

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Obranná opatření pro zamezení vzniku a šíření poruch
v elektrizační soustavě**
**Safeguarding Electric Systems from Sources and Expansion of
Failure**

2017

Nikol Vinklerová

Zadání bakalářské práce

Student: **Nikol Vinklerová**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: Obranná opatření pro zamezení vzniku a šíření poruch v elektrizační soustavě
Safeguarding Electrical Systems from Sources and Expansion of Failure
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Popis elektrizační soustavy ČR
2. Popis stavů elektrizační soustavy (normální, varovný, nouzový stav a black-out)
3. Modifikace projektu EDE v programu MODES
4. Opatření pro zamezení vzniků poruch v elektrizační soustavě
5. Rozbor vhodných opatření pro zamezení šíření poruchy.
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Hodinka, M., Fecko, Š., Němeček, F.: Přenos a rozvod elektrické energie. SNTL 1989 Praha
Kolcun M., Heger V., Mülbacher J. Electric Power System Operation Control, Mercury – Smékal Publishing House, Praha 2003
Kolcun M. a kol. : Riadenie prevádzky elektrizačnej sústavy , vydavateľstvo Mercury 2002.
Technická dokumentace ČEPS

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017



prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

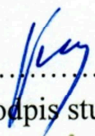


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně. Uvedla jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpala.

Dne: 28.04.2014


.....
podpis studenta

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat externímu odborníkovi z firmy ČEPS, a.s. Ing. Oldřichovi Rychlému za konzultace a odbornou pomoc při řešení této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá poruchami v elektrizační soustavě. Jsou zde rozebrány základní možnosti opatření pro předcházení poruch i následných opatření proti šíření. Také obsahuje rozbor simulačního softwaru MODES. V tomto programu je vytvořen nový projekt NIKAM. Projekt je modifikovanou verzí původního implementovaného projektu EDE. Následná simulace v modifikovaném projektu je zaměřena na dva případy poruch. Jeden se zabývá nesymetrickým 2fázovým zkratem. Druhý se týká vzniku ostrovního režimu v síti. Obě simulace jsou následně vyhodnoceny pomocí grafů.

Klíčová slova

MODES, poruchy, simulace, modifikace

Abstract

This thesis deals with the problems in the power system. There are analyzed basic precautions to prevent the possibility of failures and subsequent measures against the spread. It also contains an analysis of simulation software MODES. There is made a new project NIKAM. This project is a modified version of the original implemented project EDE. The subsequent simulation of the modified project is focused on two cases of failures. One deals with asymmetrical 2phase short. The second relates to islandmode network. Both simulations are evaluated by graphs.

Key Words

MODES, failure, simulation, modification

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratk	7
Seznam ilustrací	8
Seznam tabulek	8
Úvod.....	9
1 Popis elektrizační soustavy	10
1.1 Vývoj elektrizační soustavy České republiky	11
1.2 Přenosová soustava České republiky	12
1.3 Distribuční soustava České Republiky.....	12
1.4 Kritéria přenosu elektrické energie	13
2 Prostředky pro určení a popis stavů elektrizační soustavy	14
2.1 Základní pojmy a charakteristiky elektřiny na úrovni přenosové soustavy	14
2.2 Regulace napětí a jalových výkonů.....	15
2.3 Principy řízení napětí	15
2.4 Přínosy regulace napětí a jalového výkonu	16
2.5 Popis stavů elektrizační soustavy	16
3 Opatření pro zamezení vzniků poruch v elektrizační soustavě	18
3.1 Základní procesy dispečinku využívané při manipulaci v síti.....	18
3.2 Další možnosti manipulace v síti	20
3.3 Základní přístroje využívané pro zamezení vzniku poruchy v síti.....	20
4 Opatření pro zamezení šíření poruchy.....	22
4.1 Plán obrany proti šíření poruch v přenosové soustavě	22
5 Přechodné jevy v elektrizační soustavě a jejich simulace	25
5.1 Přechodné jevy v ES	25
5.2 Simulační program MODES	26
5.3 Projekt NIKAM.....	26
5.4 Případy řešené v projektu NIKAM	28
6 Závěr	33
Seznam literatury	34

Seznam použitých symbolů a zkratk

I_A	(V)	fázový proud ve fázi A
I_B	(V)	fázový proud ve fázi B
I_C	(V)	fázový proud ve fázi C
f	(Hz)	frekvence
P	(W)	činný výkon
S_n	(VA)	jmenovitý zdánlivý výkon
U	(V)	napětí
U_A	(V)	fázové napětí ve fázi A
U_B	(V)	fázové napětí ve fázi B
U_C	(V)	fázové napětí ve fázi C
<i>ATSOI</i>	(-)	Association of the Transmission System Operators of Ireland
<i>BALTSO</i>	(-)	Baltic Transmission System Operators
<i>NORDEL</i>	(-)	Organization for Nordic power cooperation
<i>UCTE</i>	(-)	Union for the Coordination of the Transmission of Electricity
<i>UKTSOA</i>	(-)	UK Transmission System Operators Association

Seznam ilustrací

Obr. 1.1 Schéma elektrizační sítě [1]	10
Obr. 1.2 Schéma propojení v rámci organizace ENTSO-E [3]	11
Obr. 3.1 Primární regulace frekvence [11]	19
Obr. 3.2 Hierarchický princip regulace [1]	20
Obr. 5.1 Rozdělení elektromechanických dějů v soustavě [13]	25
Obr. 5.2 Uživatelské prostředí MODMAN	26
Obr. 5.3 Modifikované schéma původního projektu EDE	27
Obr. 5.4 Řádek přidání asynchronního motoru	28
Obr. 5.7 Ztráta stability generátoru při 2-f zkratu	29
Obr. 5.5 Stabilita generátoru G1 při vzniku 2-fázového zkratu bez ztráty stabilního chodu stroje	30
Obr. 5.6 Dodávaný činný výkon do rozvodny R2 a R1	31
Obr. 5.8 Skluz generátoru po vzniku ostrovního režimu.....	32
Obr. 5.9 Vznik blackoutu po odlehčení zátěže v ostrovním režimu.....	32

Seznam tabulek

Tab. 1.1 Rozdělení napětí a napěťových hladin ES v ČR [2].....	10
Tab. 1.2 Prvky v přenosové soustavě ČR [4]	12
Tab. 2.1 Frekvenční meze pásem provozu [8].....	14
Tab. 2.2 Dovolené meze napětí [8].....	15
Tab. 4.1 Systém frekvenčního odlehčování [8]	23
Tab. 5.1 Technické specifikace prvků v projektu.....	27

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá základním principem a požadavky na fungování elektrizační soustavy. Je zde vysvětlena problematika přenosové, distribuční soustavy a základní kritéria pro bezpečný a ekonomický chod.

V práci jsou probrány stavy, ve kterých se soustava může nacházet, a to varovný, havarijní, stav nouze, blackout a normální, včetně uvedených základních parametrů a mezí, které tyto stavy definují. Všechny tyto stavy vznikají díky poruchám, které v soustavě vznikají – zkraty, přepětí, podpětí, výpadky na vedení, apod. Některým poruchám v soustavě jsme schopni předcházet, a to díky různým technickým prostředkům (ochrany, stabilizátory, automatiky, atd.). Technické prostředky k možnosti udržení normálního stavu soustavy jsou řešeny z hlediska bezpečnosti, ekonomického faktoru a technických požadavků. Vývoj elektroniky a rozvoj digitálního způsobu řízení těchto prostředků, znamená pro stabilní chod obrovský vývoj vpřed, který se neustále vylepšuje a obranná opatření jsou dnes měněna a vylepšována. Na druhé straně i stejně rychlým tempem probíhá vývoj prostředků proti šíření poruch, jako jsou například instalace automatik opětného zapnutí, které jsou schopny například odstranit poruchu na vedení vzniklou díky atmosférickým vlivům.

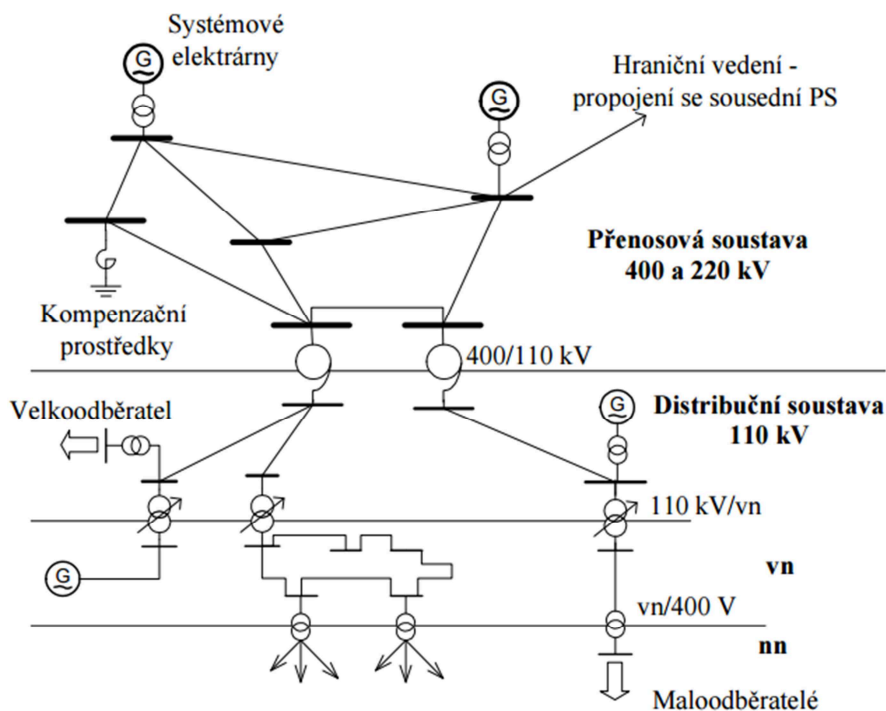
Práce obsahuje také základní informace ohledně řízení přenosové soustavy dispečinkem ČEPS, a.s. Způsoby, které jsou vysvětleny, jsou rekonfigurace a redispečink. Následně je zde v návaznosti vysvětlen kodex přenosové soustavy, část opatření proti šíření poruch a část týkající se opatření obranných.

Praktickou částí práce je simulace a modifikace v programu MODES, který slouží k simulaci pomalých až středních dynamických dějů v soustavě. Uživatel, který by chtěl simulovat děje rychlejší, může využít programu EMTP-ATP.

Program MODES funguje na základě projektu, kde si uživatel nakonfiguruje své požadavky. Můžeme zde nalézt popis manipulace s programem, včetně vysvětlení některých možností samotného ovládání. Dále je zde popsán předdefinovaný projekt EDE, který byl modifikován (přidání asynchronního motoru jako ekvivalentní zátěží). V něm jsou vytvořeny dva případy možných poruch v síti na určité části vedení. První případ se zabývá závažnou poruchou, a to 2f zkratem. Druhý případ řeší vznik ostrovního režimu části soustavy, která byla odpojena od nadřazené sítě. Tento trend ostrovního principu je v dnešní době velmi rozšířen a je očekáváno jeho neustále rozšiřování vzhledem k zvyšujícímu se procentu využití obnovitelných zdrojů.

