

Obsah

1.	Úvod	1
1.1.	Uspořádání odvětví elektroenergetiky	1
1.2.	Rozvoj ES.....	2
1.3.	Organizace evropských provozovatelů přenosových soustav.....	4
2.	Popis elektrizační soustavy	8
2.1.	Základní charakteristiky a koncepty	8
2.1.1.	Základní východiska popisu ES.....	9
2.1.1.1.	Fázové časové průběhy versus fázory	10
2.1.1.2.	Souměrné složky	10
2.1.1.3.	Pojmenované versus poměrné veličiny	10
2.2.	Venkovní vedení, kabely a kompenzační prostředky	10
2.2.1.	Odvození fázových parametrů venkovního vedení.....	11
2.2.1.1.	Rezistance kovového vodiče vedení	11
2.2.1.2.	Odpor vodiče země.....	12
2.2.1.3.	Indukčnost kovového vodiče	12
2.2.1.4.	Indukčnost trojfázového vedení.....	15
2.2.1.5.	Indukčnost dvou paralelních vedení	17
2.2.1.6.	Kapacita kovového vodiče venkovního vedení	18
2.2.1.7.	Vliv svazkových vodičů	21
2.2.1.8.	Konduktance venkovních vedení.....	21
2.2.2.	Odvození složkových parametrů venkovního vedení.....	22
2.2.2.1.	Sousledná a zpětná impedance třífázového venkovního vedení	22
2.2.2.2.	Netočivá impedance třífázového venkovního vedení	22
2.2.2.3.	Sousledná, zpětná a netočivá kapacita venkovního vedení	25
2.2.3.	Nepříznivé vlivy netranspozice fázových vodičů venkovních vedení.....	25
2.2.3.1.	Přesnost výpočtu parametrů vedení	26
2.2.3.2.	Mezifázové impedance smyček měřené distančními ochranami a lokátory poruch.....	26
2.2.3.3.	Oteplování zemnicích lan vlivem trvalého průtoku proudu netočivé složky.....	26
2.2.3.4.	Ovlivnění ostatních sítí.....	26
2.2.4.	Odvození složkových parametrů kabelů.....	27
2.2.4.1.	Sousledná, zpětná a netočivá rezistance kabelu.....	27
2.2.4.2.	Sousledná, zpětná a netočivá reaktance kabelu	27
2.2.4.3.	Svod kabelu	30
2.2.4.4.	Sousledná, zpětná a netočivá kapacita kabelu	30
2.2.4.5.	Poznámky k využívání kabelů VVN a ZVN	31
2.2.5.	Zatížitelnost venkovních vedení	32
2.2.6.	Kompenzační prostředky	34
2.3.	Transformátory	34
2.3.1.	Transformátory s regulací fáze	38
2.3.2.	UPFC	40
2.4.	Synchronní stroje.....	41
2.4.1.	Synchronní stroj s permanentními magnety a plno-výkonovým měničem.....	46
2.5.	Budicí systémy synchronních strojů	46
2.5.1.	Dynamické modely budících souprav	47
2.5.1.1.	Statický budič nezávislý s neřízeným diodovým můstkem	48
2.5.1.2.	Statický budič nezávislý s řízeným tyristorovým můstkem	49
2.5.1.3.	Statický budič závislý	50
2.5.2.	Regulátor buzení.....	51
2.6.	Primární pohony a zdroje energie.....	52
2.6.1.	Parní turbína	53
2.6.2.	Vodní turbína.....	54
2.6.3.	Paroplynový cyklus	55
2.6.4.	Vznětový motor s přepřehováním	57
2.6.5.	Větrná turbína.....	58
2.6.6.	Regulátor turbíny.....	60
2.6.7.	Fotovoltaická elektrárna	62
2.7.	Asynchronní stroje.....	65
2.7.1.	Asynchronní motor s kotvou nakrátko	65

