

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Rizika obnovy vlastní spotřeby elektrárny po poruše typu
blackout**

**vedoucí práce: doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
autor: Bc. Jiří Pečený.**

2014/15

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří PEČENÝ**
Osobní číslo: **E13N0013K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Rizika obnovy vlastní spotřeby elektrárny po poruše typu blackout**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Zásady pro vypracování:


1. Popište možné způsoby obnovení napájení vlastní spotřeby elektrárny.
2. Posuďte využitelnost simulačních výpočtů elektrických přechodných jevů při startu ze tmy do předem připravené trasy, případně do ostrovního provozu.
3. Pro konkrétní elektrárnu proveďte zvolené simulační výpočty pro start ze tmy pro různé varianty obnovení napájení vlastní spotřeby dané elektrárny.
4. Porovnejte výsledky simulací s provozními plány elektrárny při startu ze tmy a posuďte možná rizika.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. MÜHLBACHER, Jan. Metody řešení přechodných jevů v elektrizačních soustavách I. 1.vydání. Plzeň: ZČU, 2003. 165 s. ISBN 80-7082-087-X.
2. SCHEJBAL, Konstantin; Jiřina MERTLOVÁ. Elektroenergetika II: 1.část. 1.vydání Plzeň: ZČU, 1998. 124 s. ISBN 80-7082-451-42.

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Miloslava Tesařová, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2014
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2015


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Předkládaná diplomová práce se zaměřuje na problematiku identifikaci rizik opětovného výpadku přenosové sítě při najíždění vlastní spotřeby elektrárny po výpadku sítě přetížením. Vzhledem k současnému mnohdy živelnému rozvoji OZE bez odpovídajícího rozvoje přenosových a distribučních sítí značně vzrůstá riziko masivního výpadku energetické sítě. Zároveň s tím je mnohdy problematické vyčlenit část energetické soustavy pro provádění testů a měření přechodových jevů tak, aby bylo možné zpřesnit a ověřit připravené provozní plány jednotlivých elektráren. Určitým rozumným východiskem z této situace je použití počítačové simulace. Pomocí těchto simulací byly v této diplomové práci ověřeny provozní plány pro spuštění elektrárny Orlík tzv. ze tmy.

Klíčová slova

Vlastní spotřeba elektrárny, obnova napájení, blackstart, simulace, přetížení sítě,....

Abstract

This diploma work deals with the risks of recovery of the self-consumption of the power station after a blackout. Given the current development of renewable energy, often without adequate development of transmission and distribution networks, greatly increases the risk of massive power grid failure. At the same time, it is often difficult to allocate a portion of the energy system for testing and measuring processes. A reasonable way get out of this situation is to use computer simulations. This thesis discusses the use of these simulations to validate operational plans to start power plant Orlik "out of darkness".

Key words

Power station self-consumption, restoration of power supply, blackstart, simulation, the network failure by overload, ...

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 4.5.2015

Bc. Jiří Pečený

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc.Ing.Miloslavě Tesařové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Velice si vážím její ochoty a spolupráce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jaromíru Pečenému za pomoc s dotažením práce, speciální poděkování bych též rád věnoval Ing. Petře Daigneault za korekturu dokumentu.

Obsah

OBSAH	9
PŘEDMLUVA	11
SEZNAM SYMBOLŮ	12
1 ÚVOD	14
2 FUNKCE ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY	15
2.1 HISTORICKÝ VÝVOJ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY V ČR	15
2.2 ÚČELOVÁ FUNKCE ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY ČR.....	16
2.3 PROVOZ ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY PŘI MIMOŘÁDNÝCH STAVECH	17
2.4 PŘÍČINY MIMOŘÁDNÝCH SITUACÍ V ES ČR A PREVENCE JEJICH VZNIKU	19
3 MOŽNOSTI OBNOVENÍ VLASTNÍ SPOTŘEBY NA VODNÍ ELEKTRÁRNĚ ORLÍK	22
3.1 HISTORIE VODNÍ ELEKTRÁRNY ORLÍK	23
3.2 VLASTNÍ SPOTŘEBA ELEKTRÁRNY ORLÍK	24
3.2.1 Možnosti napájení vlastní spotřeby vodní elektrárny Orlické	25
3.3 MOŽNOSTI OBNOVENÍ VLASTNÍ SPOTŘEBY ELEKTRÁRNY ORLÍK	26
4 POSOUZENÍ VYUŽITELNOSTI SIMULAČNÍCH VÝPOČTŮ ELEKTRICKÝCH PŘECHODOVÝCH JEVŮ PŘI BLACKSTARTU ELEKTRÁRNY	28
4.1 TEORETICKÝ ROZBOR SIMULAČNÍCH VÝPOČTŮ.....	28
4.2 ANALÝZA KONKRÉTNÍCH SIMULOVANÝCH SITUACÍ MIMOŘÁDNÉHO STAVU ENERGETIZAČNÍ SOUSTAVY.....	36
4.2.1 Cíle simulačních výpočtů	37
4.2.2 Varianty simulovaných situací startu ze tmy na elektrárně Orlické	37
4.3 SHRNUKUTÍ ČTVRTÉ KAPITOLY	39
5 SIMULAČNÍ VÝPOČTY PŘI STARTU ZE TMY ELEKTRÁRNY ORLÍK DO VĚTŠÍHO ODBĚRU ELEKTRICKÉ ENERGIE	39
5.1 VZNIK A TYPY OSTROVNÍHO PROVOZU	40
5.2 OBNOVA PO PORUŠE	42
5.3 ŠTRUČNÁ CHARAKTERISTIKA SIMULAČNÍHO SOFTWARU	42
5.4 IDEALIZOVANÝ MODEL PRO SIMULACI STARTU ZE TMY	43
5.4.1 Kritéria hodnocení simulace vybraných situací.....	44
5.4.2 Popis simulovaného modelu.....	45
5.5 MODEL SE ČTYŘMI SPOTŘEBIČI VS PRO SIMULACI BS	49
5.5.1 Kritéria hodnocení simulace druhé varianty	49
5.5.2 Popis druhého simulovaného modelu	49
5.6 MODEL S ROZBĚHEM VŠECH POHONŮ ECHV	53
5.6.1 Kritéria hodnocení simulace druhé varianty a popis třetího simulovaného modelu.....	53
6 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI PROVOZNÍCH PLÁNŮ ELEKTRÁRNY ORLÍK PŘI STARTU ZE TMY	56
6.1 ŠTRUČNÝ VÝTAH Z PROVOZNÍ INSTRUKCE ČEPS	56
6.1.1 Předpoklady funkčnosti provozních plánů	57
6.1.2 Ověření funkčnosti provozních plánů vzhledem k prvnímu modelu	58
6.1.3 Ověření funkčnosti provozních plánů vzhledem k druhému modelu	58
6.1.4 Ověření funkčnosti provozních plánů vzhledem k třetímu modelu.....	58
6.2 ZHODNOCENÍ.....	59

7 ZÁVĚR	59
POUŽITÁ LITERATURA.....	62

Předmluva

Předkládaná práce je zaměřena na identifikaci vzniku opětovného výpadku přenosové sítě po připojení elektrárny do většího odběru.