1 Popis elektrizační soustavy

Elektrizační soustava (dále jen ES) je tvořena zařízeními sloužícími k výrobě, přenosu, transformaci a distribuci elektřiny. Stejně tak je využito různých prostředků k udržení normálního a bezpečného chodu jako například měřících, ochranných, řídicích, informačních a telekomunikačních systémů. Jednou ze základních možností rozdělení soustavy je dělení na přenos, výrobu a rozvod. [1]



Obr. 1.1 Schéma elektrizační sítě [1]

Z hlediska napětí je ES dělena do těchto napěťových hladin:

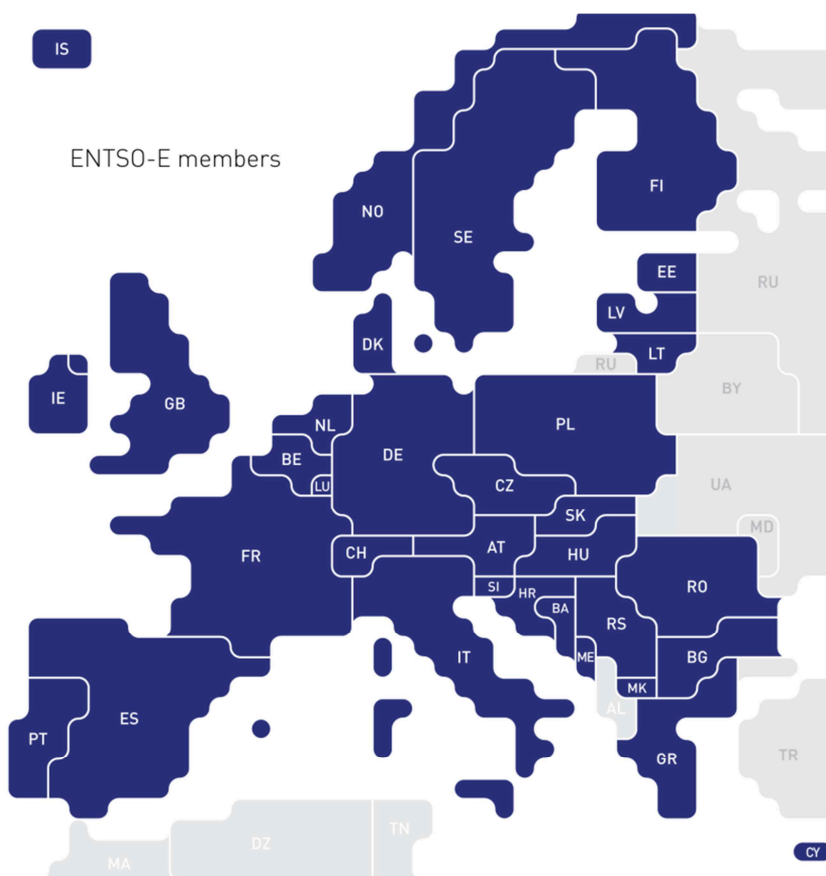
Tab. 1.1 Rozdělení napětí a napěťových hladin ES v ČR [2]

Rozdělení napětí	Značka	Napětí	Napěťové hladiny
Malé napětí	mn	0 – 50 V	24, 48 V (DS)
Nízké napětí	nn	50 – 1000 V	230/400, 690 V (DS)
Vysoké napětí	vn	1 kV – 50 kV	6,10,22,35 kV (DS)
Velmi vysoké napětí	vvn	50 kV – 399 kV	110, 220 (DS i PS)
Zvlášť vysoké napětí	zvn	400 kV – 800 kV	400 kV (PS)
Ultra vysoké napětí	uvn	> 800 kV	V ČR neprovozována

Pozn.: DS – distribuční síť, PS – přenosová síť

1.1 Vývoj elektrizační soustavy České republiky

Za počátek elektroenergetiky je považován rok 1882, kdy došlo k uvedení do provozu první Edisonovy elektrárny v USA. Významným vynálezcem v této oblasti byl Nikola Tesla, který vymyslel především princip trojfázové střídavé soustavy. V České republice to byl rok 1878, kdy se v tkalcovně v Moravské Třebové a v továrně v Dřevěných Mlýnech využilo elektrického osvětlení. Další vývoj vyžadoval vznik zákonů ohledně elektrifikace. V roce 1919 byla elektrifikace uzákoněna jako veřejný zájem. V důsledku válek je obecný rozvoj všech technických oborů včetně energetiky, které se dotklo především přetěžování elektrárenských bloků. Rok 1950 byl přelomový, jelikož vzniklo jednotné propojení v rámci Československa. S rostoucí spotřebou, která je i dnes velkým fenoménem, vznikla potřeba instalovat větší jednotkové výkony bloků (od 32 MW až po 500 MW – Mělník). V 80. letech došlo k výstavbě jaderné elektrárny Temelín a Dukovany. V dalších letech se jako hlavní problém energetiky řešila především otázka politiky a ekonomiky. Došlo k rozdělení jednotlivých částí elektrizační soustavy. Mezinárodní propojení mělo za následek vytvoření organizace ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), která zahrnuje skupiny jednotlivých provozovatelů přenosových soustav (UCTE – státy kontinentální Evropy, NORDEL – Švédsko, Norsko, Finsko, UKTSOA – Velká Británie, ATSOI – obě Irsko, BALTSO – pobaltské státy). Stále jsou vyvíjeny i nové kodexy a „guideliny“, které doporučují, jakým způsobem mají být nové výroby, odběry, různé komponenty v soustavě připojovány, včetně již zmíněných doporučení ohledně obchodu a bezpečného provozu. [3] [1]



Obr. 1.2 Schéma propojení v rámci organizace ENTSO-E [3]

1.2 Přenosová soustava České republiky

Přenosová soustava slouží k rozvodu elektrické energie ze systémových elektráren a ostatních zdrojů energie do distribuční sítě, ale také k propojení se sousedními soustavami. Je složena z vedení o různých napěťových hladinách (400 kV, 220 kV, částečně 110 kV), které vzájemně tvoří síť a v ní jednotlivé uzly, pro lepší přehled je rozdělena na oblasti Západ, Střed a Východ. Hlavním úkolem je udržet stabilní a rovnoměrný tok výkonu. Samozřejmě je zde zohledněn bezpečnostní a ekonomický faktor. O provoz soustavy se stará státní společnost ČEPS, a.s. V následující tabulce jsou zobrazeny nejdůležitější prvky, které se v přenosové soustavě nacházejí (k 31. 12. 2015). [1] [4] [5]

Tab. 1.2 Prvky v přenosové soustavě ČR [4]

Zařízení		ČR celkem
Vedení 400 kV	[km]	3 617
Vedení 220 kV	[km]	1 909
Vedení 110 kV	[km]	84
Zahraniční vedení 400 kV	počet	11
Zahraniční vedení 220 kV	počet	6
Rozvodny 400 kV	počet	26
Rozvodny 220 kV	počet	14
Rozvodny 110 kV	počet	1
Transformátory 400/220 kV	počet	4
Transformátory 400/110 kV	počet	48
Transformátory 220/110 kV	počet	21
Transformační výkon	[MVA]	21 980

Přenosová soustava je z pohledu silnoprůdého rozvodu navrhována jako okružní (smyčkový) rozvod. Tento způsob provozu umožňuje napájet rozvodný okruh ze dvou stran, což zvyšuje kvalitu elektrické energie, ale i bezpečnost chodu sítě. Kdyby nastala porucha, je možnost vedení rozpojit, tyto dvě části provozovat paprskově a poruchu co nejrychleji odstranit.

Zdroje a systémové elektrárny, které produkují elektrickou energii, mají celkový instalovaný výkon 21 856 MW. Do PS zasahuje část 12 143 MW. [4] [1] [6]

1.3 Distribuční soustava České Republiky

Distribuční soustava plynule navazuje na soustavu přenosovou. Tato část ES má za účel přenést elektřinu ke konečným odběratelům, a to jak průmyslovým, tak i komunálním. Tato soustava byla navrhována paprskovým principem rozvodu, který je charakterizován tím, že počet rozvodů je menší než počet vedení. Na hladině 110 kV je ovšem použit rozvod smyčkový. V dnešní době je distribuční soustava rozdělena mezi jednotlivé obchodníky, kteří zaručují jiné ceny, jiné podmínky pro konečného odběratele. Také se objevuje trend tzv. vnořených zdrojů, kdy se na straně distribuční soustavy objevují zdroje, které mají malé výkony, ale dokážou obstarat energii pro určitou část odběratelů, na základě energetické koncepce se do budoucna uvažuje, že zdrojů v distribuční soustavě bude přibývat. V podstatě by se to dalo vysvětlit na principu fotovoltaických panelů na rodinném domě, kdy se tento dům stává energeticky soběstačným. Páteř soustavy tvoří hladina vvn 110 kV, na ni navazuje hladina 35 kV a 22 kV. [1] [5]

1.4 Kritéria přenosu elektrické energie

Požadavky, které jsou kladeny na elektrizační síť, můžeme označit jako kritéria přenosu. Je potřeba zajistit aby ES fungovala bezpečně a ekonomicky. Řešíme kritéria provozní stability, hospodárnosti provozu, budoucí schopnosti sítě reagovat na nová zařízení (unifikace jednotlivých částí) a v rámci organizace ENTSO-E také mezinárodní kompatibilita a další. Nyní si podrobněji uvedeme nejdůležitější z nich:

- **Teplotní kritéria** – všechny prvky, které se v soustavě nacházejí, mají určité hodnoty teplotních mezí, které nemohou překročit. Především dlouhodobá či momentální teplota vodičů může svědčit o možných poruchách, které v síti mohly nastat. Tyto teplotní změny mohou být vyvolány nadměrných zatížením, změnou konfigurace systému po poruše nebo účelné regulaci, která pro danou linku byla nebezpečná.
- **Kritéria řízení napětí a jalového výkonu** – toto kritérium úzce souvisí s hodnotou napětí v jednotlivých uzlech soustavy. Pokud se dostaneme pod dovolenou hodnotu napětí, hovoříme o podpětí, které je nebezpečné stejně tak, jako přepětí. Podpětí vyvolává nebezpečné poruchy u spotřebičů a v soustavě zejména přetížení vedení. Přepětí naopak může vyvolat přeskok, průraz izolačního systému nebo saturaci transformátorů. Kompenzace jalového výkonu vyvolá změnu účinníku spotřeby. Proto je ho opět potřeba udržet v přípustné mezi.
- **Kritéria toků výkonu** – kritérium se týká především řízení činného výkonu. Snažíme se ho řídit tak, aby byly všechny prvky soustavy optimálně využity, docházelo k minimálním ztrátám a vytváření rezerv přenosových cest.
- **Kritéria stability a dynamických jevů** – dynamická stabilita řeší problematiku schopnosti systému přecházet mezi ustálenými stavy. [7]

2 Prostředky pro určení a popis stavů elektrizační soustavy

2.1 Základní pojmy a charakteristiky elektřiny na úrovni přenosové soustavy

- Kmitočet sítě

Jmenovitý kmitočet soustavy České Republiky je 50 Hz. Při normálních podmínkách (i při synchronním provozu s UCTE) je střední hodnota frekvence základní harmonické měřena co 10 sekund, s povolenou odchylkou $\pm 1\%$ (49.5-50.5 Hz) v rozmezí 99.5% roku a během 100% času. Povolené rozmezí frekvencí pro jednotlivé elektrárenské bloky jsou uvedeny v tabulce. Norma, která tento jev popisuje je ČSN 50160. [8]

Tab. 2.1 Frekvenční meze pásem provozu [8]

Typ elektrárny	Uhelné	JE		VE	PVE		Paro- plynové
		EDU	ETE		turbína	čerpání	
Normální bez omezení	48.5-50.5	48.5-50.5		48.5-50.5	48.5-50.5	49.5-50.5	48.5-51.5
Časově omezen	46-48.5 50.5-53	47.9-48.5 50.5-52.5	47.9-48.5 50.5-51.5	46-48.5 50.5-53	46-48.5 50.5-53	49-49.5 50.5-52	48-48.5 51.5-52
Nepřípustný	f>53 f<46	f>52.5 f<47.5	f> 51.5 f<47.9	f>53 f<46	f>53 f<46	f>53 f<49	f>52 f<48
Automatické odpojení od ES	f>53 f<47.5	f>52.5 f<47.9	f>51.5 f<47.9	f>50.2 f<47.5	f>52 f<49.8-49.2	f>52 f<49.8-49.2	f>52 f<48

*Pozn.: JE – jaderné elektrárny, VE – vodní elektrárny, PVE – přečerpávací vodné elektrárny, Paro-
plynové elektrárny, EDU – elektrárna Dukovany, ETE – elektrárna Temelín*

Pokud dojde k vychýlení frekvence z povoleného limitu ± 200 mHz, bloky se automaticky odepnou od centrální regulace výkonu a frekvence, přepojí se na proporcionálně otáčkovou regulaci a dojde k vypnutí sekundární regulace napětí a jalového výkonu ze systému terciární regulace napětí.