2.7.2.	Asynchronní generátor napájený do rotoru frekvenčním měničem	66
2.8.	Ochrany a automatiky	67
2.8.1.	Nadproudové ochrany	70
2.8.1.1.	Časově nezávislé nadproudové ochrany	70
2.8.1.2.	Časově závislé nadproudové ochrany	70
2.8.2.	Proudové rozdílové a srovnávací ochrany	72
2.8.2.1.	Rozdílové ochrany generátorů, transformátorů, tlumivek	72
2.8.2.2.	Rozdílová ochrana přípojnic	74
2.8.2.3.	Proudové a fázové srovnávací ochrany vedení	75
2.8.2.4.	Automatika selhání vypínače	76
2.8.3.	Impedanční ochrany a automatiky	77
2.8.3.1.	Základní princip distančních ochran	78
2.8.3.2.	Základní funkční algoritmus přímého výpočtu impedance	81
2.8.3.3.	Vliv bočního napájení na velikost impedance viděné ochranou	84
2.8.3.4.	Vliv vedení zapojeného paralelně k vlastnímu chráněnému vedení	85
2.8.3.5.	Vliv odporu poruchy na velikost impedance viděné ochranou	87
2.8.3.6.	Detekce kývání	88
2.8.4.	Zásady nastavování ochran a automatik	90
2.8.4.1.	Selektivita nastavení a působení	91
2.8.4.2.	Vzájemné zálohování ochran a automatik	92
2.8.4.3.	Udržení stability provozu elektráren	93
2.8.5.	Adaptivní ochrany s přízpusobitelným nastavením a algoritmem	94
3.	Analýza ES	97
3.1.	Ustálené stavy – výpočet chodu sítě	99
3.1.1.	Uzlová admitanční matice	100
3.1.1.1.	Začlenění transformátorů do matice A	102
3.1.1.2.	Začlenění kompenzačních zařízení do matice A	105
3.1.2.	Chod sítě jako nelineární problém	105
3.1.2.1.	Gauss-Seidelova iterační metoda	105
3.1.2.2.	Newton-Raphsonova metoda	108
3.1.2.3.	Decoupled, Fast-Decoupled a DC load flow metoda	113
3.1.3.	Začlenění jalových mezí v PU uzlech pro řešení chodu sítě	115
3.1.4.	Procedury pro vylepšení chodu numerických metod	117
3.1.4.1.	Možné algoritmy pro zlepšení chování Gauss-Seidelovy metody	117
3.1.4.2.	Možné algoritmy pro zlepšení chování Newton-Raphsonovy metody	119
3.1.5.	Základní výstupy řešení chodu sítě	121
3.1.6.	Výpočty distribučních faktorů	123
3.1.7.	Výpočty výpadkových faktorů	124
3.2.	Výpočty zkratů	125
3.2.1.	Časový průběh a charakteristické hodnoty zkratových proudů	125
3.2.1.1.	Zkrat napájený ideálním zdrojem napětí	125
3.2.1.2.	Počáteční rázový zkratový proud	127
3.2.1.3.	Nárazový zkratový proud	127
3.2.1.4.	Ekvivalentní oteplovací zkratový proud	127
3.2.1.5.	Zkrat na svorkách synchronního stroje	128
3.2.2.	Analytické metody výpočtu zkratových proudů	129
3.2.2.1.	Metoda superpozice	131
3.2.2.2.	Metoda zkratové impedanční matice	131
3.2.3.	Výpočet nesymetrických poruch	132
3.2.3.1.	Transformátory v netočivé složkové soustavě	134
3.2.3.2.	Transformace souměrných složek při průchodu transformátorem	135
3.2.3.3.	Vedení a kabely v netočivé složkové soustavě	136
3.2.3.4.	Vedení se zemnicími lany	136
3.2.3.5.	Jednofázový zkrat	137
3.2.3.6.	Dvoufázový zkrat	140
3.2.3.7.	Dvoufázový zemní zkrat	141
3.2.3.8.	Shoda v porovnání druhů zkratu pro základní harmonickou	142
3.2.3.9.	Vliv oblouku při zkratu	143
3.2.3.10.	Přerušení fázi	145
3.2.4.	Výpočet zkratových proudů podle norem	146