Text rozdělují do pěti částí; první se zabývá fungováním elektrorozvodné sítě a mimořádnými stavy v elektrické síti, druhá pojednává o možných způsobech startu ze tmy vodní elektrárny Orlík. Třetí část zvažuje možnosti blackstartu elektrárny Orlík. Čtvrtá část ověřuje pomocí simulačních výpočtů stav při podání výkonu z elektrárny Orlík do elektrárny Chvaletice pro start ze tmy (Black-start). Pátá část porovnává provozní plány elektrárny při startu ze tmy se závěry získanými ze simulací.

Seznam symbolů

ΔU_{max} [V]	Maximální odchylka napětí
U [V]	Napětí
Δf_{max} [Hz]	Maximální odchylka frekvence
Lp [H/km]	Provozní indukčnost
Cp [F/km]	Provozní kapacita
Rp [Ω]	Provozní rezistance
p [-]	Počet pólových dvojic
f [Hz]	Frekvence
m [-]	Počet fází
Φ [Wb]	Magnetický tok
Mp [Nm]	Točivý moment
L_d [H]	Podélná synchronní indukčnost
ω [s^{-1}]	Úhlová rychlost
L_q [H]	Příčná synchronní indukčnost
L_0 [H]	Netočivá synchronní indukčnost
U_g [V]	Výstupní napětí generátoru
$L_{aD}, L_{Da}, L_{aDm}, L_{bD}, L_{Db},$ $L_{bDm}, L_{cD}, L_{Dc}, L_{cDm}$ [H]	Indukčnosti statoru synchronního stroje vzhledem k tlumiči v ose d
$L_{af}, L_{fa}, L_{afm}, L_{bf}, L_{fb},$ $L_{bfm}, L_{cD}, L_{Dc}, L_{cDm}$ [H]	Indukčnosti statoru synchronního stroje vzhledem k buzení
$L_{aQ}, L_{Qa}, L_{aQm}, L_{bQ}, L_{Qb},$ $L_{bQm}, L_{cQ}, L_{Qc}, L_{cQm}$ [H]	Indukčnosti statoru vzhledem k tlumiči v ose q
L_{ba}, L_{ca}, L_{ab} [H]	Indukčnosti statoru synchronního stroje vzájemné
$L_{bc}, L_{ab0}, L_2, L_{bb}, L_{a0}, L_{cc}$ [H]	Indukčnosti statoru synchronního stroje vlastní
Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c [Wb]	Spřažený tok statorového vinutí asynchronního motoru
Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c [Wb]	Spřažený tok rotorového vinutí asynchronního motoru
L_{aa}, L_{bb}, L_{cc} [H]	Vlastní indukčnosti statoru asynchronního motoru
L_{ab}, L_{ac}, L_{bc} [H]	Vzájemné indukčnosti statoru asynchronního motoru
L_{AA}, L_{BB}, L_{CC} [H]	Vlastní indukčnost rotoru asynchronního motoru
L_{AB}, L_{AC}, L_{BC} [H]	Vzájemné indukčnosti rotoru asynchronního motoru

9 [-]

Úhel natočení rotoru vůči statoru asynchronního motoru

1 Úvod

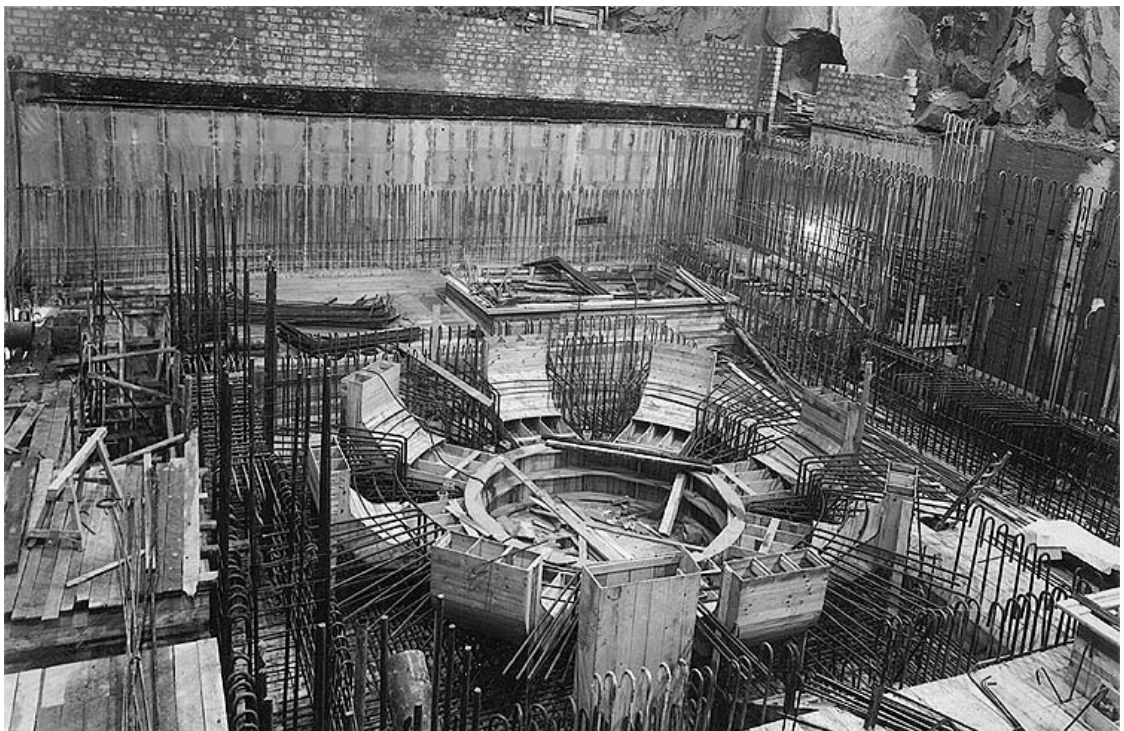
V následujícím textu budu krátce pojednávat o rizicích vznikajících při najíždění vlastní spotřeby elektrárny po totálním výpadku přenosové sítě (blackout) a konkrétně uvedu současné možnosti obnovy vlastní spotřeby na vodní elektrárně Orlík. V poslední třetině textu se zabývám riziky opětovného výpadku energetické sítě při startu elektrárny Orlík ze tmy do většího odběru elektrické energie. V případě rozpadu elektrizační sítě, poskytuje vodní elektrárna Orlík systémovou podpůrnou službu pro obnovení vlastní spotřeby větších elektrárenských bloků.

Hlavním cílem mé diplomové práce je pomocí počítačových simulací startu vodní elektrárny Orlík do velkého odběru energie ověřit připravené provozní plány provozovatele přenosové soustavy. V současné době hledání řešení těchto problémů nabývá na významu vzhledem ke zvyšující se možnosti výpadku elektrizační soustavy na velkém území. Dnes populární výstavba obnovitelných zdrojů elektrické energie, bez příslušného rozvoje elektrických sítí, může za určitých okolností velmi zvyšovat rizika kolapsu ES. Simulační výpočty mohou sloužit nejenom k ověřování provozních plánů, ale i pro jejich zpřesnění. Provádění zkoušek najetí ze tmy za běžného provozu není prakticky možné, v diplomové práci jsem se pokusil ukázat příklady výpočtů blackstartu, které mohou pomoci odhalit rizika případného testování blackstartu vodní elektrárny.

