\pi$ - $\pi$  |                                                                                                                                    | <0<br>spotřebič |                     |                     |                        |
| $\pi$ -1.5 $\pi$     | $\pi$ -0.5 $\pi$   | spotř. Qc<br>zdroj Q <sub>L</sub>                                                                                                  | <0<br>spotřebič | <0                  | >0                  |                        |
| 1.5 $\pi$ -2 $\pi$   | 0.5 $\pi$ -0       |                                                   | >0<br>zdroj     |                     |                     |                        |

Tab. 11.4: Spotřebičový systém a zdrojový systém



$$\hat{I} = \hat{I}_p + \hat{I}_g + \hat{I}_L + \hat{I}_C = (I_p - I_g) + j(I_C - I_L)$$

$$\hat{I} = I e^{j\phi} = I e^{-j\varphi}$$

Obr. 11.2: Polohy proudu v různých systémech

## 11.2. Ekvivalence mezi zdroji

Theveninova a Nortonova poučka říká, že z hlediska brány lze v pracovním bodě nahradit složité schéma napěťovým nebo proudovým jednobranem. Tyto jednobrany se využívají k modelování v těchto konfiguracích:

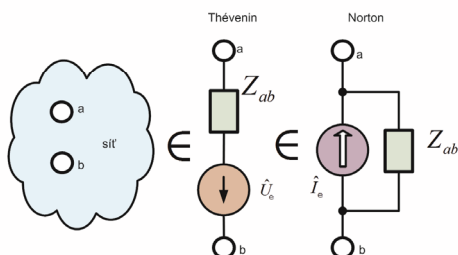
- Aktivní jednobran je spojení ideálního zdroje napětí a impedance nebo jeho ekvivalentu s proudovým zdrojem. Reprezentuje model točivého stroje (motor, generátor) se svými impedancemi v ustáleném i částečně přechodném stavu. Obvykle je zapojen v příčné větvi schématu
- Pasivní jednobran, realizovaný impedancí s nulovými hodnotami ideálních zdrojů, reprezentuje v podélné větvi schématu vedení nebo transformátor a v příčné větvi impedanci zátěže nebo svodu vedení či transformátoru

Mezi jednobrany s napěťovými a proudovými zdroji spojenými s impedancemi existuje ekvivalence umožňující přecházet obousměrně mezi oběma typy zdrojů.

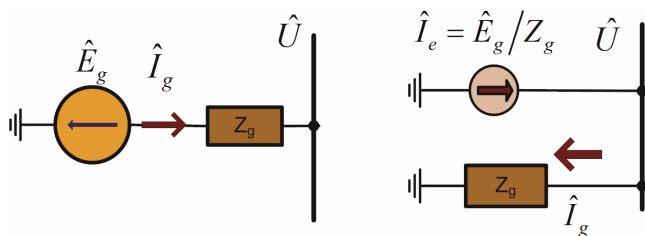
$Z_{ab}$ .....viděná ekvivalentní impedance mezi svorkami a,b

$\hat{U}_e$ .....Theveninův ekvivalentní napěťový zdroj

$\hat{I}_e$ .....Nortonův ekvivalentní proudový zdroj



Obrázek 11.3: Ekvivalence zdrojů



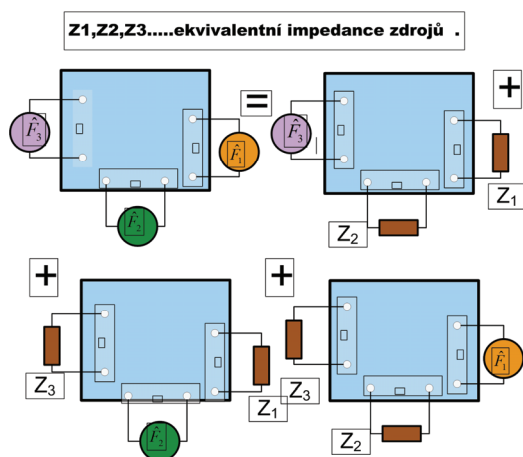
Obr. 11.4: schéma práce elektrárny do předávacího bodu

Uvedená schémata vychází z podmínky ekvivalentnosti chování obou typů zdrojů znamenající, že elektrické poměry připojených obvodů se záměnou zdrojů nemění. Tato ekvivalence umožňuje vyjádřit kvazistacionární režim soustavy impedančním schématem, ve kterém proudové zdroje napájí pasivní síť. Pasivní síť je tvořena podélnými a příčnými pasivními jednobrany. Polaritu proudu proudového

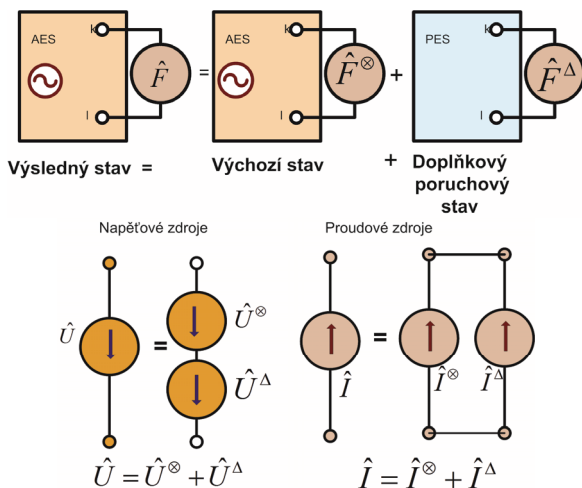
zdroje určuje použitý systém kladných směrů (zdrojový, spotřebičový). Ve zdrojovém systému je polarita kladná pro dodávku a záporná pro odběr.