Bloky PVE se v režimu čerpání 49.8-49.2 Hz pomocí automatik přepojí na vlastní spotřebu, pokud by následovalo další klesání frekvence, PVE bloky přecházejí do režimu turbínového.

Na vlastní spotřebu přecházejí bloky jaderných a paroplynových elektráren při poklesu od pásma nepřípustného provozu. Uhelné, vodní a přečerpávací přecházejí při poklesu pod 47.5 Hz. [1] [8]

- **Velikost odchylky napájecího napětí**

Při normálních provozních podmínkách musí být v období jednoho týdne 99% efektivních hodnot napájecího napětí měřeno co 10 minut (ze souboru hodnot) a vyhodnoceno pomocí tabulky:

Tab. 2.2 Dovolené meze napětí [8]

110 kV	110 kV $\pm 10\%$ (99 – 121 kV)
220 kV	220 kV $\pm 10\%$ (198 – 242 kV)
400 kV	400 kV $\pm 5\%$ (380 – 420 kV)

Pro hladinu 110 kV nesmí být žádná změřená efektivní hodnota napětí $\pm 15\%$. Pokud jsou hodnoty jiné, než tyto povolené, je nutno tato opatření konzultovat s provozovatelem soustavy a sjednat pomocí smluvního vztahu. [12]

2.2 Regulace napětí a jalových výkonů

Změna napětí v sítí může být způsobena hned několika příčinami:

- zapnutí, vypnutí a přepojení vedení a transformátorů,
- proměnlivostí odběrů elektřiny,
- odstavování bloků elektráren, případně jejich regulace díky ostatním zdrojům v soustavě,
- využití kompenzačních prostředků,
- změna odboček transformátorů,
- poruchami v síti (zkratky, přerušení vedení z důvodu špatného počasí apod.).

Pro řízení těchto veličin se využívají zdroje jalového výkonu (synchronní stroje – bloky, kompenzační prostředky – baterie, tlumivky, polovodičová zařízení, frekvenční střídače – fotovoltaika, větrné elektrárny). U synchronních strojů je využito budících a regulačních systémů, které mají své omezovače a oba tyto prostředky jsou součástí elektrárenského bloku. Reálné možnosti regulace synchronních regulátorů jsou popsány provozními P-Q diagramy a dalšími veličinami jako je např. generátorové napětí, napětí vlastní spotřeby (omezovací podmínky). Výstupem elektrárenského bloku pro jakoukoliv regulaci je tedy certifikovaný provozní diagram. Provozní diagram je u synchronních strojů omezen maximálním statorovým proudem, rotorovým proudem, statickou stabilitou a oteplením rotoru způsobený magnetickým tokem v podbuzeném stavu. [1]

2.3 Principy řízení napětí

Regulátor napětí musí udržovat svorkové napětí na generátoru dle požadované hodnoty, tím mění produkci jalového výkonu, a to jak v přebuzeném, tak podbuzeném stavu. Nejjednodušší provedení je změna svorkového napětí ručním zásahem. Tento způsob je ale časově velmi dlouhý a náročný, proto byla přijata koncepce pilotních uzlů. [1]

2.4 Přínosy regulace napětí a jalového výkonu

- Bezpečnost a hospodárnost provozu – snižování technických ztrát, efektivní využití regulovatelného jalového výkonu.
- Kvalita dodávky elektřiny – vyrovnávání v pilotních uzlech, stabilizace napětí a tím dodání elektřiny ke konečnému spotřebiteli.
- Regulace odboček na transformátorech.
- Tolerance toku jalového výkonu – hodnota je předem domluvena s přenosovou nebo distribuční soustavou v předávacím uzlu.
- Průmysloví odběratelé – opět možnost regulovat kompenzaci této části s využitím samostatné kompenzace přímo v podniku.
- Dispečerské řízení – spoustu zákroků, které v dnešní době soustavu regulují, probíhají automatiky pomoci hlídacích systému, přesto s rostoucím zastoupení výkonové elektroniky je stále velmi nutný lidský zásah dispečera. [1]

2.5 Popis stavů elektrizační soustavy

- **Kritérium N-1**

Je to schopnost soustavy udržet normální chod soustavy i po výpadku prvku. V rámci přenosové soustavy je již v dnešní době provozováno, ale ne primárně sledováno kritérium N-2 (schopnost udržet stabilní chod i po výpadku dvou prvků). Některé významné nově navrhované uzly se už v dnešní době plánují pro odolnost i kritéria N-2 (např. uzel Kočín). Do budoucna je uvažováno, díky rostoucí nejistoty výroby energie (obnovitelné zdroje), jestli kritérium nebude přehodnoceno na N-2. Tohoto plánu se týká projekt GARPUR, který vyhodnocuje kritéria spolehlivosti na úrovni celé Evropy a jeho výsledek by měl být znát 31. srpna 2017. [1] [9] [10]

- **Normální stav**

Je definován jako stav, kdy je jsou veličiny (f , U) v dovozených hodnotách, je dodrženo kritérium N-1 a rezervy jalového a činného výkonu jsou v takovém dostatečném stavu (dle smluvených požadavků), aby byly schopny odolat nepředvídatelným situacím, které jsou opět definovány v příslušných dokumentech. [8] [10]

- **Výstražný stav**

Stav, kdy jsou hodnoty v povolených mezích, ale není splněno kritérium N-1. [8]

- **Havarijní stav a stav nouze**

Je to stav, kdy se frekvence, výkon nebo napětí odchýlí od povolené meze výstražného stavu a je využito jakéhokoliv opatření z plánu obnovy a ochrany. Vyhláška č. 80/2010 Sb. pojednává přímo o stavu nouze a následných opatření, která se mají uskutečnit. [8] [10]

Blackout

Vzhledem k bezpečnostním opatřením, která jsou v soustavě nastavena, není tak velké riziko blackoutu. Přesto se v minulosti stalo, že došlo k náhodnému seskupení jevů, které vedly k úplné ztrátě napětí (definice blackoutu). Pro obnovu napětí při blackoutu existuje níže popsaná strategie obnovy. S tímto výpadkem souvisí obrovské množství hospodářských a finančních ztrát.

- **Strategie obnovy** – vzhledem k tomu, že Česká Republika leží v centrální Evropě, je naše soustava označována jako vnitřní soustava. Jsme napojeni na pět sousedních přenosových sítí (energetických společností):
 - 50Herzt Transmission (Neměcko),
 - TenneT (Německo),
 - APG (Rakousko),
 - PSE (Polsko),
 - SEPS (Slovensko).V této strategii je především spoléháno na vodní elektrárny, které jsou schopny startovat tzv. ze tmy. Popisuje to schopnost elektrárny najet bez napětí z vnější sítě a označuje se jako „Black Start“. Pokyn k nastartování vydává centrální dispečink ČEPS. Dále je využito „open-all“ strategie, která značí, že vypínače v dané oblasti jsou vypnuty (automaticky nebo ručně) z důvodu jasnějších podmínek. Dispečer dle této strategie začne postupně zpracovávat jednotlivé úkony tak, aby souměrně zatěžoval a postupně připojil síť zpět do požadovaného chodu.
- **Priority** – určují obnovu napájení po poruše a to v tomto pořadí:
 - vlastní spotřeba jaderných elektráren,
 - vlastní spotřeba klasických systémových elektráren,
 - hlavní město Praha,
 - velké městské aglomerace,
 - ostatní spotřebitelé.
- **Principy obnovy soustavy** – využitím pomoci obnovy napětí ze sousedních soustav, je zaručeno rychlé obnovení stabilního napětí, a proto je upřednostňováno. Úkolem dispečinku je opět co nejrychleji sjednat množství poskytnuté energie – cca 200 MW s postupným náběhem. Tato opatření jsou obchodně sjednána s daným provozovatelem sousední soustavy. Kromě postupů a priorit obnovy napájení obsahují také manipulační ujednání, velikosti poskytnuté energie a technické a organizační prostředky. Dispečink bude tedy postupně zapínat vedení 400 a 220 kV, transformátory a kompenzační prostředky a bude je zakreslovat do tzv. slepé mapy včetně využití provozních instrukcí PI ČEPS 620-5, 620-11 a 620-12, které pojednávají o postupném fázování a kruhování částí systému.
- **Obnova napájení z elektráren schopných startu ze tmy** – nejdůležitějším aspektem při výpadku je poskytnutí energie pro jaderné elektrárny z důvodu možnosti vzniku jaderné havárie. Proto pokud nedojde ke včasné obnově ani s výpomocí zahraničních společností, sáhne dispečink po těchto elektrárnách.
- **Distribuční soustavy** – a jejich provozovatelé jsou povinni si soustavu obnovit sami s koordinací s dispečinkem ČEPS. [8]

3 Opatření pro zamezení vzniků poruch v elektrizační soustavě

3.1 Základní procesy dispečinku využívané při manipulaci v síti

V této podkapitole budou probrány dva základní procesy, které se využívají při optimalizaci v síti. Všechny zásahy, které v síti vznikají, se obecně nazývají korektivní zásahy. Všechny úkony, které dispečer vykoná, se zohledňují na hlediska bezpečnosti provozu, ekonomického provozu, dopadu na okolní (zahraniční) sítě – koordinovat s dispečinku v rámci ENTSO-E a také jednat v rámci dohodnutých smluv s jednotlivými aktéry podílejících se na jakémkoliv provozu elektrizační soustavy. Tyto opatření jsou součástí obranného plánu Kodexu přenosové soustavy. [1]

- **Rekonfigurace**

Rekonfigurace je pojem týkající se změny zapojení v rozvodnách. Patří do kategorie optimalizace zapojení a dispečer ji využije ve chvíli, kdy dojde k přechodu normálního stavu soustavy na jiný. Může probíhat například prostřednictvím odlehčení části vedení, transformátorů, apod. V normálním stavu je rozvodna zapojená jako jeden uzel, který spojuje všechny části přípojníc pod napětím. Často dochází k rozdělení tohoto uzlu v rozvodně na jeden nebo dva a více pomocí spínačů po rekonfiguraci transformátorů a vedení. Opětovně dochází k tomu, že tento proces neprobíhá jen v jedné rozvodně, ale v několika najednou. Pokud není možnost navrácení normálního stavu, může dojít pouze k vylepšení stavu, který rekonfiguraci požadoval (např. vylepšení výstražného stavu soustavy – pouhé snížení vzniklé odchylky). Je to primární zásah dispečera do soustavy, a to z důvodu, že je to ekonomicky výhodnější než například redispečink. Pokud je to požadováno, dojde k využití redispečinku i rekonfigurace zároveň. [1]