2 Funkce elektrizační soustavy

2.1 Historický vývoj elektrizační soustavy v ČR

Začátek dvacátého století přinesl masivní rozvoj elektrifikace na území Československé republiky. Elektrická energie se stává veřejným zájmem. Tím je nastartován masivní rozvoj elektrizační soustavy na území republiky. V roce 1955 i za pomoci centrálního plánování tehdejšího socialistického zřízení republiky dosáhne státní energetika plné elektrifikace území. Vlivem velké neefektivnosti spotřeby elektrické energie zejména v průmyslu a stavebnictví rostla spotřeba rychleji než výkon elektráren. I přes horší plnění parametrů kvality dodávek elektrické energie se podařilo zvýšit výkony tehdejších elektráren téměř dvojnásobně. Zároveň byly spuštěny první elektrárenské bloky o výkonech větších než 100 MW (např. blok elektrárny Tisová o výkonu 110MW v roce 1960 [25]). Rozvíjely se taktéž přeshraniční dodávky elektřiny s okolními státy. Podařilo se též vystavět vltavskou vodní kaskádu elektráren, která slouží k dodávkám elektrické energie dodnes. Velkým úspěchem energetiky se stává uvedení do provozu prvního jaderného bloku v Dukovanech v roce 1985.



Obr.2.0. Historické foto stavby vodní elektrárny Lipno převzato z [22]

Současně s budováním elektráren došlo i k výstavbě na tehdejší dobu velmi moderních přenosových a distribučních sítí. Velká část těchto soustav je dodnes v provozu a přispívá

k velké stabilitě a odolnosti naší přenosové soustavy proti velkým výpadkům. Významným mezníkem pro českou energetiku byl rok 1997, kdy byla trvale připojena k UCTE [25].

2.2 Účelová funkce elektrizační soustavy ČR

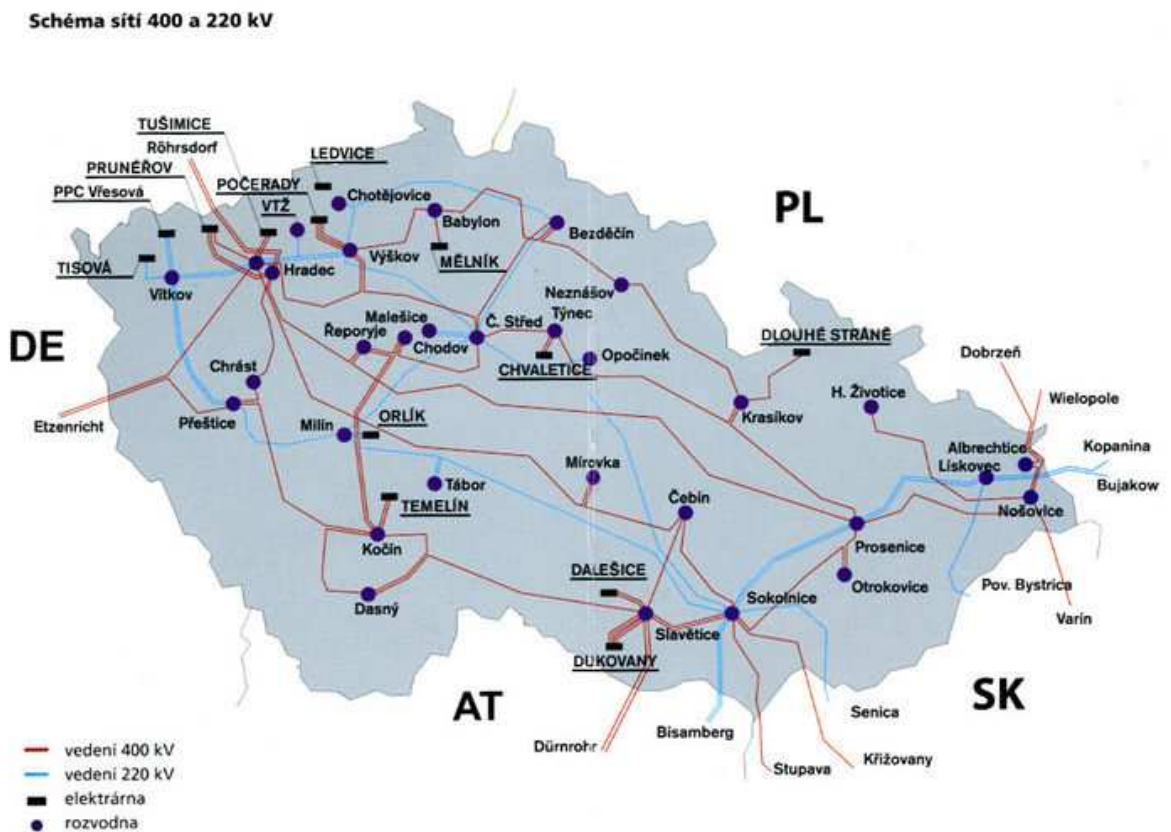
Vzájemně propojený systém zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny nazýváme elektrizační soustavou. Dále elektrizační soustava obsahuje prvky měřicí, ochranné, zabezpečovací, sdělovací a telekomunikační. Elektrizační soustavu obvykle členíme na výrobu, přenosovou a distribuční soustavu. Mezi hlavní požadavky kladené na elektrizační soustavu patří zejména výroba elektrické energie a udržování její kvality při normálním provozu. Neméně významnou funkci, zabezpečovanou elektrizační soustavou je přenos regulační energie pro vyrovnání bilančních odchylek mezi dodavatelským a spotřebitelským systémem. Dále musí být zabezpečen provoz soustavy i při mimořádných stavech s cílem navrácení soustavy do normální situace. Elektrizační soustava kromě výrobních jednotek, přenosových a distribučních vedení obsahuje ještě elektrické stanice. Elektrické stanice rozvádějí energii do distribučních a spotřebitelských soustav a optimalizují rozložení výkonů na celé oblasti z hlediska nákladů na výrobu a přenos. Elektrické sítě bývají konstruovány s různými topologiemi a různými napěťovými úrovněmi.

Topologii a napěťovou hladinu přenosové a rozvodné sítě řeší technicko-ekonomická rozvaha, přičemž důležitými mezníky při rozhodování bývá vzdálenost a velikost přenášeného výkonu a s tím spojené i určité ztráty. Neméně podstatným parametrem pro výběr topologie či napěťové hladiny bývá spolehlivost dodávky elektrické energie. [15]

V současnosti provozovanou elektrizační soustavu ČR tvoří 41 rozvodných zařízení 400 kV a 220 kV včetně 71 transformátorů. Dále 3510 km tras vedení 400 kV a 1 909 km tras vedení 220 kV. Nadřazená soustava ČR dále zahrnuje i 84 km tras vedení 110 kV a též i dvě rozvodná zařízení 110 kV. Celkový instalovaný výkon transformátorů je 20 380 MVA a celkový výkon kompenzačních tlumivek 1 365 MVar (stav k 1. 1. 2015) [11].