### 11.2.1. Princip superpozice

Podle principu superpozice je výsledné působení více lineárních zdrojů napětí či proudu stejné jako součet působení těchto jednotlivých zdrojů ve schématu, ve kterém se ostatní zdroje nahradí jejich vnitřními impedancemi (0 u napěťového zdroje,  $\infty$  u proudového zdroje). Použití principu superpozice je dokumentováno na obr. 11.6.



Obrázek 11.5: Znázornění principu superpozice

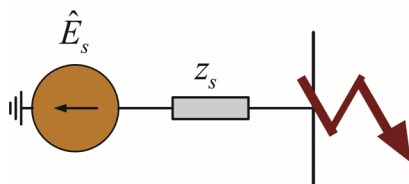


Obr. 11.6: Použití principu superpozice na výpočet poruch

Při aplikaci tohoto principu na výpočet poruch se vychází ze znázornění elektrického stavu na bráně systému jako superpozice předporuchového stavu a do-

plňkového poruchového stavu. Tuto superpozici podle povahy problému můžeme realizovat proudovými nebo napěťovými zdroji.

### 11.2.2. Zkratový výkon



Obr. 11.7: Zkrat

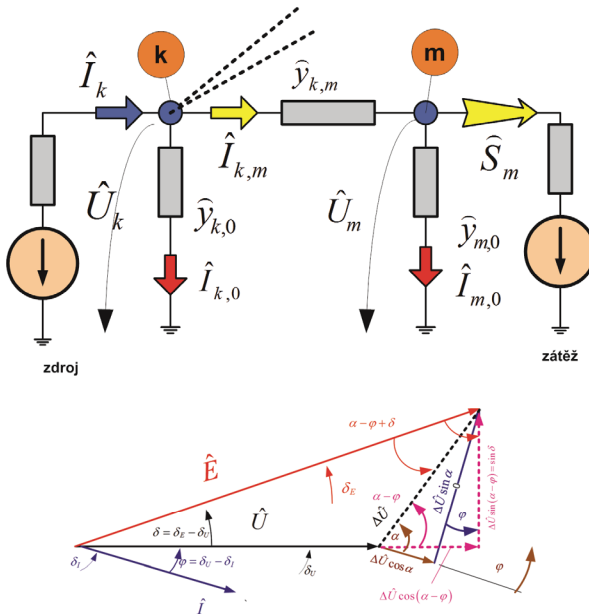
Zkratový výkon  $S_k''$  je smluvní veličina daná součinem standardy určeného napětí a zkratového proudu.  $S_k''$  je významná veličina pro dimenzování elektrického vybavení vlastní spotřeby.

|                                                                                                                                   |                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $U_b, S_b$                                                                                                                        | nezávislé vztažné veličiny                                                                                                                                |
| $I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b}, Z_b = \frac{U_b^2}{S_b}$                                                                   | závislé vztažné veličiny                                                                                                                                  |
| $z_s = \frac{Z_s}{Z_b}$                                                                                                           | poměrná impedance sítě                                                                                                                                    |
| $I_k'' = \frac{E_s}{\sqrt{3} \cdot Z_s}$                                                                                          | modul rázového zkratového proudu                                                                                                                          |
| $S_k'' = \sqrt{3} E_s I_k'' = \frac{E_s^2}{Z_s} = \frac{E_s^2}{z_s \cdot Z_b} = \left( \frac{E_s}{U_b} \right)^2 \frac{S_b}{z_s}$ | modul rázového zkratového výkonu                                                                                                                          |
| $S_k'' = \frac{S_T}{z_T}$                                                                                                         | zkratový výkon na sekundární straně transformátoru o výkonu $S_T$ , je-li k primárnímu vinutí připojen zdroj nekonečného výkonu o jeho jmenovitém napětí. |