- **Redispečink**

Pojem redispečink pojednává o výkonu. Hlavním cílem je přerozdělit dodávaný výkon do uzlů, nebo jinými slovy přesměrování výkonu mezi jednotlivými elektrárnami. Výkonová rovnováha v soustavě je dána rovnicí:

$$\sum P_G = \sum P_S + \sum P_Z \quad (3.1.)$$

$\sum P_G$suma činného výkonu dodávána generátory

$\sum P_S$suma činného zatížení elektrizační soustavy obsahující vlastní spotřebu elektráren

$\sum P_Z$suma celkových ztrát v soustavě

Tato rovnice platí v rámci propojené soustavy. Členy se vzájemně mění vlivem například:

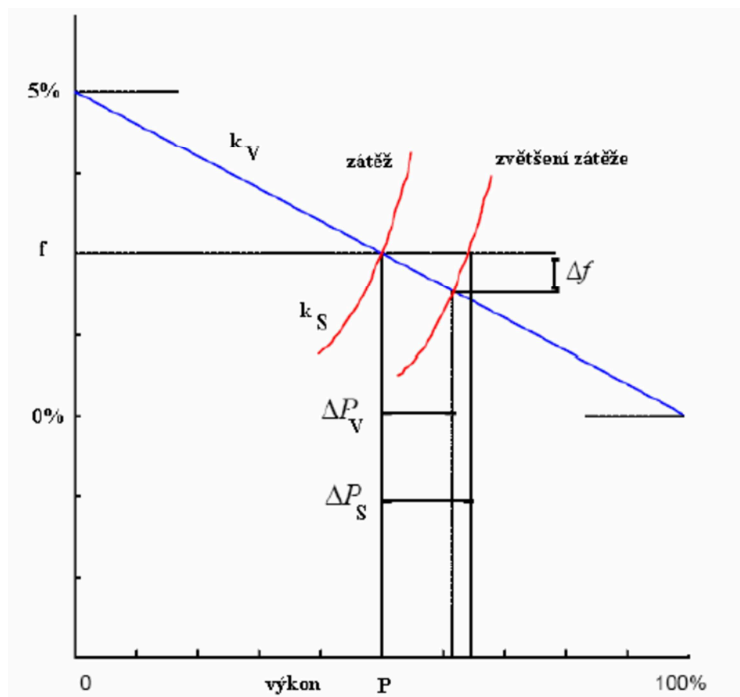
- náhodnou změnou zatížení (odstávky, poruchy velkých průmyslových odběratelů),
- změnou denního diagramu zatížení (léto/zima, slunečné/větrné/zatažené dny atd.),
- poruchou bloku systémové elektrárny,
- neregulovatelnými dodávkami z obnovitelných zdrojů (sluneční svit, delší poryvy větru).

Ve chvíli vzniku výpadku elektrárenského bloku (beze změny zátěže a ztrátách) nastane přerozdělení výkonu mezi ostatní synchronně pracující stroje dle elektrické vzdálenosti od poruchy. Po tomto elektrickém rozdělení dojde k periodicky tlumenému elektromechanickému ději. Dochází ke střídání urychlujícího momentu s brzdícím momentem generátorů. Výsledkem tohoto děje je kolísání frekvence kolem jmenovité hodnoty. Regulátor výkonu turbíny musí automaticky regulovat výkon generátoru podle frekvence sítě dle této rovnice (primární regulace):

$$S = -\frac{\Delta f}{\Delta P_G} \cdot \frac{\Delta P_{G,n}}{fn} \quad (3.2.)$$

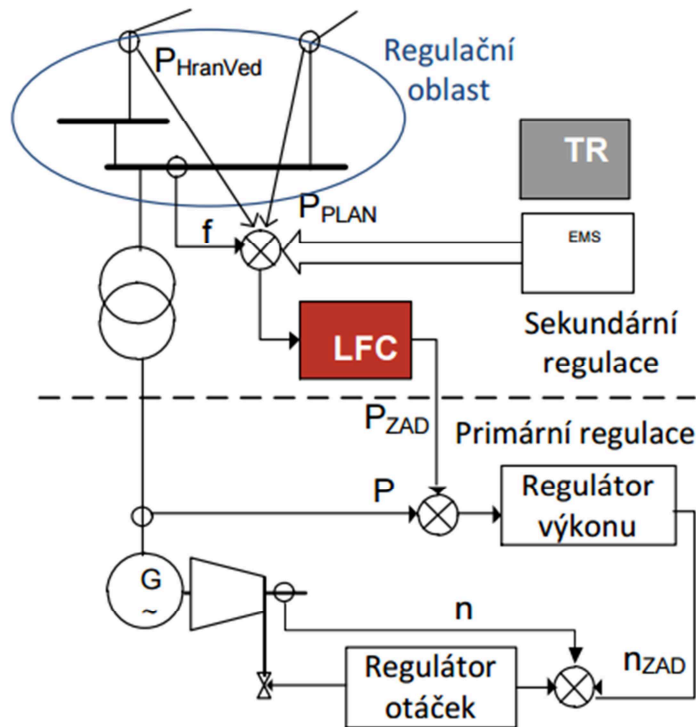
- Δf vzniklá frekvenční odchylka v síti
- ΔP_G aktuální změna činného výkonu generátoru
- $\Delta P_{G,n}$ rozdíl jmenovitého hodnoty činného výkonu generátoru od aktuální hodnoty výkonu
- f_n jmenovitá frekvence 50 Hz
- S statika primární regulace

Tento obrázek je spojením statické charakteristiky zátěže a generátorů, který charakterizuje primární regulaci frekvence a výše uvedený vztah.



Obr. 3.1 Primární regulace frekvence [11]

Základní úrovní regulace f a P je primární regulace probíhající na úrovni elektrárenského bloku. Na ni navazuje sekundární regulace. Viz obrázek níže. Procesy primární regulace by měly být skončeny do 30 s (menší výpadky do 15s) a o zbytek by se měla postarat sekundární regulace, a to do 15 minut. Poté následuje terciární regulace. [1] [11]



Obr. 3.2 Hierarchický princip regulace [1]

3.2 Další možnosti manipulace v síti

Všechny zásahy, které v síti vznikají, se obecně nazývají korektivní zásahy. Kromě redispečinku a rekonfigurace může dojít:

- vypnutí postižené oblasti,
- převedení zatížení,
- změna salda,
- omezení spotřeby. [1]

3.3 Základní přístroje využívané pro zamezení vzniku poruchy v síti

Na hladině mn a nn jsou prvky v soustavě chráněny levnějšími a jednoduššími přístroji jako jsou pojistky, jističe, stykače atd. Pro vyšší napěťové hladiny je už nutno využít ochrany složitějších, nejčastější zastoupení mají ochrany distanční. Kromě ochrany je také využito automatik. [1] [7]

- **Ochrany zařízení elektrických provozů**

Abychom předešli šíření či vzniku rozsáhlé poruchy na jednotlivých zařízeních elektrizační soustavy využíváme elektrických ochrany. Definovat ochranu můžeme jako zařízení, které pozoruje určitou část daného zařízení (vedení, transformátor, generátor apod.), tak, aby spolehlivě a bezpečně dané zařízení ochránilo před možným účinkem vzniklé poruchy. [7]

- **Základní požadavky na ochrany**

- a) Spolehlivost – ochrana nesmí při poruše selhat a při bezporuchovém chodu nesmí samovolně působit. Její nespolehlivost může být zapříčiněna jak lidským faktorem, tak vlastní konstrukcí.
- b) Selektivita – zajištění chodu ochrany tak, aby vypla co nejkratší úsek vzniku poruchy.
- c) Citlivost – ochrana musí umět rozlišit, zda porucha vznikla uvnitř chráněného objektu, nebo mimo něj.
- d) Rychlost působení – pro určité druhy poruch musí ochrana reagovat co nejrychleji (zkrat), pro jiné poruchy musí být nastaven delší vypínací čas (pokles napětí při startování asynchronních motorů).
- e) Jednoduchá obsluha.
- f) Ekonomický faktor. [7]

- **Dělení ochran**

- a) Podle chráněného objektu – generátorové, ochrany motorů, transformátorové, ochrany přípojníc, vedení apod.
- b) Podle druhu poruchy – zkratové, proti přetížení, podpět'ové, přepět'ové, frekvenční, při zemním spojení apod.
- c) Podle doby působení – mžikové (ochrana působí ihned při vzniku poruchy; její rychlost je omezena pouze na době vyhodnocení samotné ochrany), časově závislé a nezávislé.
- d) Podle konstrukce – elektromechanické (nejstarší; špatná spolehlivost), statické (tranzistorové) a digitální (nejspolehlivější)
- e) Podle funkčního principu – dělení podle vyhodnocované veličiny: proudové, napět'ové, distanční, rozdílové, jalové, frekvenční apod. [12]

- **Automatiky**

Automatiky doplňují většinou jednotlivé ochrany. Jsou zde z důvodu vyššího faktoru bezpečnosti. Jsou schopny odstranit poruchy, které by případně potřebovaly zásahy dispečinku. Rozdílová ochrana přípojníc je většinou doplněna automatikou selhání vypínače, která má za úkol zajistit vypnutí, dojde-li k poruše na vypínači. Tento způsob ochrany zlepšuje čas vypnutí poruchy, a tím mírní účinek poškození silového zařízení a zlepšuje stabilitu soustavy. Dalším příkladem mohou být impedanční ochrany nebo automatika opětného zapnutí (OZ). Automatika OZ je vhodná pro poruchy typu zkrat. Jejím principem je opětovné zapínání a vypínání (vznik beznapět'ové pauzy) vedení s obvyklým časovým rozestupem 1s. Lze u ní nastavit možnost opakování (maximálně 7) a fáze, kterou automatika bude vypínat (pouze postižená, nebo všechny 3 fáze). Názorným příkladem může být zkrat způsobený spadlou větví na vedení. Ochrana zareaguje na zkrat, upozorní automatiku, která začne spínat. Následkem může být spálení dané větve a obnovení vedení do ustáleného stavu bez větší časové prodlevy. [1] [12]

- **Detekce kývání**

Poruchy, které v síti vznikají, mohou mít za následek změnu vzájemné polohy rotorů generátorů, které mohou způsobit kývání výkonu. Následkem při této poruše může být ztráta synchronismu, nebo naopak nastolení nového ustáleného stavu. Pokud je potřeba použít nějaké opatření, je možné například síť rozdělit na jednotlivé ostrovy. [1]

4 Opatření pro zamezení šíření poruchy

4.1 Plán obrany proti šíření poruch v přenosové soustavě

Hlavním cílem jsou opatření, která by zamezila šíření poruchy a vedla ke zkrácení doby působení poruchy. Předcházení a řešení stavu nouze řeší zákon č.458/2000 Sb. a dále vyhlášky č.80/2010 Sb. a 79/2010 Sb.