Obvykle elektrické sítě dělíme podle účelu na sítě nadřazené (nadřazené ostatním z hlediska skladby nebo provozu), převážně VVN na napěťových hladinách 110 kV, 220 kV, 400 kV, dále na sítě distribuční VVN 100kV a VN 35 kV, 22 kV a sítě místní NN. Z hlediska uspořádání zapojení lze sítě rozdělit na sítě otevřené (dodávají energii do místa spotřeby vždy jednou cestou) a uzavřené (dodávají energii z několika stran). Mezi sítě otevřené typicky patří sítě paprskové a jako příklad uzavřené sítě lze uvést síť okružní či mřížovou. Z hlediska začlenění do energetické soustavy rozlišujeme sítě přenosové a distribuční.

Obr.2.1 zobrazuje celkovou mapu energetické soustavy České republiky.



Obr.2.1 Elektrizáční soustava ČR převzato z [11]

2.3 Provoz elektrizační soustavy při mimořádných stavech

Provozovatel přenosové soustavy zodpovídá za řízení elektrizační soustavy, kdy udržuje pomocí svého dispečinku trvale vyrovnanou výkonovou bilanci a sleduje kvalitativní parametry elektrické energie. Dispečerské řízení provozu přenosové soustavy reaguje na situace, které nastávají v ES.

Za normálního provozu se provádí udržování kvality elektrické energie. Jinak řečeno, je-li splněno kritérium N-1, provozovatel energetické soustavy v tomto stavu pouze monitoruje plnění kvalitativních parametrů. Dodavatelé i odběratelé plní sjednané diagramy. Dispečink udržuje dostatečnou regulační energii pro vyrovnávání kvalitativních parametrů (napětí a frekvence). To znamená upravovat souhrnnou výkonovou zálohu tak, aby byla dostatečná pro primární regulaci frekvence, dále též udržování výkonové zálohy pro sekundární regulaci frekvence a výkonu.

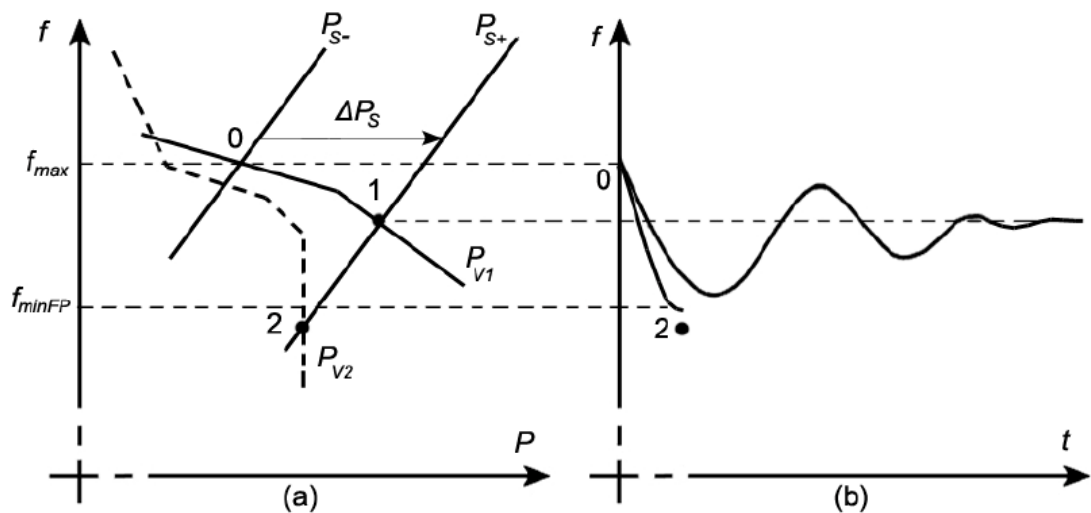
Výstražným stavem nazýváme stav soustavy, kdy se parametry soustavy dostávají mimo oblast tolerance. Provozovatel přenosové soustavy přijímá opatření provozního charakteru s úkolem obnovit normální provoz. Nástroji provozního charakteru jsou sekundární regulace f a P, terciální regulace výkonu a nasazení dispečerských záloh. Tyto zálohy slouží k vyrovnání výkonové nerovnováhy a nasazují se, pokud subjekty zúčtování odchylek nejsou déle než dvě hodiny schopny dodržet plánované odběrové diagramy. Tento výkonový deficit vzniká výpadkem zdrojů či větším odebíraným výkonem.

Dalším mimořádným stavem v elektrizační soustavě nazýváme stav nouze, který vyhláší dispečink ES ČR v případech, kdy dochází z různých důvodů k ohrožení zásobování elektrickou energií. Důsledky tohoto stavu nouze elektrizační soustavy se obvykle promítají do běžného života všech skupin uživatelů elektrizační soustavy, včetně domácností.[2] Provozovatel přenosové soustavy musí v rámci své zodpovědnosti použít speciální postupy pro vrácení soustavy zpět do normálního stavu. Tyto postupy se nazývají frekvenční plán, vypínací plán a plán ostrovních provozů. Frekvenční plán slouží k návratu do jmenovitých hodnot. Vypínací plán omezuje spotřebu, včetně omezení mezinárodních odběrů i dodávek. Schopnost soustavy pracovat i v mimolimitních stavech uvádí plán ostrovního provozu.

Při poklesu frekvence pod nepřijatelné hodnoty pro jednotlivé typy elektráren nastává narušení účelové funkce ES (limitní hodnoty frekvencí zobrazuje obr. 2.1.0). Tento rozpad soustavy nebo též frekvenční kolaps lze definovat na základě statických charakteristik zdrojů a spotřeby [23]. Pro návrat soustavy zpět do normálního stavu má provozovatel přenosové soustavy k dispozici plán obnovy a plány pro start ze tmy.

Typ elektrárny Provoz	Uhelné	JE		VE	PVE		Paro- plynové	OZE
		EDU	ETE		turbína	čerpání		
Normální zbez 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	<u>49-51</u>
Časové omezen	46-48.5 50.5-53	47.5-48.5 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(53)	48-48.5 51.5-52	<u>47.5-49</u> <u>51.-51.5</u>
Nepřijatelný	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 > 52(53) f < 49	f > 52 f < 48	<u>f > 51.5</u> <u>f < 47.5</u>
Automatické odpojení od ES	f > 53 f < 47.5	f > 52.5 f < 47.9	f > 51.5 f < 47.9	f > 50.2(51.5) f < 47.5	f > 50.2(51.5) f < 47.5	f > 52(53) f < 49.8-49.2	f > 52 f < 48	<u>f > 51.5</u> <u>f < 47.5</u>

Obr. 2.1.0 Limitní frekvence ES ČR převzato z [26]



Obr.2.1.1 Příklad statických charakteristik zdrojů a spotřeby převzato z [11]

S tím souvisí zajímavá množina problémů, reprezentující rizika opětovného rozpadu přenosové sítě při rozběhu velkých pohonů. Přechodové elektromagnetické jevy vznikající zvláště při startech velkých motorů mohou zapříčinit spuštění frekvenčních nebo napěťových ochran a tím vznik opětovného kolapsu ES. Takovéto motory obvykle obsahují pohony ve vlastních spotřebách ze tmy startujících elektráren. Řešíme tedy problém, zda vyčleněná část elektrizační soustavy zvládne při najíždění velkých asynchronních motorů ve vlastních spotřebách velké změny činných a jalových výkonů.