### 11.2.3. Úbytek napětí

| vztah                                                                                                                        | Význam výrazu                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| $\hat{Z} = R + jX = Ze^{j\epsilon}$                                                                                          | Komplexní impedance sériového spojení R,X                   |
| $\hat{I} = \hat{I}_{re} + j\hat{I}_{im} = I_{re} + jI_{im} = I.e^{j\delta_i}$                                                | Komplexní proud a jeho rozklad do souřadnicových os         |
| $\Delta\hat{U} = \hat{Z}.\hat{I} = (R + jX)(\hat{I}_{\zeta} + \hat{I}_j)$                                                    | Úbytek napětí                                               |
| $\Delta\hat{U} = \Delta\hat{U}_{re} + \Delta\hat{U}_{im} = \Delta U_{re} + j\Delta U_{im} = \Delta U.e^{j\delta_{\Delta U}}$ | Komplexní úbytek napětí a jeho rozklad do souřadnicových os |
| $\Delta U_{re} = R.\hat{I}_{\zeta} + jX\hat{I}_j$                                                                            | Reálná složka úbytku napětí                                 |
| $\Delta\hat{U}_{im} = jX.\hat{I}_{\zeta} + R.\hat{I}_j$                                                                      | Imaginární složka úbytku napětí                             |

**Tab. 11.5: Tabulka vztahů kontroly pro výpočet úbytku napětí mezi dvěma body schématu**

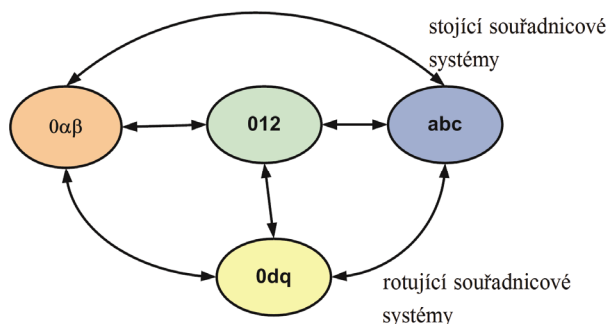


**Obr. 11.8: Úbytek napětí**

V sériovém spojení prvků r,x a při podmínce  $x \gg r$  má rozhodující vliv na modul úbytku napětí  $\Delta u$  reálná složka  $u_{re}$  zejména **součin reaktance a jalové složky proudu**. Pro orientační hodnocení napěťových poměrů vlastní spotřeby na napěťové úrovni vn se předpokládá, že profil napěťových modulů vytváří právě specifikovaný součin reaktance a jalové složky proudu. Z tohoto důvodu se všechny po-

měry zobrazují jen v imaginární ose a obvody tečou jen jalové proudy a všechny impedance schématu (podélné i příčné) jsou realizovány jen reaktancemi. Při kontrole napěťových poměrů zjednodušeným způsobem se vychází z výsledků, jejichž dokumentování je uvedeno v tab. 11.4 a fázorovém diagramu na obr. 11.8. Při analýze je třeba důsledně rozlišovat, že písmeno se stříškou má význam fázoru a písmeno bez stříšky reprezentuje jen reálné číslo s významem souřadnice vektoru (může být  $>0, <0, =0$ ) nebo modulu komplexního čísla či fázoru ( $>0, =0$ ).

### 11.3. Souřadnicové a složkové systémy v energetice



Obr. 11.9: Souřadnicové systémy v energetice

### 11.4. Reprezentace poruch ve složkovém systému

Pro analýzu poruch v trojfázovém systému se využívá transformace do složkových soustav. Výpočty ve složkových soustavách významně zjednodušují analyzované obvody s poruchou a poskytují tak efektivní řešení jak symetrických, tak nesymetrických poruch. Transformace ze složkových 0-1-2 do fázových a-b-c veličin je například pro napětí definována následovně:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} \quad (11.1)$$

kde komplexní konstanta  $a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$  a v maticovém zápise

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{abc} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \hat{U}_{012} \end{bmatrix} \quad (11.2)$$

a inverzní transformace (ze systému a-b-c do složek 0-1-2) jako:

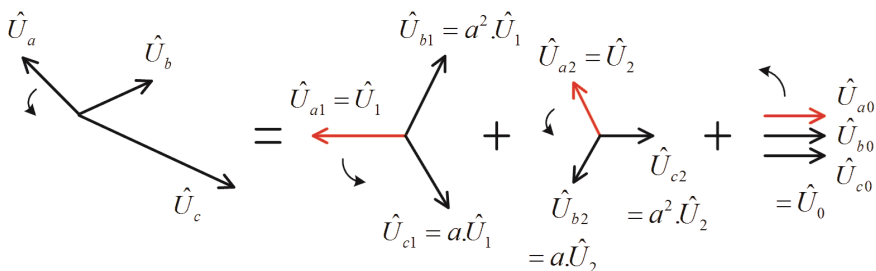


$$\begin{bmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} \quad (11.3)$$

v maticovém zápise

$$[\hat{U}_{abc}] = [T]^{-1} \cdot [\hat{U}_{012}] \quad (11.4)$$

Jednotlivé složky mají fyzikální význam, jak je vidět na *obr. 11.10*. Sousedná složka (1) má význam symetrického třífázového zdroje s dohodou stanoveným sledem fází (roztáčejíci motor v kladném smyslu), zpětná složka (2) má význam symetrického třífázového zdroje s opačným sledem fází (roztáčejíci motor v záporném smyslu) a netočivá složka (0) má význam jednofázového zdroje zapojeného do všech fází (motor neroztáčejíci). S použitím transformace fázových veličin do složek lze do složkových soustav přetransformovat rovněž celý trojfázový obvod a ve složkových soustavách ho vyřešit. Za předpokladu linearit jeho prvků je možné pak zpětnou transformací složkových veličin získat řešení pro fázové veličiny v trojfázovém systému.