- **Řízení propustnosti sítě** – zahrnuje odstranění tzv. úzkých míst (zlepšení technických vlastností jednotlivých částí – zvýšení dovoleného zatížení, nová výstavba vedení apod.), dále zahrnuje vymezení případů (mimořádné stavy), kdy by mohlo dojít k přetížení nebo dalším nadstandartním případům a je požadováno změnit poměry nasazení bloků v soustavě, aby došlo k navrácení původní stability. Pro toto řízení je využito redispečinku a protiobchodu.
- **Opatření proti přetížení** – hlavní úkol dispečera, který využije několika prostředků k vyrovnání odchylek. Má právo na:
 - změnu konfigurace sítě přenosové soustavy,
 - dát pokyn ke snížení výkonů jednotlivých bloků,
 - pokud někde v soustavě probíhá práce na vedení, má možnost požadovat zastavení prací a opětovnému spuštění vedení,
 - zvýšit napětí v soustavě,
 - v rámci protiobchodu má možnost změnit export a import,
 - nařídit snížení odběru jednotlivým odběratelům, kteří mají tuto možnost zmenšení.

Jednotlivé kroky dispečera jsou popsány v provozní instrukci PI 620-10 Odstranění přetížení vedení a transformátorů.

- **Opatření proti kaskádovitému šíření poruchy** – požadovány na straně výroby, stejně tak jako na straně sítě. Strana sítě se stará o správnou činnost ochran, blokování hladinových regulátorů transformátorů od podpětí, zajištění selektivity ochran (vyhodnocení poruchy správnou ochranou a vypnutí nejkratší možné části od poruchy), zajištění správného vypnutí ochran (aby jednotlivé členy ochran byly správně nastaveny, tzn. správně nastavená citlivost ochran), při ztrátě synchronismu okamžitě reagovat (využití distančních ochran) a o opětovná

zapnutí (tzv. OZ, při poruchách na vedení). Strana výroby zajišťuje správné nastavení hlídání podbuzení, omezovačů proudů, systémových stabilizátorech regulace, dále nastavení a regulace otáček turbín a správné fungování ostrovního provozu, rychlého a správného řízení proti přeběhu otáček turbíny, využívání rychlých nezávislých budících souprav a také správné nastavení ochran proti prokluzu pólů.

- **Opatření proti poklesu a vzrůstu frekvence** – Běžný provoz soustavy má povolenou odchylku soustavy ± 200 mHz. Opatření v soustavě s havarijním vybočením frekvence určuje provozní instrukce ČEPS (zásady ve vyhlášce č.80/2010 Sb. O stavech nouze). Je odvozen z pásma provozu bloků ke změnám frekvence.
- **Frekvenční odlehčování** – v České Republice jsou uzákoněny 4 stupně systémového odlehčování zátěže. Toto je zprovozněno pomocí frekvenčních relé, které se instalují do rozvodu 110 a 220 kV, tzn. v distribuční soustavě.

Tab. 4.1 Systém frekvenčního odlehčování [8]

Stupeň (frekvence) [Hz]	1. (49)	2.(48)	3.(48.4)	4.(48.1)
Objem odlehčované zátěže [%] z netto zatížení	12	12	12	14

Součet procent v tabulce je 50%, tzn., že je zde připojena polovina celkového netto zatížení elektrizační soustavy. Není zde nastaveno žádné umělé časové zpoždění reakce relé. Limitující je pouze čas, který je potřebný ke změření frekvence a odpojení zátěže.

- **Opatření proti poklesu a vzrůstu napětí** – Elektrárny (výkon 100 MW a výše) obsahují automatické regulátory buzení. Mají za úkol udržet svorkové napětí (primární regulace), zvyšovat stabilitu při působení přechodného děje, zamezit kývání soustavy (rázové vlny), pohlídat pracovní diagramy bloky. Transformátory tvoří také samostatnou kapitolu a to v podobě hladinových regulátorů a přepínání odboček pod zatížením. Hladinové regulátory slouží k udržení konstantního napětí sekundární strany. Opět je zde uplatněn i princip solidarity – dochází k vyrovnání tak, aby se všechny transformátory na daném úseku podílely na vyrovnání stejným podílem. Tyto regulátory jsou úzce spojeny s problematikou pilotních uzlů.
- **Kompenzační prostředky** – v soustavě musí být dostatečné množství tlumivek, které zamezí překročení horní povolené meze napětí poté, co dojde k vyčerpání možnosti regulace alternátorů.
- **Mimořádné prostředky** – jsou využity na hladině 400 kV (meze 380 - 420 kV) a na dispečinku je využito těchto prostředků. Nad 420 kV dojde k postupnému vypínání přenosových vedení a platí zásada, že jednostranné napájení zatížení nesmí zůstat v soustavě. Pod 380 kV je využito uvolnění jalových výkonů z klasických bloků pomocí zmenšení činného výkonu a využití rychle startující zálohy, dále k přerušení prací, testů a diagnostiky na vedení anebo v krizové situaci je možno porušit sjednané podmínky vztahující se k danému

úseku vedení. V souvislosti se sousedními vedeními jsou hodnoty nad 440 kV pokynem pro přepěťové automatiky, které vedení vypnou.

- **Opatření proti kývání** – může být z různých příčin (vícečetná porucha, oslabení sítě) vést k netlumeným kmitům soustavy. Zásadou pro dispečink je to, že nesmí danou oblast ještě více oslabit (vypnutím další části). Využívá se proto distančních ochran, které jsou vybaveny závorou proti kývání. Může dojít i k výskytu mezisystémových kmitů (0.2-1 Hz), které tlumí systémové stabilizátory, především tyto kmity nesmí ohrozit ochrany (nesmí dojít k signalizaci, či rovnou k odpojení).
- **Opatření proti ztrátě synchronismu** – je rozděleno na statickou a dynamickou stabilitu. Proti statické stabilitě je opět využito distančních ochran na vedení a transformátorech. Proti dynamické stabilitě využíváme kontroly v rozvodnách 400 kV, tím způsobem, že si spočítáme nejhorší možnou poruchu – výpočet maximální povolené doby trvání 3fázového zkratu, tak aby nedošlo k porušení stability blízkých generátorů. Generátory nad 200 MW obsahují podle normy ČSN 333051 ochrany proti ztrátě stability.
- **Mezinárodní spolupráce při předcházení a řešení poruch** – je podstatou mezinárodní spolupráce. Často se stává, že porucha, která vznikla na jedné straně propojené soustavy, se přenesla do soustavy zahraniční. Z tohoto důvodu byl vytvořen varovný a informační systém RAAS – „Real Time Alarming and Awareness System“ a EIS – „Emergency Information System“. Oba systémy jsou využity pro komunikaci mezi jednotlivými dispečinky. [1] [13] [8]

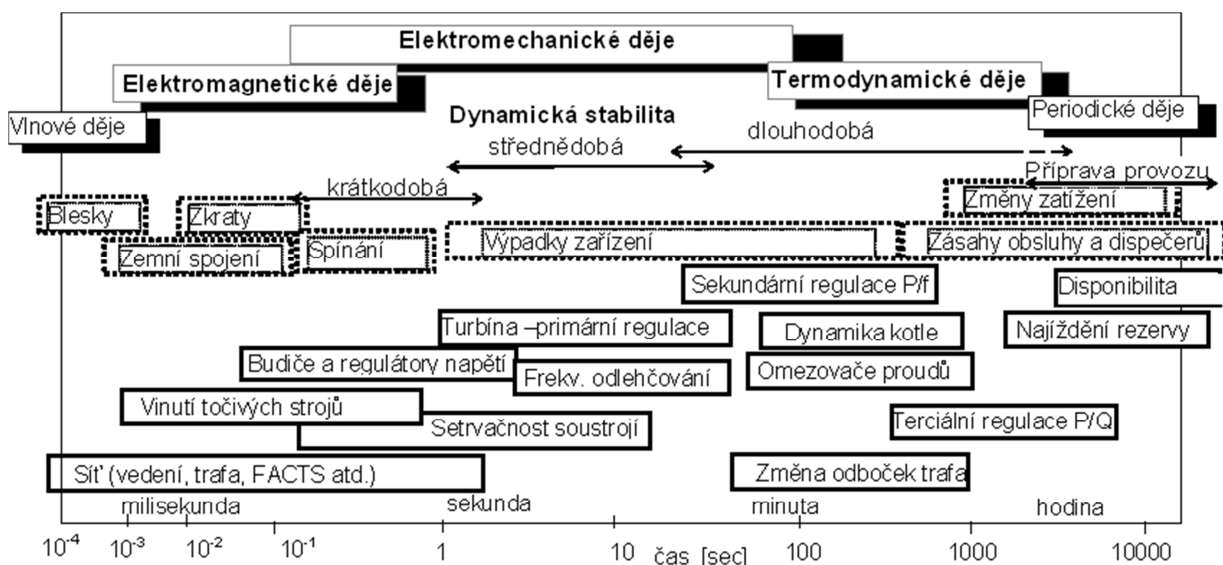
5 Přejchodné jevy v elektrizační soustavě a jejich simulace

5.1 Přejchodné jevy v ES

Základem bezpečného fungování elektrizační soustavy je stav, ve kterém jsou všechny veličiny tuto soustavu popisující v ustáleném stavu. V důsledku změn jednotlivých veličin dochází k přeměně ustáleného stavu ES a vytvoření přechodného děje do doby, než se soustava opět dostane do nového ustáleného stavu. Tyto změny mohou být způsobeny mnoha příčinami – zkraty, poruchami alternátorů, změnami určitých dovolených mezí veličin apod.

Rozlišujeme statickou a dynamickou stabilitu soustavy. Při základním popisování ES vycházíme z předpokladu, že soustava je dynamická, tzn. systém, v němž je okamžitá hodnota vnitřních veličin závislá na okamžitých hodnotách řízení.

Přejchodné jevy vznikající v soustavě můžeme rozdělit na vlnové přechodné jevy (doba trvání je v řádech milisekund či mikrosekund) a elektromagnetické přechodné jevy (řád desetin sekundy) a elektromechanické přechodné jevy (od desetin sekundy až po desítky sekund).