2.4 Příčiny mimořádných situací v ES ČR a prevence jejich vzniku

Elektrizační soustava není statickým systémem, okamžité hodnoty provozních parametrů ovlivňuje momentální stav systému, ale též závisejí na řízení v reálném čase. O elektrizační soustavě musíme uvažovat jako o dynamickém systému [26]. V normálním provozu v každém časovém okamžiku platí : $P_{\max} \geq P_{z\max} + P_r + P_{ztr}$,

kde

P_{\max} maximální (disponibilní) výkon zdrojů [MW],

$P_{z\max}$ maximální požadované zatížení [MW],

P_rzáložní výkon [MW],

P_{ztr}ztráty [MW]

Při porušení této rovnice nastane změna napětí nebo frekvence a takto vzniklý přechodový jev trvá až do nastavení nové výkonové rovnováhy. Pokud však některý z provozních parametrů bude růst nade všechny meze, dojde k mimořádnému stavu v ES. Obecně se příčiny vzniku mimořádných situací zpětně zkoumají, zejména, jedná-li se o velké totální rozpady soustav.

Jako příklad může posloužit situace z listopadu roku 2006: - v Severním moři hodně fouká a tamní větrné elektrárny dodávají do sítě společnosti obrovské množství elektřiny pro zákazníky na jihu země, zároveň se německá energetická společnost připravuje na rutinní vypnutí vedení VN. K vypnutí vedení dochází v 21:30, ve 22.05 narůstá v oblasti napětí. Energetici se nekoordinovaně pokoušejí přesměrovat toky proudu, což se ale nedaří. Jako první automaticky vypíná rozvodna Wehrendorf. Energie se poté převádí na jiné trasy a dochází k dalším automatickým odstávkám. Za 28 sekund se výpadek šíří celou Evropou. [27]

Příklady největších black-outů ve světě

Blackout	Postiženo (mil. obyvatel)	Kde	Kdy
2005 Javi Bali blackout	100	Java-Bali / Indonesie	8.8.2005
1999 Southern Brazil blackout	97	Jižní a jihovýchodní část Brazílie	11.3.1999
2009 Brazil and Paraguay blackout	87	Centrální, jižní a jihovýchodní část Brazílie a celá Paraguay	10-1.11.2009
2003 Northeast blackout	55	Severovýchodní část severní Ameriky	14-15.8.2003
2003 Italy blackout	55	Celá Itálie kromě Sardinie	28.9.2003
1965 Northeast blackout	30	Severovýchodní část severní Ameriky	9.11.1965
2003 Londýn	0,5	Velká Británie	28.8.2003
2003 Dánsko a jižní Švédsko	5	Evropa	23. 9. 2003

2003 Itálie	56	Evropa	28. 9. 2003
2005 Moskva	10	Evropa	24. 5. 2005

V současné době není k dispozici matematický či fyzikální model elektrizační soustavy, pomocí něhož by bylo možné predikovat rozpad soustavy [26]. Velké black-outy se naštěstí vyskytují jen zřídkakdy. Zobecnění je proto obtížné, navíc každá mimořádná událost charakteru velkého black-outu má odlišné příčiny, jiný spouštěcí mechanismus, průběh, atd.

Na základě analýz příčin několika evropských a amerických největších black-outů se přesto podařilo zjistit několik zásadních příčin vzniku. Spolehlivost elektrizační soustavy se koncipuje tak, aby vyřazení jednoho prvku nevedlo k přetížení ostatních, ale nikoliv pro vícenásobný sled jednotlivých poruch. Velmi často black-out, vznikal postupným sledem málo pravděpodobných poruch nebo výpadků či změn zatížení. [26]

Přírodní podmínky a velikost zatížení namáhající přenosovou síť, také často způsobují její kolaps. Samozřejmě rychlost reakce dispečinku jednotlivých provozovatelů elektrizačních soustav také významně ovlivňuje průběh mimořádného stavu v ES.

V některých případech se kvalitní prací dispečinku podařilo odvrátit kolaps ES. To lze dokumentovat příkladem z nedávné doby. Na přelomu roku 2014/15 se PS ČR musela opakovaně vyrovnávat s přetoky elektřiny vyrobené v oblasti severu Německa ve větrných elektrárnách. Vlivem dlouhotrvající bouře s neustálým vichrem, produkce elektřiny z větrných elektráren v Německu dosahovala hodnoty více než 30 GW. Vlivem nedostatečné kapacity německých přenosových vedení v severojižním směru přecházela téměř polovina přebytku výroby přes PS ČR a Polska. Dispečink české přenosové soustavy proto musel reagovat přijetím nápravných opatření. Došlo k rekonfiguraci několika rozvodů a odstávce výkonově nákladnějších zdrojů. Tato zodpovědná a dobrá rozhodnutí spolu s maximálním úsilím dispečinku ČEPS zabránila kolapsu ES ČR. Ovšem nepříjemným doprovodným efektem byly celkové náklady na vícestranná a bilaterální nápravná opatření v předběžné výši 60 mil Kč.[28]

Úplně odstranit riziko vzniku rozsáhlého výpadku není z technických ani ekonomických důvodů možné, pomocí preventivních opatření lze částečně snížit pravděpodobnost vzniku velkého black-outu.

Základním preventivním prostředkem jsou správně nastavené, odzkoušené obranné plány. Vhodně provedené účelné investice jak do přenosu, tak do výroby elektřiny s dlouhodobým dopadem včetně úprav v systému, dokáží významně snížit riziko black-outu. Předpokladem dobře provedených investic jsou detailní systémové studie včetně výpočtů stability a z nich vyplývajících příslušných závěrů. [26] Asociace evropských přenosových sítí ENTSO-E ve

svém posledním desetiletém plánu rozvoje (TYNDP) z roku 2012 identifikovala potřebu výrazných investic do přenosových soustav na kontinentu ve výši 104 miliard eur, aby zmizela úzká hrdla představující nestabilitu systému a riziko blackoutu. [27]

Pravidelná kontrola a údržba vedení spočívající v dodržování bezpečných vzdáleností vegetace od vedení také snižuje riziko vzniku rozpadu ES. Protože větší oteplení vodičů znamená zvětšení průhybu lan vedení a tím nárůst rizika přeskoků napětí na okolní vegetaci.

Instalace transformátorů s příčnou regulací fáze (tzv. phase shifting transformers - PST) realizovaná zejména v blízkosti hranic by mohla v budoucnu výrazně snížit riziko black-outu. Tyto transformátory by totiž efektivně přesměrovaly elektřinu zejména z německých obnovitelných zdrojů. [3] A vzhledem ke skutečnosti, že v sousedních státech již spouštění PST proběhlo, vzniká časový tlak na zahájení výstavby i na české straně.

Systém WAMS na základě synchronizovaného měření fázorů umožňuje provést včasné preventivní opatření pro lokalizaci, izolaci a likvidaci poruch ve všech soustavách a na všech napěťových hladinách. Systém WAMS tak rozšíří možnost detekovat dynamicky nestabilní stav ES a včas přijmout nezbytná opatření. [24]

Systém HDVC neboli využití stejnosměrných spojek, kdy jedna invertorová stanice pracuje jako usměřovač a druhá jako střídač. Pomocí této tyristorové technologie lze přizpůsobit parametry druhé střídavé soustavy. Její výhoda mimo jiné spočívá v rychlé a plynulé regulaci. Nevýhodu tohoto řešení představují značné počáteční investice.