**Obr. 11.10: Znázornění dekompozice do systému symetrických složek**

Obecný podélný článek elektrizační soustavy lze za předpokladu mezifázové symetrie popsat následující rovnicí:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z} & \hat{Z}' & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z} & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z}' & \hat{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} \quad (11.5)$$

Zavedeme-li transformaci do složek, získáme

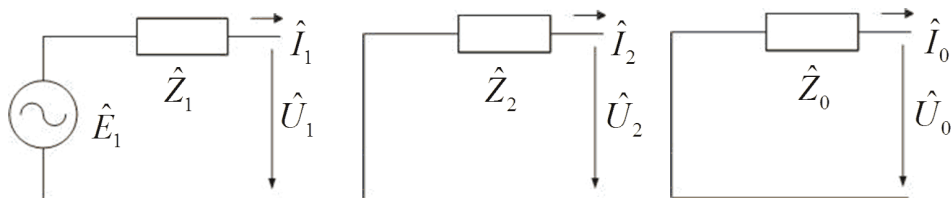
$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z} & \hat{Z}' & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z} & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z}' & \hat{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} \quad (11.6)$$

a tedy

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Z} & \hat{Z}' & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z} & \hat{Z}' \\ \hat{Z}' & \hat{Z}' & \hat{Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} =$$

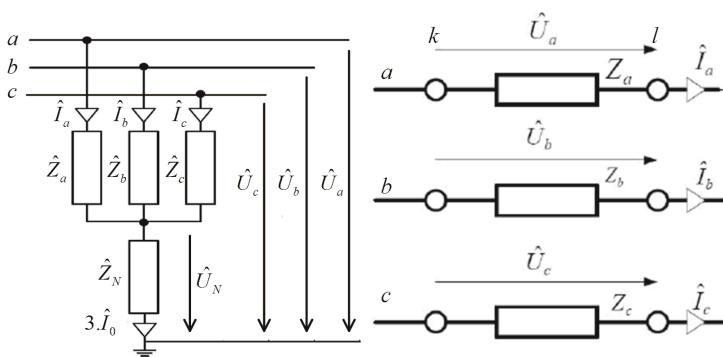
$$= \begin{bmatrix} \hat{Z} + 2\hat{Z}' & 0 & 0 \\ 0 & \hat{Z} - \hat{Z}' & 0 \\ 0 & 0 & \hat{Z} - \hat{Z}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \hat{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \hat{Z}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} \quad (11.7)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že pokud je soustava symetrická (přesněji, je-li její impedanční matice tzv. cyklicky symetrická), dekomponuje tato transformace trojfázový obvod do tří nezávislých obvodů, které se nazývají *složková schémata*. Postupným zjednodušováním těchto tří obvodů lze dosáhnout stavu na *obr. 11.11*, kde  $\hat{Z}_1$ ,  $\hat{Z}_2$  a  $\hat{Z}_0$  se nazývají složkové impedance. Těmito schémata se nahrazuje předporuchový stav trojfázového obvodu.



**Obr. 11.11: Tři nezávislá složková schémata symetrické trojfázové soustavy.**

Obecnou příčnou a podélnou nesymetrickou poruchu znázorňuje *obr. 11.12*.



**Obr. 11.12: Obecná podélná a příčná porucha v trojfázové soustavě**

Pro fázová napětí a proudy platí pro oba případy tento obecný vztah:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_a \\ \hat{U}_b \\ \hat{U}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \hat{Z}_a & 0 & 0 \\ 0 & \hat{Z}_b & 0 \\ 0 & 0 & \hat{Z}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_a \\ \hat{I}_b \\ \hat{I}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{U}_N \\ \hat{U}_N \\ \hat{U}_N \end{bmatrix} \right) \quad (11.8)$$

a tedy

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_0 \\ \hat{U}_1 \\ \hat{U}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \left( \begin{bmatrix} \hat{Z}_a & 0 & 0 \\ 0 & \hat{Z}_b & 0 \\ 0 & 0 & \hat{Z}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_0 \\ \hat{I}_1 \\ \hat{I}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{U}_N \\ \hat{U}_N \\ \hat{U}_N \end{bmatrix} \right) \quad (11.9)$$