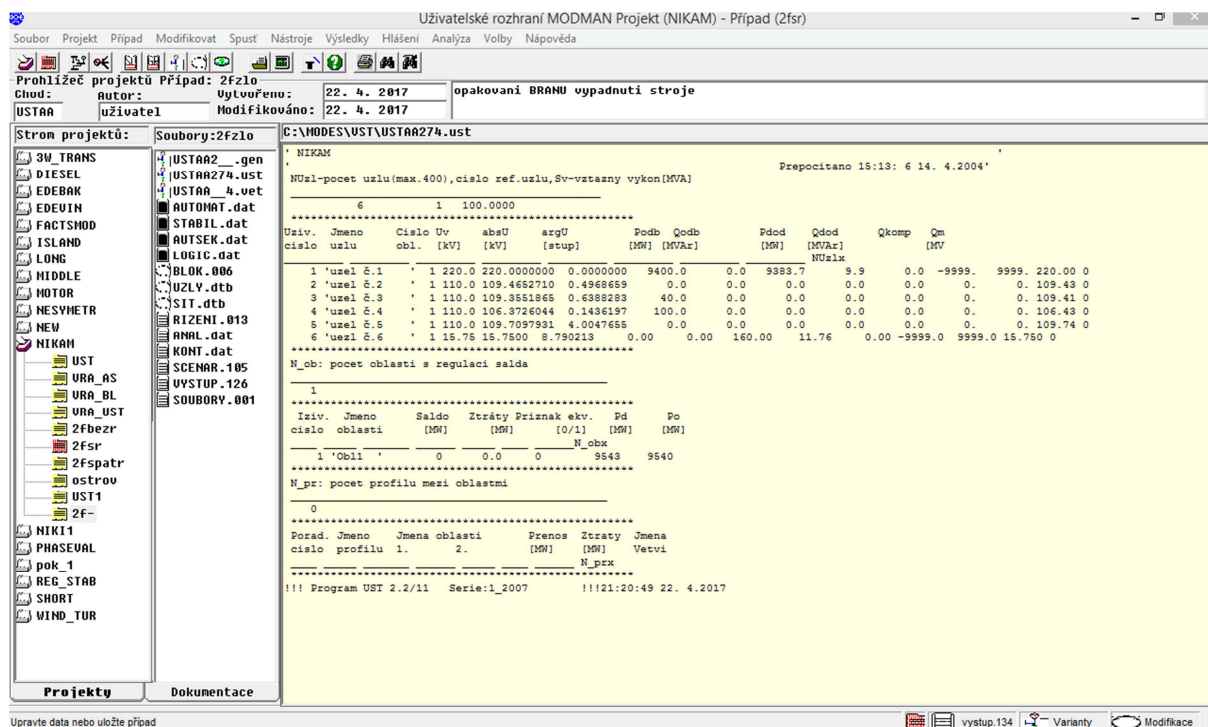
Obr. 5.1 Rozdělení elektromechanických dějů v soustavě [13]

Nejčastější poruchou a následným vznikem elektromagnetických dějů v soustavě je výpadek určité části soustavy, zkrat, vznik nesymetrie, regulace točivých strojů a nesynchronní spuštění synchronních strojů. Zkrat je často vyskytující se porucha a je charakterizován spojením nakrátko mezi fázemi, nebo mezi fázemi a zemí. Je doprovázen vznikem velkých zkratových proudů.

Pro simulaci těchto dějů je možné využít několika programů jako např. EMTP-ATP nebo MODES, který je v následující podkapitole rozebrán.

5.2 Simulační program MODES

Program MODES, který slouží k simulaci střednědobých až dlouhodobých přechodných, pracuje na principu balíků programů jako dosovská aplikace v prostředí WINDOWS. Manipulaci s ním zajišťuje uživatelské rozhraní MODMAN .

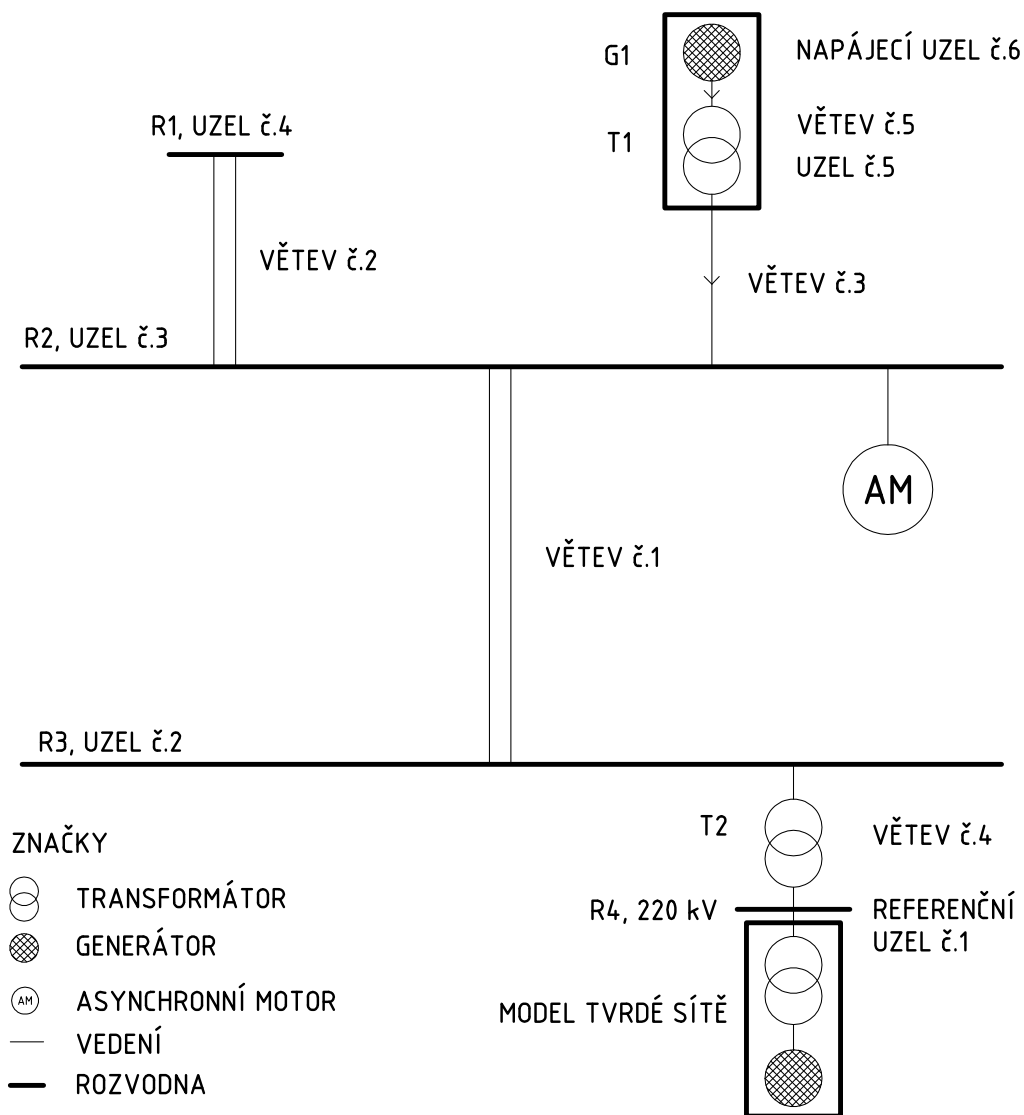


Obr. 5.2 Uživatelské prostředí MODMAN

Na obr. 5.2. je ukázáno pracovní prostředí uživatele při spuštění programu. V levém sloupci se nachází **projekty**, které obsahují případy. Program MODES obsahuje předdefinované projekty, které se mohou libovolně upravit, nebo je možné vytvořit projekt NEW, který obsahuje pouze případ UST (základ jakéhokoliv projektu). **Případy** jsou jednotlivé modelované situace v projektu pomocí **scénáře zásahů**, který musí být zadán s přesnou časovou posloupností. Program provede simulaci a vyhodnotí výsledky, které je možné si graficky nebo pomocí textového souboru zobrazit a vyhodnotit. [14] [15] [16]

5.3 Projekt NIKAM

V programu byl již předdefinovaný projekt EDE, který byl následně modifikován na projekt NIKAM. Tento projekt obsahuje model části elektrizační soustavy vývodu bloku elektrárny. Modifikace spočívala v přidání ekvivalentní zátěže do rozvodny v podobě asynchronního motoru. Schéma uvedené níže obsahuje i tento motor. Následuje tabulka, která se týká všech obsažených prvků v projektu.



Obr. 5.3 Modifikované schéma původního projektu EDE

Tab. 5.1 Technické specifikace prvků v projektu

Objekt	Označení v projektu	Popis
Elektrárenský blok	G1	Napětí generátoru 15,75 kV, Generátor dodává do soustavy 160 MW
Blokový transformátor	T1	15,75/110 kV
Rozvodna	R1	Odběr 100 MW
Distribuční transformátor	T2	110/220 kV
Rozvodna	R3	R110 kV
Rozvodna	R2	R110 kV, Odběr 40 MW
Rozvodna	R4	R220 kV, nadřazená soustava
Vedení – rozvodny jsou spojeny vedením 110 kV		
Jednoduché vedení	větev č.3	G1-R2
Dvojitě vedení	větev č.2	R1-R2
Dvojitě vedení	větev č.1	R2-R3

Výkon 160 MW, který je do soustavy dodáván generátorem G1, je spotřebován v rozvodně R1 (100 MW), R2 (40 MW) zbylých 20 MW je přes distribuční transformátor T2 přeneseno do nadřazené sítě (R4). Rozvodna R2 slouží v původní podobě pouze pro přenos výkonu.

Přidání stroje bylo provedeno pomocí následujícího řádku v programu:

```

n# Jmeno      Jmeno      TypPar  Model  TypPar  Model
   Bloku      Uzlu      Asynchr.Motoru  Pohonu  Modi
-----
1 'VRAM'      'uzel č.3'  ''      'ELM1' ''      'STAN'
*****

```

Obr. 5.4 Řádek přidání asynchronního motoru

Výkon S_n , který asynchronní motor VRAM odebírá je 50 MVA. Model motoru ELM1 a model modifikace STAN byl vybrán na základě prozkoumání již předdefinovaného projektu a zvolen jako nejschůdnější varianta ekvivalentní zátěže. [14] [15]

5.4 Případy řešené v projektu NIKAM

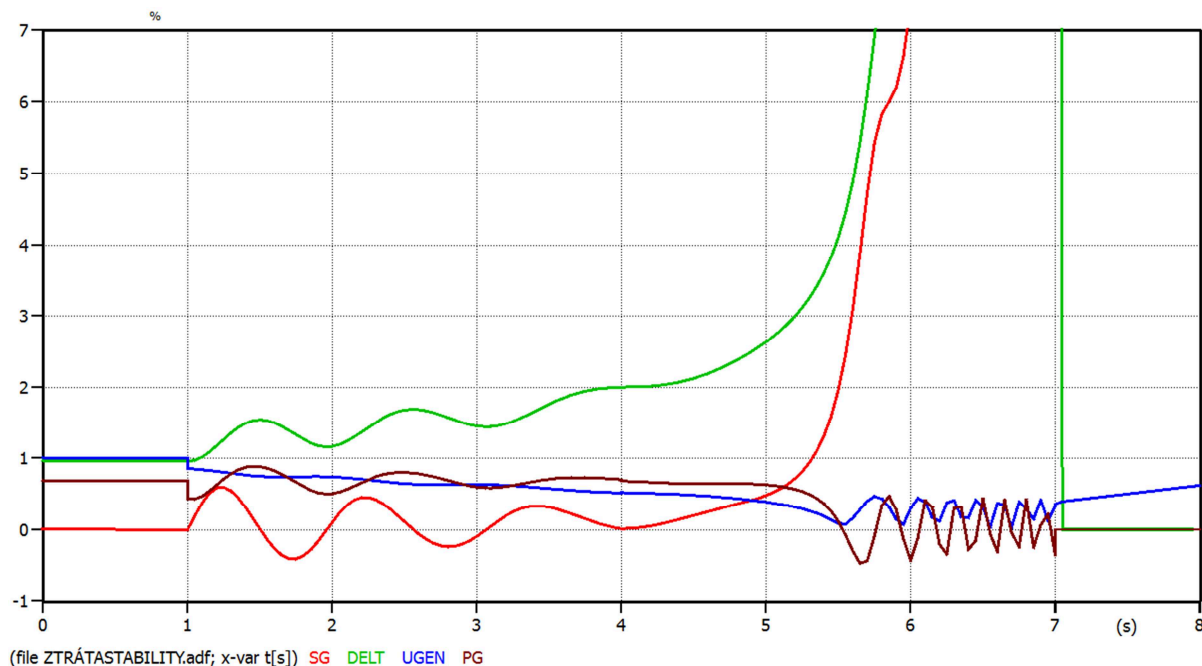
Jako názorný příklad poruchy a opatření, které v soustavě mohou nastat je v následujícím textu popsán nasimulovaný nesymetrický 2fázový zkrat a vznik ostrovního režimu.