Větší současné možnosti výpočetní techniky otevírají další cesty k simulačním výpočtům. Pomocí těchto výpočtů lze lépe identifikovat slabá místa v soustavách a tím zvýšit odolnost systému. Navíc současný vývoj výpočetní techniky umožňuje sestavit dynamické modely, které mnohem lépe představují elektrizační soustavy.

3 Možnosti obnovení vlastní spotřeby na vodní elektrárně Orlick

Pro účely této diplomové práce uvádím dále možnosti obnovy vlastní spotřeby na vodní elektrárně Orlick. Důvodů pro volbu této elektrárny bylo několik. Z hlediska energetické soustavy ČR je vodní elektrárna Orlick elektrárnou dodávající potřebný příkon pro black-start elektrárny Chvaletice. Dalším podstatným důvodem je schopnost elektrárny Orlick účinně se podílet na řešení situací vzniklých po rozpadu elektrizační soustavy. Elektrárna Orlick poskytuje podpůrné služby provozovateli ES ČR, včetně systémové služby start ze tmy. V neposlední řadě mě k výběru vede geografická blízkost a ochota pracovníků elektrárny poskytnout mi potřebné informace.

3.1 Historie vodní elektrárny Orlík

Z hlediska ČR sice nejsou přírodní poměry pro výstavbu velkých vodních energetických staveb úplně nejpříznivější, ale pro energetický mix ČR mají velký význam. Podle metodiky EU se přečerpávací vodní elektrárny a malé vodní elektrárny s instalovaným výkonem nad 10 MW nezahrnují mezi OZE. Ale mají svůj nezanedbatelný význam z hlediska životního prostředí.

První projekční a technické práce vodního díla Orlík byly zahájeny již v roce 1946. Ale až v prosinci roku 1955 byl vládou schválen projekt na stavbu vodního díla Orlík. Vlastní stavba započala v roce 1957, když necelé dva roky před započítáním výstavby byl projekt schválen vládou. Vodní dílo se dostavělo mezi roky 1954–61. Dne 29. září 1960 bylo zahájeno napouštění vodní nádrže. V dubnu roku 1961 úspěšně proběhl zkušební provoz elektrárny.[19]

Vodní elektrárna Orlík se nachází v levé části řeky v patě betonové hráze. Přehrada, která zadržuje 720 mil. m³ vody, se řadí mezi nejobjemnější akumulární nádrže v České republice. Zároveň tvoří stěžejní článek vltavské kaskády.

Vodní elektrárna Orlík má ve strojovně instalována čtyři soustrojí s Kaplanovou turbínou (8-K-70, 96 MW). Každá z turbín obsahuje osm lopatek. Turbína je přímo spojená se synchronním hydroalternátorem. Elektrárna umožňuje pouze turbínový provoz, kdy její vzduchem chlazené generátory o parametrech (91 MW/ 100 MVA, 15 kV), vyrobí okolo 490 GWh za rok.[11]

Budicí vinutí alternátoru napájí rotační budič řízený číslicovým regulátorem. Lopatky rozvodného i oběžného kola lze natáčet a tím regulovat výkon i otáčky generátoru. Tato regulace funguje i při paralelním provozu s energetickou sítí. Pro řízení zmíněných soustrojí a dalších zařízení má elektrárna osazen distribuovaný systém kontroly a řízení.

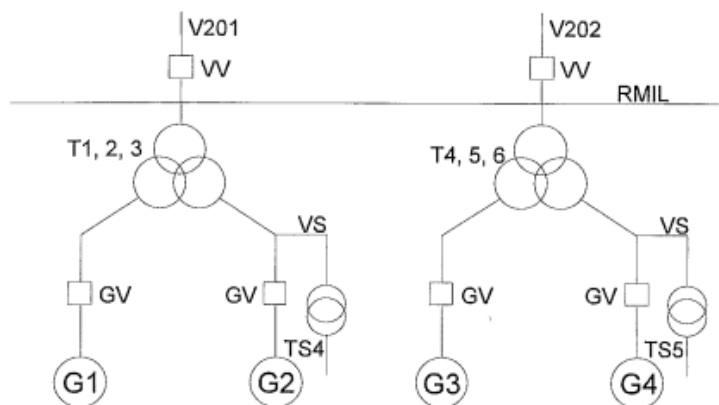
Generátory jsou seskupeny do dvojic, ke každé dvojici generátorů přísluší společný blokový transformátor (viz obr.3.2., kdy T_{1,2,3} transformuje výkon turbogenerátorů TG1 a TG2). Každou z dvojice blokových transformátorů tvoří tři jednofázové jednotky. Olejem chlazené blokové transformátory se nacházejí u paty hráze na betonové desce přímo nad vývaňištem turbín (viz obr. 3.0). Vyrobena elektrická energie se odvádí přes dvě venkovní linky 220 kV do rozvodny Milín, kde jsou umístěny i vypínače linek. Z rozvodny 12 kV umístěné uvnitř elektrárny Orlík odchází čtyři 10,5 kV kabely, dvou vývodů Milín 1 a Milín 2 a dvou vývodů Kamýk1 a Kamýk 2 (viz obr. 3.2).



Obr. 3.0. Blokové transformátory elektrárny Orlík

Dnes se vodní elektrárna Orlík řadí mezi plně automaticky řízené elektrárny vyžadující za běžného provozu pouze občasný dohled. Elektrárnu dálkově ovládá dispečink vodních elektráren ve Štěchovicích.

V současné době probíhají projektové studie o přestavbě části vodní elektrárny na přečerpávací. Při zachovaném instalovaném výkonu, by dvě přestavěná soustrojí dokázala fungovat i v reverzním režimu.



Obr.3.1. Zjednodušené schéma vyvedení výkonu EOR

3.2 Vlastní spotřeba elektrárny Orlík

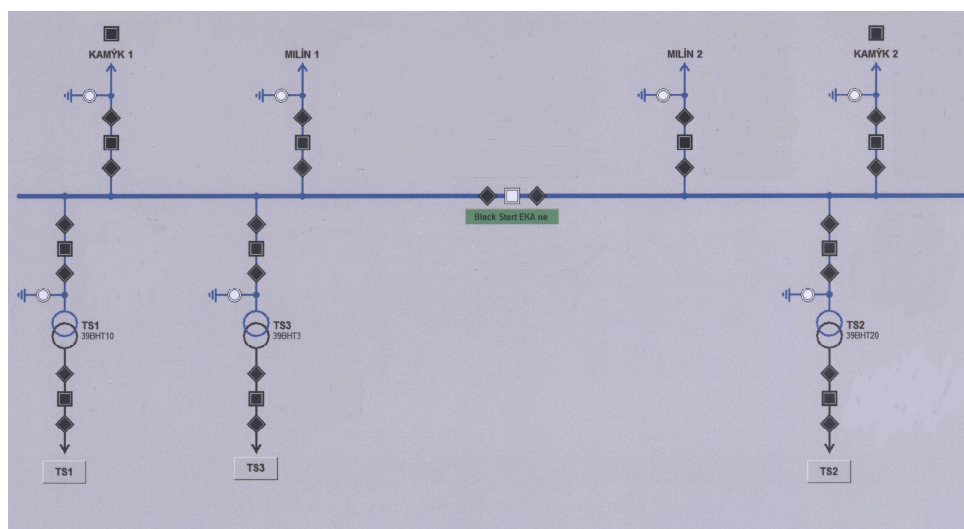
Vlastní spotřeba elektrárny musí kromě běžného provozu též zajistit spolehlivé a bezpečné spuštění elektrárny. Technologie uvažované elektrárny velmi silně ovlivňuje vlastní

energetickou spotřebu elektrárny. Obecně se uvádí, že vlastní spotřeba se u vodních elektráren pohybuje okolo 1%. Matematicky můžeme definovat vlastní spotřebu elektrárny například takto: Od hrubé výroby elektrárny A_{cv} odečteme vlastní spotřebu elektrárny A_{vs} a získáme čistou výrobu elektřiny. Častěji se vyjadřuje koeficientem vlastní spotřeby $k_{vs} = (A_{vs}/A_{cv}) \cdot 100[\%]$. [4] K nejvýznamnějším spotřebičům ve vlastních spotřebách vodních elektráren se řadí čerpací agregáty pro výrobu tlakového oleje, čerpací agregáty regulace, technologické pohony, osvětlení, apod. [6]