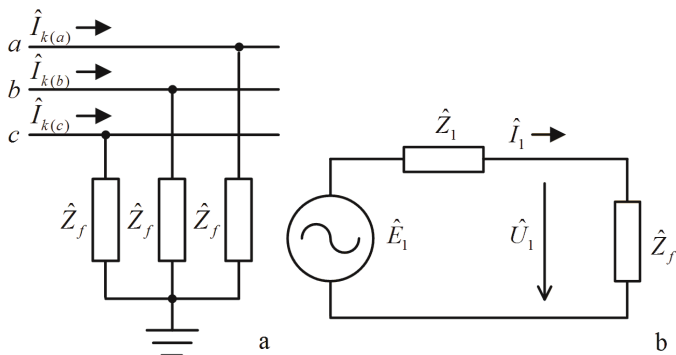
kde v případě podélné poruchy je vždy  $\hat{U}_N = 0$

Zatímco podélné rozpojení vytváří nesymetrie, které mohou být příčinou nadměrného zatěžování zařízení, příčná porucha (zkrat) může znamenat velmi rychlou destrukci zařízení. V dalším popisu je proto věnována pozornost právě zkratovým proudům.

### 11.4.1. Složková schémata základních typů příčných poruch

Pro trojfázovou symetrickou poruchu s impedancemi  $\hat{Z}_a = \hat{Z}_b = \hat{Z}_c = \hat{Z}_f$  na obr. 11.13a obdržíme náhradní složkové schéma na obr. 11.13b. V tomto případě bude platit:

$$\hat{I}_1 = \frac{\hat{E}_1}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_f}, \hat{I}_2 = 0, \hat{I}_0 = 0, \hat{I}_{k(a)} = a^2 \cdot \hat{I}_{k(b)} = a \cdot \hat{I}_{k(c)} = \frac{\hat{E}_1}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_f} \quad (11.10)$$



**Obr. 11.13: Složkové schéma trojfázové symetrické poruchy**

Pro dvoufázovou poruchu na obr. 11.14a obdržíme obdobně za předpokladu že  $\hat{Z}_b + \hat{Z}_c = \hat{Z}_f$  a  $\hat{Z}_a$  ani  $\hat{Z}_N$  se neuplatní náhradní složkové schéma na obr. 11.14b. Potom platí:

$$\hat{I}_1 = -\hat{I}_2 = \frac{\hat{E}_1}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_f}, \hat{I}_0 = 0,$$

$$\hat{I}_{k(a)} = 0, \hat{I}_{k(b)} = -\hat{I}_{k(c)} = \frac{j\sqrt{3} \cdot \hat{E}_1}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_f} \quad (11.11)$$

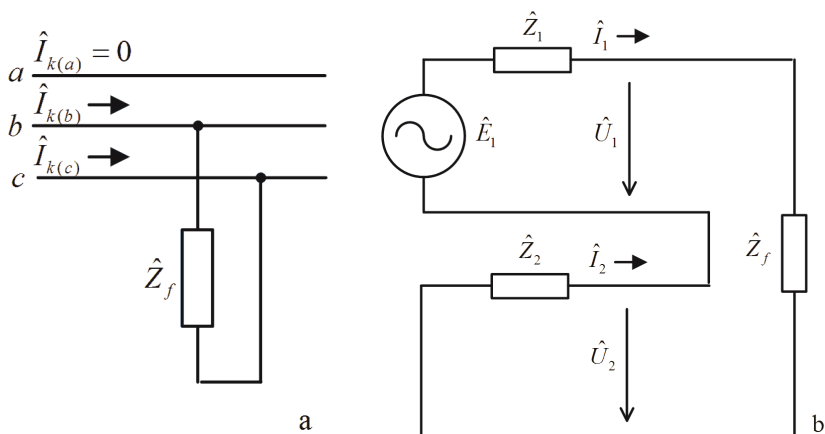
Pro dvoufázovou zemní poruchu podle obr. 11.15a pro  $\hat{Z}_b = \hat{Z}_c = \hat{Z}_f / 2$  a  $\hat{Z}_a$  se neuplatní, platí náhradní složkové schéma na obr. 11.15b a platí:

$$\begin{aligned}
 \hat{I}_1 &= \frac{\hat{E}_1}{\hat{Z}_1 + \frac{\hat{Z}_f}{2} + \frac{(\hat{Z}_2 + \hat{Z}_f / 2)(\hat{Z}_0 + \hat{Z}_f / 2 + 3.\hat{Z}_N)}{\hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + \hat{Z}_f + 3.\hat{Z}_N}} \\
 \hat{I}_2 &= -\hat{I}_1 \cdot \frac{\hat{Z}_0 + \hat{Z}_f / 2 + 3.\hat{Z}_N}{\hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + \hat{Z}_f + 3.\hat{Z}_N} \\
 \hat{I}_0 &= -\hat{I}_1 \cdot \frac{\hat{Z}_2 + \hat{Z}_f / 2}{\hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + \hat{Z}_f + 3.\hat{Z}_N}
 \end{aligned}
 \tag{11.12}$$