- **2fázový zkrat v rozvodně R2 vedoucí ke ztrátě stability**

Tento případ simuluje zkrat vedoucí ke ztrátě stability a odpojení stroje. Simulace obsahuje tento scénář: vznik 2fázového zkratu s reaktancí 5Ω v rozvodně R2, odpojení a zapojení větve č. 1 bez odpojení zkratu (1 cyklus), opětné vypnutí a zapojení větve bez odpojení zkratu (2 cyklus).

Zátěžný úhel v tomto případě neodpojení poruchy nekontrolovatelně roste, což vede k výpadku generátoru. Skluz vykazuje podobné chování jako zátěžný úhel. Napětí a výkon se nebezpečně v reakci na chování stroje rozkývají a stroj se odpojí.

Pokud by tato porucha vznikla na reálné části vedení, došlo by ke spuštění hierarchické regulace popsané v kapitole 3.1. Ve chvíli výpadku bloku by nejdříve byla snaha o využití rekonfigurace a redispečinku do doby odstranění poruchy z nadřazené sítě. Snahou by bylo pokrytí chybějícího výkonu elektricky blízkými stroji, co nejrychlejší odstranění poruchy na vedení a opětovné přifázování generátoru do sítě.



Obr. 5.5 Ztráta stability generátoru při 2-f zkratu

- **2fázový zkrat v rozvodně R2 s udržením stability**

Tento případ pojednává o vzniku stejné poruchy s rozdílem udržení stability. V čase 1 sekunda nastal 2fázový zkrat v rozvodně R2 s reaktancí 15 Ω. Jako následné opatření odstranění poruchy je zvoleno odpojení koncového uzlu větve č. 1 v čase 2s, odpojení zkratu na větví v čase 3s a následné opětivé zapojení větve č. 1 v čase 4s.

Tento zkrat v rozvodně R2 měl na větví č. 1 hodnoty fázových proudů a fázových napětí v uzlu v čase 1s:

- $I_A = 101,01 \text{ A}$, $I_B = 2892,71 \text{ A}$, $I_C = 2977,52 \text{ A}$,
- $U_A = 63,09 \text{ kV}$, $U_B = 43,29 \text{ kV}$, $U_C = 45,46 \text{ kV}$.

Tyto hodnoty vypovídají o chování při zkratu. Napětí postižených fází klesne a proudy vzrostou. Ochrany použité v síti na zkrat reagují a vyhodnocují další postup. Snahou je odstranění zkratu na vedení pomocí automatik popsané v kapitole 3.3 pomocí opětivního zapínání. Tohoto principu bylo dosaženo v tomto případě (vypnutí a zapnutí větve 1 cyklem). Vzhledem k výsledkům nebylo nutné použít další opatření.

Následující obrázek popisuje **stabilitu generátoru**. Tento graf vyhodnocuje všechny veličiny v poměrných hodnotách, které MODES generuje s časem výpočtu do 10 s. V tabulkách hodnot výsledků program nabízí funkci výpisu v hodnotách pojmenovaných. Všechny křivky se s postupným odezněním elektromagnetického a elektromechanického děje ustalují a nedojde ke ztrátě stabilního chodu stroje.

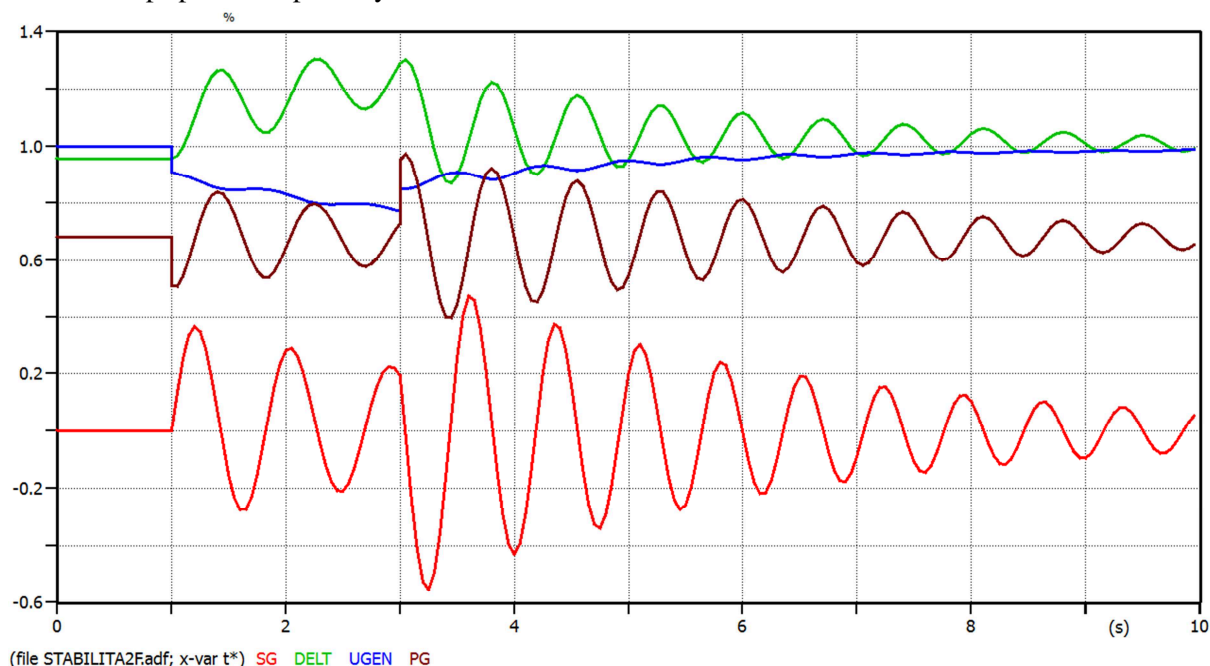
Vnitřní zátěžný úhel (zelená křivka, DELT) – v grafu je zátěžný úhel v programu zobrazen v rad/s. Synchronní stroje nevypadnou ze synchronismu, pokud tento úhel nepřekročí 90° , tedy 1.57 rad/s. Maximální hodnota, kterou úhel dosáhne je $74,76^\circ$ v čase 2,250 s, tudíž je tato podmínka splněna. Ustálená hodnota úhlu je o $0,48^\circ$ vyšší než hodnota začáteční, což je v pořádku. V tomto případě se tedy stroj rozkývá, ale v dovolených hodnotách zátěžného úhlu a postupně se dosáhne ustáleného stavu.

Skuz (červená křivka, SG) – má podobný průběh jako zátěžný úhel. V MODESU je tato mechanická veličina uvedena v mHz. Maximální odchylka je -277,37 mHz od jmenovité frekvence.

Činný výkon (hnědá křivka, PG) – kopíruje křivku skuzu, což odpovídá chování stroje. V čase vzniku zkratu výkon dosahuje hodnoty 119 MW, který charakterizuje reakci na pokles napětí způsobený zkratem (UGEN=14,23 kV).

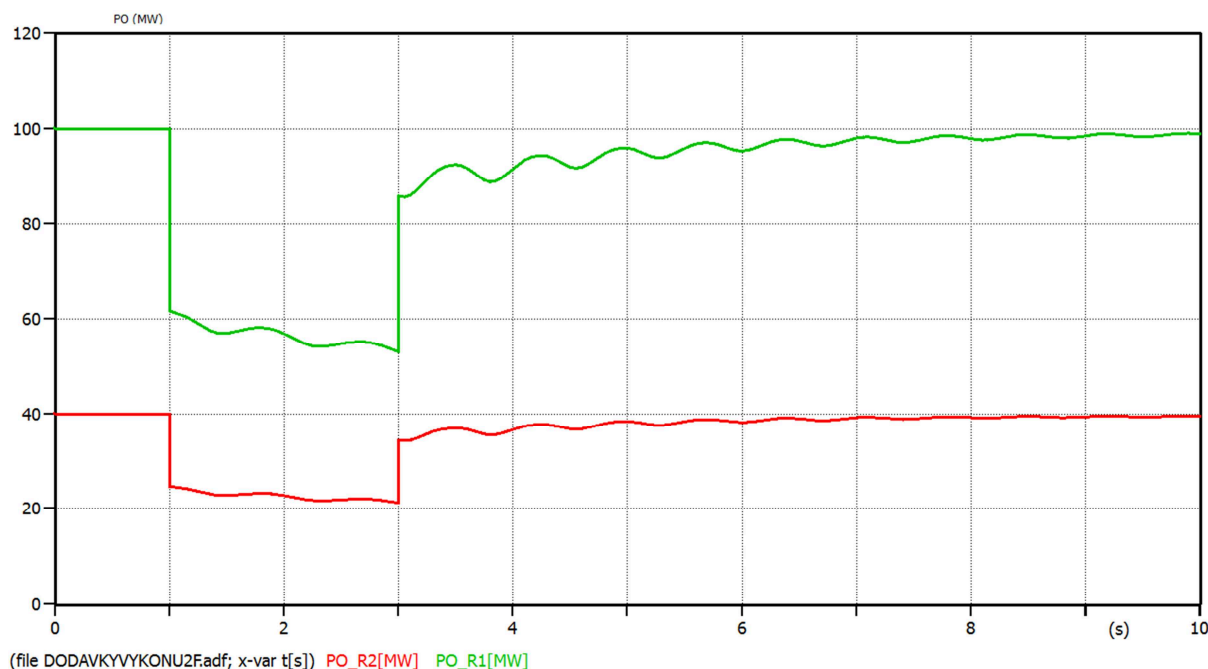
Napětí (modrá křivka, UGEN) – pokles napětí na generátoru je dán vzniklou poruchou, jmenovitá hodnota stroje 15,75 kV, klesla během poruchy až na hodnotu 12,52 kV.

Regulátor primární regulace (do 30s) by v takovémto případě hlídal překročení synchronních otáček (mechanické energie na hřídeli) a stejně tak by reagovala budící soustava, na kterou je požadováno plynulé regulace, hlídání stability stroje a zajištění dodávky jalového výkonu do sítě a rychlému odbuzení v případě této poruchy.