V případě elektrárny Orlík patří k největším spotřebičům VS pohony olejových čerpadel, dále pohony čerpadel zajišťujících odsávání vody pronikající do prostoru víka jednotlivých turbín a rovněž tak budící systémy alternátorů.

3.2.1 Možnosti napájení vlastní spotřeby vodní elektrárny Orlík

Technologie vodní elektrárny Orlík není schopna bez vnější dodávky elektrické energie vlastního rozběhu. Prioritně napájí vlastní spotřebu vodní elektrárny Orlík vodní elektrárna Kamýk nad Vltavou vysokonapěťovými kabely 10 kV. Při vhodné manipulaci lze k napájení VS též využít venkovní vedení z rozvodny Milín. Do této elektrické rozvodny dodává standardně za generátorového provozu vodní elektrárna Orlík výkon. Do rozvodny uvnitř elektrárny Orlík je přivedeno nejenom VN vedení z elektrárny Kamýk nad Vltavou, ale i kabelové vedení z rozvodny Milín. Tato vedení zde napájí, tři staniční transformátory.



Obr.3.2. Situační schéma vodní elektrárny Orlík

Elektrárnu Orlík lze též zpětně napájet z linek 220 kV přes staniční jednofázový transformátor 220 kV/15 kV. Sekundární vývod tohoto transformátoru je možné zapojit na další

dva distribuční transformátory 15 kV/400 V. Tyto zmiňované distribuční transformátory slouží výhradně pro napájení buzení generátorů a pomocných pohonů pro rozběh generátorů.



Obr.3.3 Dieselažregát vodní elektrárny Orlík

3.3 Možnosti obnovení vlastní spotřeby elektrárny Orlík

Při popisu možností obnovy vlastní spotřeby elektrárny Orlík, vycházím z kodexu PS. Z těchto důvodů musím nejprve uvést několik pojmů a jejich definice.

Black-out elektrárny Orlík nazýváme mimořádný stav ES, při kterém dojde ke ztrátě napětí na vedeních 220 kV, které jsou majetkem ČEPS, ale zároveň musí nastat ztráta napětí na kabelových vedeních 10 kV Milín1, Milín2 a Kamýk1 a Kamýk2. Vlastní spotřebu elektrárny během normálního provozu zajišťují vedení 10 kV nebo vedení 220 kV.

Při ztrátě tohoto napětí dodává napětí dieselažregát, ovšem pouze pro napájení stanovených částí vlastní spotřeby elektrárny, nikoliv však pro vlastní spotřebu výrobních soustrojí. Zmíněný dieselažregát s výkonem 330 kW, není určen k najíždění hydrogenerátoru, ale k dodávce energie pro čerpadla odsávající vodu a olej prosakující přes ucpávky do prostoru vík turbín.[25]. Zmíněný dieselažregát uvádí obr.3.3.

UPS systém s kapacitou 400 Ah, kterým je elektrárna Orlík také vybavena, slouží k nouzovému napájení ochran, řídicího systému a dále k zajištění bezpečnosti v případě výpadku elektrické energie.

Ta může být po úplném výpadku napájení zabezpečena pouze z elektrárny Kamýk ruční manipulací obsluhy. Black-out elektrárny Kamýk nazýváme mimořádný stav, při kterém dojde ke ztrátě napětí na vedeních 110 kV a kabelových vedeních 10 kV Orlík1 a Orlík2. Obnova VS elektrárny Kamýk probíhá samočinně, pomocí automatických vypínačů na vedení 10 kV nebo 110 kV. V případě výpadku vlastní spotřeby trvající déle než dvě minuty dochází ke startu diesselagregátu EKA a napájení vlastní spotřeby tímto zdrojem.

Pokud nastane zároveň black-out elektrárny Orlík i elektrárny Kamýk, dispečer energetické soustavy vyhlašuje black-out energetické soustavy.

Podpůrná systémová služba poskytovaná provozovateli přenosové soustavy za účelem zajištění spolehlivého provozu elektrizační soustavy České republiky zavazuje divizi vodních elektráren k dodávce výkonu z EOR do rozvodny Milín max. 30 minut od požadavku dispečera ČEPS. Z tohoto důvodu musí elektrárna Kamýk při black startu podat výkon k obnově VS elektrárny Orlík zhruba do 15 minut od povelu dispečera ČEPS.



Obr. 3.4 Transformátor vlastní spotřeby EOR

4 Posouzení využitelnosti simulačních výpočtů elektrických přechodových jevů při blackstartu elektrárny

4.1 Teoretický rozbor simulačních výpočtů

Simulační výpočty využíváme pro plánování výroby elektrické energie a provozu energetické sítě. V případech ustálených stavů se tyto výpočty stávají nezbytnými prostředky, bez kterých se nelze obejít. Současná dynamika provozu sítě však přináší vzhledem k narůstajícímu množství změn v elektrizační soustavě i potřebu výpočtů přechodných jevů [13]. Při sestavování modelu elektrizační soustavy zavádíme obvykle určité zjednodušující předpoklady. V našem případě nepočítáme s velmi rychlými „vlnovými“ přechodnými ději v soustavě. Odchytky frekvence sítě, jakož i frekvence generátorů od jmenovitých 50 Hz předpokládáme jen velmi nepatrné. Zanedbáváme vliv sycení, tj. nelinearit u indukčností a rovněž zanedbáváme vliv síťových indukčností.

Přes velké možnosti současné výpočetní techniky musí být vytvářen pro každý případ konkrétní fyzikální model. Důvodů, proč není možné vytvořit univerzální model, lze uvést hned několik. Příkladem může být klasický asynchronní motor, pro jehož modelování nelze sestavit univerzální model. Při sestavení univerzálního modelu AM bychom museli obsáhnout výpočty přechodných dějů motorů s vinutou kotvou, s kotvou nakrátko, asynchronní motor jednofázový i vícefázový případně i speciální varianty motorů (např. s vírovou kotvou, Boucherotovou kotvou apod.). Modelování by samozřejmě muselo postihnout všechny způsoby zapojení, uvažovat případné rozběhové rezistory, kondenzátory atd. Takový model by obsahoval velké množství nelineárních diferenciálních rovnic a z tohoto předpokladu lze oprávněně usuzovat na nestabilitu výsledného numerického řešení.