3.2.4.1.	Oblast použití a charakteristiky zkratových výpočtů	146
3.2.4.2.	Standardní postup: metoda ekvivalentního zdroje	147
3.2.4.3.	Definice, terminologie a symbolika	148
3.2.4.4.	Přehled norem a jejich charakteristiky	149
3.2.4.5.	Poznámky k provádění výpočtů a interpretaci výsledků	152
3.3.	Stavová estimace	155
3.3.1.	Přehled funkcí estimátoru	156
3.3.1.1.	Vyhodnocení topologie sítě	156
3.3.1.2.	Verifikace topologie a oprava chybných stavů spinacích prvků	157
3.3.1.3.	Kontrola plausibility	157
3.3.1.4.	Kontrola estimovatelnosti (pozorovatelnosti) a určení estimovatelných oblastí	157
3.3.1.5.	Vlastní estimace stavového vektoru a dopočet neměřených veličin	157
3.3.1.6.	Detekce a identifikace hrubých chyb měření	158
3.3.1.7.	Zjištění a eliminace výskytu kritických měření	158
3.3.1.8.	Estimace pasivních parametrů sítě	158
3.3.1.9.	Kontrola odboček traf a převodních koeficientů	158
3.3.1.10.	Výpočet estimovaných ztrát výkonu a energie	158
3.3.1.11.	Statistické vyhodnocení činnosti estimátoru, výsledků estimace a chyb měření	158
3.3.1.12.	Korekce rozptylů měření	159
3.3.2.	Metoda statické estimace stavu	159
3.3.3.	Detekce a identifikace hrubých chyb měření	164
3.3.4.	Pozorovatelnost (estimovatelnost) a kritická měření	165
3.3.5.	Verifikace topologie sítě	166
3.3.6.	Váhové koeficienty	168
3.3.7.	Synchronní měření fázorů napětí a proudu v estimaci	168
3.3.7.1.	Rovnice pro měření fázorů U, I (závislost na stavových proměnných)	169
3.3.8.	Dynamická estimace	171
3.3.9.	Provozní požadavky na robustní estimátor	172
3.4.	Optimalizace	173
3.4.1.	Návaznost optimalizačních úloh na výpočet chodu sítě	174
3.4.2.	Specifikace optimalizačních úloh	176
3.4.2.1.	Kriteriální funkce	176
3.4.2.2.	Veličiny a omezující podmínky	177
3.4.3.	Analytické metody řešení	179
3.4.3.1.	Spojité optimalizace	179
3.4.3.2.	Diskrétní optimalizace	180
3.4.4.	Evoluční algoritmy	181
3.5.	Dynamická stabilita ES	182
3.5.1.	Uhlová stabilita přechodná	184
3.5.1.1.	Výpočty přechodné stability	186
3.5.2.	Stabilita malých kyvů	189
3.5.3.	Oscilační stabilita	191
3.5.4.	Frekvenční stabilita	194
3.5.4.1.	Výpočty frekvenční stability	195
3.5.4.2.	Analytické průběhy frekvence	197
3.5.5.	Napěťová stabilita	198
3.5.5.1.	Statická stabilita – nosové křivky	198
3.5.5.1.	Dynamická napěťová stabilita	199
3.6.	Elektromagnetické přechodné děje	204
3.6.1.	Vlnové přechodné děje	205
3.6.1.1.	Soustava pěti rovnic	206
3.6.1.2.	Bewleyův jízdní řád vln	206
3.6.1.3.	Bergeronova grafická metoda	207
3.6.1.4.	Numerické řešení frekvenčně nezávislého modelu	208
3.6.1.5.	Numerické řešení frekvenčně závislého modelu	211
3.6.2.	Přechodné děje v obvodech se soustředěnými parametry	212
3.6.2.1.	Frekvenčně nezávislé modely vedení se soustředěnými parametry	213
3.6.2.2.	Srovnání modelů se soustředěnými a rozprostřenými parametry	214
3.6.2.3.	Vypínání kapacitní zátěže	215
3.6.3.	Ferrezonace	216

3.6.3.1.	Charakteristiky ferorezonance.....	216
3.6.3.2.	Energetické systémy náchylné na vznik ferorezonance	220
3.6.3.3.	Prevence a tlumení ferorezonance.....	222
3.6.3.4.	Metody analýzy ferorezonančních obvodů	222
4.	Systémové služby	227
4.1.	Udržování výkonové rovnováhy – systémová služba provozovatele PS.....	227
4.2.	Regulace frekvence a činných výkonů	229
4.3.	Regulace napětí a jalových výkonů	234
4.3.1.	Principy řízení napětí v elektrizační soustavě ČR	235
4.3.2.	Hladinová regulace transformátorů	236
4.3.3.	Přínosy regulace U a Q	237
4.4.	Řízení soustavy při mimořádných stavech – spolehlivost ES.....	237
4.4.1.	Popis velkých systémových poruch na úrovni přenosových soustav.....	238
4.4.1.1.	Výpadek v USA a Kanadě 14. 8. 2003	238
4.4.1.2.	Výpadek v Dánsku a Švédsku 23. 9. 2003	243
4.4.1.3.	Výpadek Itálie 28.9.2003.....	245
4.4.1.4.	Výpadek jižního Řecka 12. 7. 2004.....	246
4.4.1.5.	Rozpad propojení UCTE na tři části 4. 11. 2006.....	247
4.4.2.	Plán obrany proti šíření poruch	253
4.4.2.1.	Opatření proti přetížení.....	254
4.4.2.2.	Opatření proti kaskádovitému šíření poruchy.....	254
4.4.2.3.	Opatření proti poklesu a vzrůstu frekvence	255
4.4.2.4.	Opatření proti kývání a proti ztrátě synchronismu	256
4.4.3.	Plán obnovy po poruše typu blackout.....	256
Epilog	259
Prameny a literatura	260