Obr. 5.6 Stabilita generátoru G1 při vzniku 2fázového zkratu bez ztráty stabilního chodu stroje

Dodávky výkonů do rozvodny R2 a R1 byly v reakci na činný výkon generátoru ovlivněny následovně:



Obr. 5.7 Dodávaný činný výkon do rozvodny R2 a R1

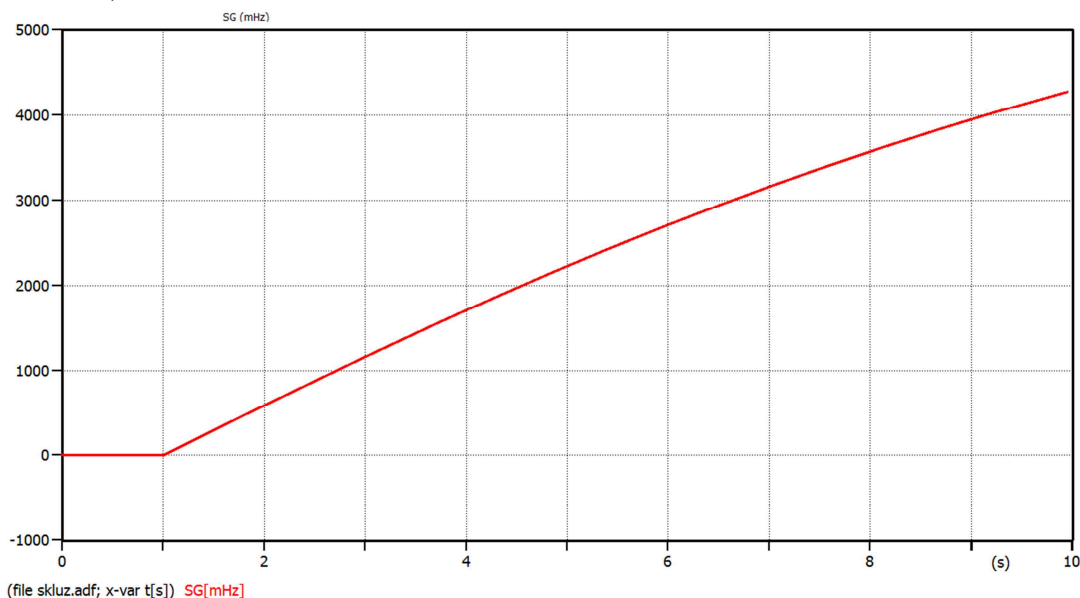
Na grafu lze pozorovat pokles v době vzniku zkratu do doby odpojení zkratu u obou rozvodn téměř na 50 %. V čase vzniku hodnota klesla u rozvodny R2 na 24,7 MW z požadovaných 40 MW a v rozvodně R2 to byl pokles na 61,7 MW (požadovaná hodnota 100 MW). Tato reakce je logická vzhledem k předchozímu grafu zobrazující chování generátoru.

- **Ostrovní režim při odpojení nadřazené sítě**

V čase 1s došlo k odpojení nadřazené sítě pomocí vypnutí větve č. 1.

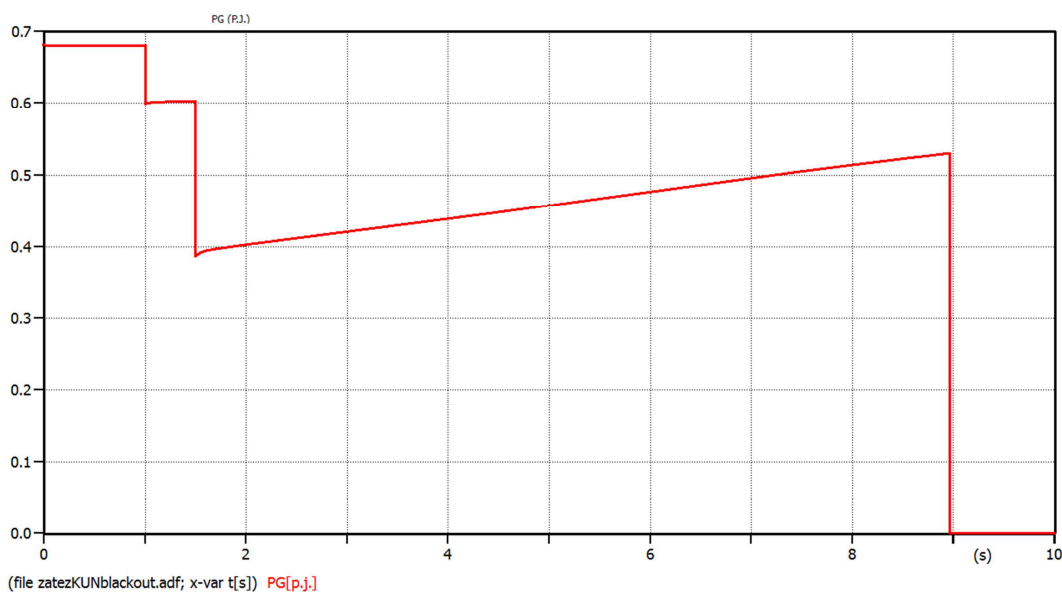
V síti došlo k vytvoření ostrova. Dodávka činného výkonu generátoru G1 v síti byla rozdělena mezi rozvodu R1, R2 a dodávka do nadřazené sítě se rovnala 20 MW. Po vytvoření ostrova vznikl nadbytek výkonu v izolované síti 20 MW. Tento výkon je nutné přerozdělit, nebo snížit dodávaný výkon generátorem, aby nedošlo k překročení limitních otáček stroje, nebo v některém z odběrových míst zvýšit odebíraný výkon. Vzhledem k typu namodelování generátoru G1 nebylo možné v programu použít regulaci otáček a jejich udržení na přípustné hodnotě, jelikož jsou použity jednoduché modely. Snahou změnit model generátoru bylo změnit budič a typ turbíny s možností regulace ostrova na základě prozkoumání předdefinovaného projektu ISLAND. Toto provedení bylo aplikováno na projekt NIKAM, ale bez výsledku.

Skluz generátoru po odpojení větve nekontrolovatelně stoupal, pokud by byl generátor správně namodelován, se všemi regulátory a automatikami, k takovému nárůstu skluzu by nedošlo, snahou by bylo omezit takové roztočení stroje pomocí regulátoru frekvence snížením mechanických otáček turbíny (např. přiškrcením páry) ve spojitosti s produkovaným výkonem, podle tabulky uvedené v kap. 2.1. Možnost měnit výkon stroje je dána buď frekvencí, nebo jalovým výkonem (v ostrovním režimu tedy frekvencí).



Obr. 5.8 Skluz generátoru po vzniku ostrovního režimu

Možnost ukázky automatického odpojení je snížení odběru v Kunčicích po vytvoření ostrovního režimu. V čase 1,5 s je zátěž v Kunčicích zmenšena na 50 MW. Vlivem odlehčení stroje dojde ke vzniku nadotáček a odpojení bloku v čase 8.96 s s následným blackoutu v síti. MODES o této skutečnosti informuje ve hlášeních, kde se objevuje řádek: „nadotacky - blok vypnut Ochranou bloku“ a „blackout vypadkem zdroje“. Opatření následující po této poruše jsou popsány v kap. 2.5.



Obr. 5.9 Vznik blackoutu po odlehčení zátěže v ostrovním režimu

6 Závěr

Cílem této práce bylo s využitím programu MODES namodelovat poruchu a vytvořit následné opatření proti jejímu šíření a opětovné navrácení bezpečného chodu soustavy. V první části práce byly popsány teoretické předpoklady, které jsou využívány k zajištění stability.

Program MODES je síťový simulátor. Stěžejním úkolem je v namodelovat projekt se všemi potřebnými částmi. Projekt NIKAM, který je modifikací již původního projektu EDE, odpovídá vývodu bloku elektrárny. Modifikace spočívala v podobě přidání odběru do rozvodny prostřednictvím asynchronního motoru. Výsledkem byla změna dodávaného výkonu do nadřazené sítě. Bezpečný chod soustavy je v tomto projektu posuzován pomocí grafů na základě stability generátoru a dodávky výkonu do odběrových míst.

Simulovány byly dva případy poruch. První poruchou byl 2fázový zkratu na vedení. První varianta využívá opatření, pomocí opětovného zapínání vedení, vedoucí k odstranění poruchy a navrácení ustáleného stavu do 10s bez výpadku generátoru z přípustných mezí. Aplikací tohoto opatření byl splněn cíl práce. Druhá varianta se zabývá 2fzkratem, který způsobil natolik vážný zásah do soustavy, že automatiky opětovného zapínání jej nebyly schopny odstranit, a došlo ke ztrátě stability.

Druhá porucha spočívala ve vytvoření ostrovního režimu. Ostrovní režim vznikl odpojením nadřazené sítě. Vzhledem k výkonu generátoru došlo k přebytku výkonu v soustavě, jelikož 12,5 % bylo odváděno do nadřazené sítě. Tento výkon bylo nutno buď přerozdělit mezi odběrová místa, anebo snížit činný výkon generátoru pomocí regulace. Projekt NIKAM obsahoval jednoduchý model generátoru, který neobsahoval regulaci v závislosti na produkováný výkon, tedy při vzniku ostrova nedošlo k automatickému odpojení stroje při překročení povolených veličin (skluz, zátěžný úhel). Model používal pouze jednoduchou regulaci, kdy byl stroj odpojen až při určité hodnotě nadotáček, čehož bylo dosaženo v druhé variantě případu ostrovního režimu, kdy kromě výpadku nadřazené sítě došlo i ke snížení odběru. Díky tomuto stavu došlo k přebytku 43,75 % výkonu v soustavě vedoucímu k odpojení stroje a následnému blackoutu. Myšlenkou tohoto případu bylo demonstrovat jednoduchost využitého modelu generátoru projektu. Vhodným opatřením pro návrat stability v ostrovním režimu by bylo naopak zvýšit odběr.

Seznam literatury

- [1] K. MÁŠLO, Řízení a stabilita elektrizační soustavy, Praha: Asociace Energetických Manažerů, 2013.
- [2] M. BEŠTA, „Rozvod elektrické energie,“ 2017. [Online]. Dostupné z: https://cw.felk.cvut.cz/courses/a6m33bez/materialy/stud%20material%20stazeny%20z%20Internetu/el_bezpecnost/T3-Rozvod-elektrick%E9-energie.pdf.
- [3] ENTSO-E, „ENTSO-E Member Companies,“ 2017. [Online]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/MODES/Tutorial_ZCU.pdf.
- [4] ČEPS, „Data do kapsy,“ 2015. [Online]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Media/Tiskove-zpravy/Documents/Data%20do%20kapsy%202015%20ČJ.pdf>.
- [5] OENERGETICE, „Česká přenosová a distribuční soustava - 2.díl Rozvodny přenosové soustavy,“ 2017. [Online]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/ceska-prenosova-a-distribucni-soustava-2-dil-rozvodny-prenosove-soustavy/>.
- [6] tzbinfo, „Druhy elektrického silnoproudého rozvodu,“ 2017. [Online]. Dostupné z: <http://www.tzbinfo.cz/4035-druhy-elektrickeho-silnoproudeho-rozvodu>.
- [7] J. TLUSTÝ, Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav, Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011.
- [8] ČEPS, „Kodes přenosové soustavy,“ 2017. [Online]. Dostupné z: <https://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Stranky/default.aspx>.
- [9] GARPUR, „garpur-project,“ [Online]. Dostupné z: <http://www.garpur-project.eu>.
- [10] ENTSO-E, „entso-e.eu,“ [Online]. Dostupné z: https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/resources/OS_NC/130924-AS-NC_OS_2nd_Edition_final.pdf.
- [11] ČVÚT, „Regulace frekvence v ES,“ [Online]. Dostupné z: http://home.pilsfree.net/fantom/FEL/MR/_pred_web/5_MRRegulaceES.pdf.
- [12] Z. MEDVEC, *Poruchy a chránění elektrizačních sítí: učební texty*, VŠB-TUO, 2017.
- [13] MODES, „Tutorial,“ 2017. [Online]. Dostupné z: <http://modesinfo.com/pgdefault1/def1.asp?lng=cz&logged=false>.
- [14] V. MACH, *Diagnostické metody a modelování na zařízení v elektrárnách: učební texty*, VŠB-TUO, 2016.
- [15] MODES, *GLOBAL.DAT: Příručka programu*.
- [16] O. RYCHLÝ, *Diplomová práce: Verifikační projekty MODES programem EMTP-ATP*, 2015.
- [17] Z. TROJÁNEK, J. HÁJEK a P. KVASNICA, *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách*, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [18] K. NOHÁČ, „Prezentace nástroje MODES,“ 2015. [Online]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/MODES/Tutorial_ZCU.pdf.