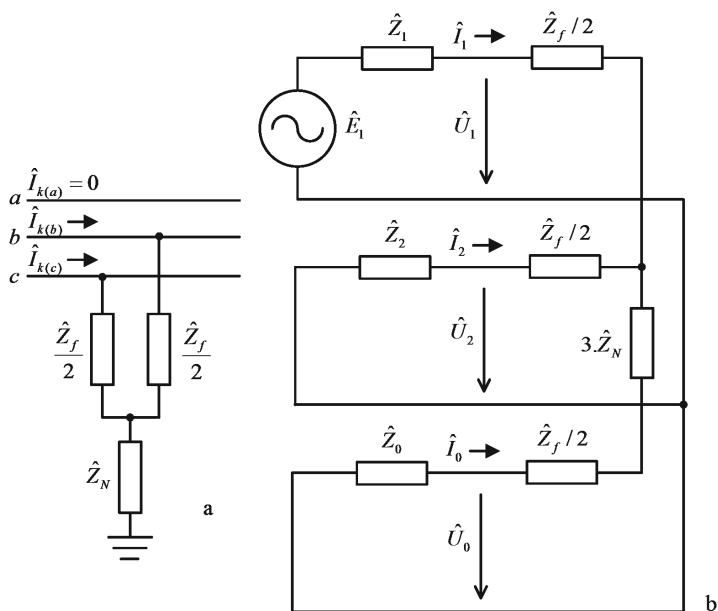
Pro poruchové fázové proudy platí obecně dosazení do (11.10).

Pro jednofázovou poruchu podle *obr.11.16a* pro  $\hat{Z}_a = \hat{Z}_f$  bez uvažování všech ostatních impedancí platí náhradní složkové schéma na *obr. 11.16b* a platí:

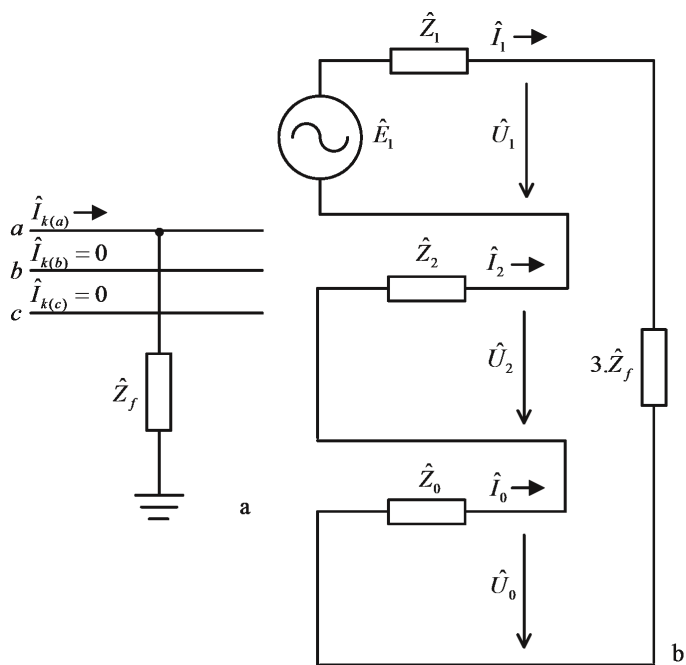
$$\begin{aligned}
 \hat{I}_1 = \hat{I}_2 = \hat{I}_0 &= \frac{\hat{E}_1}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + 3.\hat{Z}_f} \\
 \hat{I}_{k(a)} &= \frac{3.\hat{E}_1}{\hat{Z}_1 + \hat{Z}_2 + \hat{Z}_0 + 3.\hat{Z}_f}, \quad \hat{I}_{k(b)} = \hat{I}_{k(c)} = 0
 \end{aligned}
 \tag{11.13}$$



**Obr. 11.14: Složkové schéma dvoufázové poruchy**



Obr. 11.15: Složkové schéma dvoufázové zemní poruchy



Obr. 11.16: Složkové schéma jednofázové poruchy

## 11.5. Matice v energetických vztazích

### 11.5.1. Maticové vyjádření stavu

Podrobnější analýzu kvazistacionárních stavů elektrické části elektrárny umožňuje použití algebry matic. Rovnice (11.14) ukazuje vazbu mezi uzlovými proudy a uzlovými napětími:

$$\bar{I} = [Y]\bar{U} \quad (11.14)$$

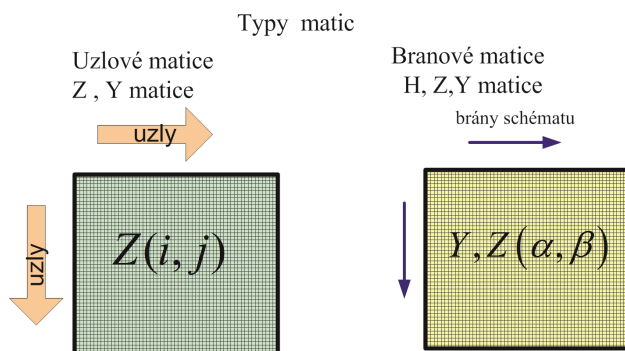
Existují uzlové matice, které mají na indexech řádků a sloupců identifikaci uzlů a obsahem jsou buď komplexní impedance nebo admitance, nebo v případě hybridních matic údaje mohou být smíšené. V pokročilejších výpočtech se používají branové matice, které mají na indexech řádků a sloupců identifikaci bran.

#### Vlastnosti matice [Y]

- [Y] je řádká ( v programování se používá řádkostní – sparse technologie programování)
- bez komplexních převodů je symetrická
- s malými svody může být špatně numericky podmíněna
- prvky jsou fyzikálně názorné –zapojené vodivosti. Diagonální prvek je celková viděná vodivost viděná z uzlu při spojení připojených uzlů k zemi. Nediagonální prvek je záporně vzatá výsledná vodivost mezi uzly.

#### Vlastnosti matice [Z]

- $[Z]=[Y]^{-1}$
- [Z] je plná
- [Z] je symetrická (neobsahuje-li komplexní převody)

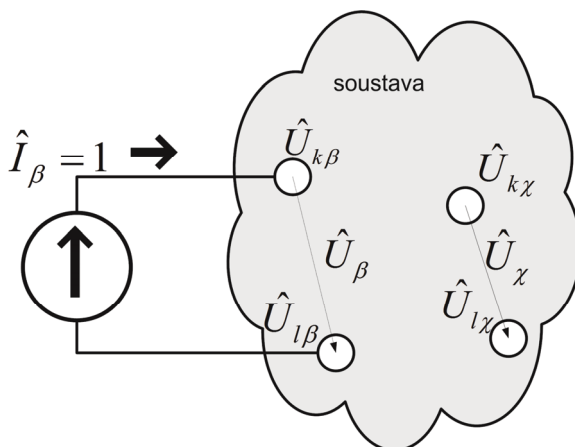


Obr. 11.17: Grafické zobrazení typů matic

## 11.5.2. Viděná impedance mezi branami

Pro analýzu chování elektrických veličin bran elektrotechnických zařízení umístěných v systému a označených písmeny  $k, l$  pro orientaci brány a písmenem řecké abecedy pro vzájemné rozlišení. Injekce jednotkového proudu do brány  $\beta$  způsobí dodatková napětí ve všech branách. Viděná (vazební) impedance mezi branou  $\beta$  a branou  $\chi$  je dána podílem:

$$\hat{Z}_{\beta, \chi} = \hat{U}_{\chi} / \hat{I}_{\beta} \quad \text{Viděná impedance mezi branami } \beta \text{ a } \chi. \quad (11.15)$$



Obr. 11.18: Grafické zobrazení typů matic

|                |               |              |             |             |              |         |
|----------------|---------------|--------------|-------------|-------------|--------------|---------|
| indexy         |               | $k_{\alpha}$ | $k_{\beta}$ | $l_{\beta}$ | $l_{\alpha}$ |         |
| $(k_{\alpha})$ | $U_{k\alpha}$ | $\cdot$      | $\cdot$     | $\cdot$     | $\cdot$      | $\cdot$ |
| $(k_{\beta})$  | $U_{k\beta}$  | $\cdot$      | $\cdot$     | $\cdot$     | $\cdot$      | $\cdot$ |
| $(l_{\beta})$  | $U_{l\beta}$  | $\cdot$      | $\cdot$     | $\cdot$     | $\cdot$      | $\cdot$ |
| $(l_{\alpha})$ | $U_{l\alpha}$ | $\cdot$      | $\cdot$     | $\cdot$     | $\cdot$      | $\cdot$ |

$$= \begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z(k_{\alpha}, k_{\alpha}) & \cdot & Z(k_{\alpha}, k_{\beta}) & \cdot & Z(k_{\alpha}, l_{\beta}) & Z(k_{\alpha}, l_{\alpha}) & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z(k_{\beta}, k_{\alpha}) & \cdot & Z(k_{\beta}, k_{\beta}) & \cdot & Z(k_{\beta}, l_{\beta}) & Z(k_{\beta}, l_{\alpha}) & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z(l_{\beta}, k_{\alpha}) & \cdot & Z(l_{\beta}, k_{\beta}) & \cdot & Z(l_{\beta}, l_{\beta}) & Z(l_{\beta}, l_{\alpha}) & \cdot \\ \cdot & Z(l_{\alpha}, k_{\alpha}) & \cdot & Z(l_{\alpha}, k_{\beta}) & \cdot & Z(l_{\alpha}, l_{\beta}) & Z(l_{\alpha}, l_{\alpha}) & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dále uvedené vztahy vznikají z matematického vyjádření naznačeného napájení. Injekcí proudů do dvou svorek vznikají ve všech uzlech napětí. Rozdíl napětí dvousvorky je napětí na bráně. Podíl napětí a injektovaného proudu definuje vlastní či vzájemnou impedanci. Tyto vztahy platí pro všechny složkové soustavy a obecné umístění bran v podélné či příčné větvi.

$\beta, \chi$  .....jména bran

$k, l$  .....počáteční a koncová svorka brány



vlastní impedance brány:

$$\hat{Z}(\beta, \beta) = \frac{\hat{U}_\beta}{\hat{I}_\beta} = \hat{Z}(k_\beta, k_\beta) + \hat{Z}(l_\beta, l_\beta) - 2\hat{Z}(k_\beta, l_\beta) \quad (11.16)$$

vzájemná impedance mezi branami. Je-li  $l_\beta=1$ , je to číselně přímo rovno napětí.

$$\begin{aligned} \hat{Z}(\chi, \beta) = \frac{\hat{U}_\chi}{\hat{I}_\beta} &= \hat{Z}(k_\beta, k_\chi) - \hat{Z}(k_\beta, l_\chi) - \\ &- \hat{Z}(k_\chi, l_\beta) - \hat{Z}(l_\beta, k_\chi) + \hat{Z}(l_\beta, l_\chi) \end{aligned} \quad (11.17)$$

Modifikace výpočtu impedancí pro případ že koncové svorky bran jsou spojeny se zemí.

$$\begin{aligned} \hat{Z}(\beta, \beta) &= \frac{\hat{U}_\beta}{\hat{I}_\beta} = \hat{Z}(k_\beta, k_\beta), \\ \hat{Z}(\chi, \beta) &= \frac{\hat{U}_\chi}{\hat{I}_\beta} = \hat{Z}(k_\beta, k_\chi) \end{aligned} \quad (11.18)$$

### 11.5.3. Impedanční změny systému

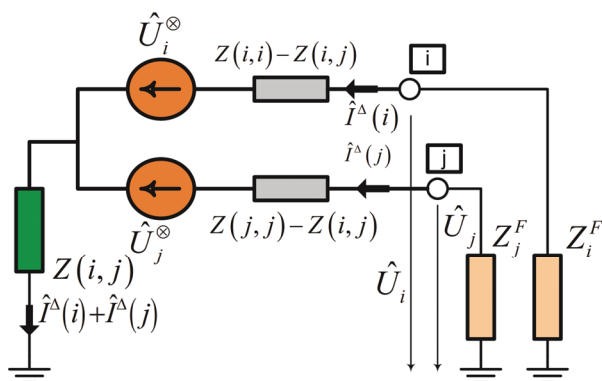
Impedanční změny mezi dvěma uzly schématu se dají řešit:

- změnou hodnot celé impedanční matice
- injekcí dodatečných proudů do těchto uzlů beze změny hodnot impedanční matice

Nereprezentuje-li ani jeden z uzlů zem, jedná se například o:

- změnu převodu transformátoru
- zapnutí (vypnutí) vedení mezi těmito uzly.

Reprezentuje-li jeden z uzlů zem, pak se jedná o zkrat za poruchovou impedancí. Tímto jevem nahrazujeme počáteční okamžik rozběhu asynchronního motoru.



Obr. 11.19: Dvě současné poruchy

Příklad poruchy vzniklé spojením dvou uzlů (i,j) přes poruchové impedance a simulované injekcí proudu v těchto uzlech ukazuje obr.11.19. Superpozice předchozího ustáleného stavu a vlastního poruchového stavu je uvedena v rovnici (11.19). Řešení poruchových proudů uvádí rovnice (11.20) a dokumentuje, že složitější poruchy nelze řešit samostatně, protože se navzájem ovlivňují (impedanční matice poruch není diagonální).

$$[\hat{U}] = [\hat{U}^0] + [\hat{U}^\Delta] = [\hat{Z}] * ([\hat{I}^0] + [\hat{I}^\Delta]) = [\hat{U}^0] + [\hat{Z}] * [\hat{I}^\Delta] \quad (11.19)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{I}^\Delta(i) \\ \hat{I}^\Delta(j) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \hat{Z}(i,i) + \hat{Z}_i^F & \hat{Z}(i,j) \\ \hat{Z}(j,i) & \hat{Z}(j,j) + \hat{Z}_j^F \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}^0(i) \\ \hat{U}^0(j) \end{bmatrix} \quad (11.20)$$

Metodikou injekce proudu lze simulovat rozběhy motorů na více přípojnicích schématu, změnu impedance mezi uzly schématu způsobenou zapnutím či vypnutím spoje nebo změnou převodu transformátoru.

## 11.6. Literatura

- [1] Heuck K: Elektrische Energieversorgung. Vieweg+Teubner Verlag - Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010.
- [2] Schwab A.J.: Elektroenergiesysteme Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2007.

Prof. Ing. Josef Tlustý, CSc., Ing. Jan Švec, Ph.D., Ing. Petr Bannert,  
Ing. Zbyněk Brettschneider, Ing. Zbyněk Kocur, Ing. Petr Mareček,  
Ing. Zdeněk Müller, Ing. Tomáš Sýkora, Ph.D.

### **Návrh a rozvoj elektroenergetických sítí**

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 254

Vydání první. Praha 2011

ISBN 978-80-01-04939-6