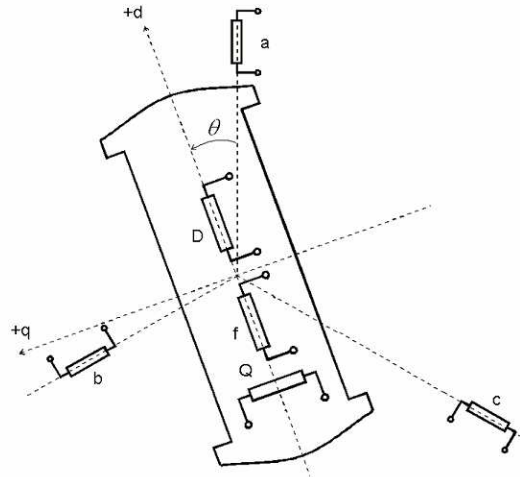
Na tomto místě bych se rád věnoval rozboru jednotlivých modelovaných prvků ES.

Nejdůležitějším modelovaným prvkem elektrizační soustavy je **generátor**. Přechodné děje v jeho obvodech totiž velkou měrou přispívají k dynamickým jevům v elektrizační soustavě na napěťových hladinách VN a VVN.

Pro účely modelování uvažujeme úplný matematický model synchronního stroje se třemi statorovými vinutími, jedním budícím vinutím a dvěma tlumícími vinutími.

Při modelování synchronního generátoru výhodně využijeme Parkovu transformaci. Výhoda spočívá ve zjednodušení matematického modelu, kdy elektrické parametry obvodu (zejména vzájemné indukčnosti) nejsou po transformaci funkcí času.

Parkova transformace převádí veličiny do otáčejícího se souřadného systému (systém 0,d,q). Veličiny po Parkově transformaci se jeví jako stojící.



Obr. 4.3 Synchronní stroj převzato z[16]

Pro sestavení základních rovnic využíváme uspořádání vinutí synchronního stroje podle obrázku 4.3. Stator stroje obsahuje tři vinutí a,b,c, rotor zahrnuje budící vinutí f a tlumící vinutí D, Q v podélné a příčné ose [1].

Momentová rovnice stroje:

$$Pi = J \frac{d\omega}{dt} + Mp \quad (4.2)$$

Pro zjednodušení lze statorové vinutí předpokládat souměrné, tedy platí:

$$R_c = R_b = R_a$$

vyjádříme indukčnosti statoru vzhledem k tlumiči v ose d:

$$L_{aD} = L_{Da} = L_{aDm} \cos \Theta \quad (4.3)$$

$$L_{bD} = L_{Db} = L_{bDm} \cos (\Theta - 2/3\pi) \quad (4.4)$$

$$L_{cD} = L_{Dc} = L_{cDm} \cos (\Theta + 2/3\pi) \quad (4.5)$$

dále indukčnosti statoru vzhledem k buzení:

$$L_{af} = L_{fa} = L_{afm} \cos \Theta \quad (4.6)$$

$$L_{bf} = L_{fb} = L_{bfm} \cos (\Theta - 2/3\pi) \quad (4.7)$$

$$L_{cf} = L_{fc} = L_{cfm} \cos (\Theta + 2/3\pi) \quad (4.8)$$

dále indukčnosti statoru vzhledem k tlumiči v ose q:

$$L_{aQ} = L_{Qa} = L_{aQm} \cos (\Theta + 1/2\pi) \quad (4.9)$$

$$L_{bQ} = L_{Qb} = L_{bQm} \cos (\Theta - 1/2\pi + 2/3\pi) \quad (4.10)$$

$$L_{cQ} = L_{Qc} = L_{cQm} \cos(\Theta + 1/2 \pi + 2/3 \pi) \quad (4.11)$$

indukčnosti statoru vlastní

$$L_{bc} = -L_{ab0} + L_2 \cos(2\Theta) \quad (4.12)$$

$$L_{bb} = L_{a0} + L_2 \cos[2(\Theta - 2/3 \pi)] \quad (4.13)$$

$$L_{cc} = L_{a0} + L_2 \cos[2(\Theta + 2/3 \pi)] \quad (4.14)$$

indukčnosti statoru vzájemné

$$L_{ba} = -L_{a0} + L_2 \cos(2\Theta) \quad (4.15)$$

$$L_{ca} = -L_{a0} + L_2 \cos[2(\Theta + 2/3 \pi)] \quad (4.16)$$

$$L_{ab} = -L_{a0} + L_2 \cos[2(\Theta + 2/3 \pi)] \quad (4.17)$$

Uvažujeme-li inerciální soustavu spojenou s rotorem

$$[P] = \begin{bmatrix} \cos \Theta & \frac{2}{3} \cos(\Theta - 2/3 \pi) & \frac{2}{3} \cos(\Theta + 2/3 \pi) \\ \sin \Theta & \sin(\Theta - 2/3 \pi) & \sin(\Theta + 2/3 \pi) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$[u_{d,q,0}] = [P][u_{a,b,c}] \quad (4.19)$$

$$[i_{d,q,0}] = [P][i_{a,b,c}] \quad (4.20)$$

$$[\Psi_{d,q,0}] = [P][\Psi_{a,b,c}] \quad (4.21)$$

Získáváme rovnice

$$U_d = -RI_d - \frac{d\Psi_d}{dt} + \omega\Psi_q \quad (4.22)$$

$$U_q = -RI_q - \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega\Psi_d \quad (4.23)$$

$$U_0 = -RI_0 - \frac{d\Psi_0}{dt} \quad (4.24)$$

A magnetické toky jsou:

$$\Psi_d = L_d I_d + L_{dF} I_F + L_{dD} I_D \quad (4.25)$$

$$\Psi_q = L_q I_q + L_{qQ} I_Q \quad (4.26)$$

$$\Psi_0 = L_0 I_0$$

$$\Psi_F = L_{Fd} I_d + L_{FF} I_F + L_{FD} I_D \quad (4.27)$$

$$\Psi_D = L_{Dd} I_d + L_{DF} I_F + L_{DD} I_D \quad (4.28)$$

$$\Psi_Q = L_{Qq} I_q + L_{QQ} I_Q \quad (4.29)$$

$$\text{Kde } L_d \text{ je podélná synchronní indukčnost : } L_d = L_{a0} + L_{ab0} + 3/2 L_2, \quad (4.30)$$

$$L_q \text{ je příčná synchronní indukčnost : } L_d = L_{a0} + L_{ab0} - 3/2 L_2, \quad (4.31)$$

$$L_0 \text{ je netočivá synchronní indukčnost : } L_0 = L_{a0} - 2L_{ab0} \quad (4.32)$$

[16]

Z uvedených souvislostí vyplývá, že největší výhoda v Parkově transformaci spočívá v odstranění časových závislostí elektrických parametrů. Zejména vzájemné indukčnosti lze po transformaci ve výpočtech dobře použít. V symetrické soustavě (resp. při symetrických poruchách) můžeme nulovou netočivou složku vynechat. Elektromagnetické přechodné jevy nastávají při prudkých změnách nebo poruchách v energetické soustavě a synchronní generátory na ně reagují prudkými změnami generovaných proudů a momentů. Typickým projevem těchto změn je velmi krátký čas jejich trvání (řádově milisekundy), kdy ale nedochází k žádným velkým změnám rychlostí z důvodu velkých setrvačností rotujících hmot (turbína, rotor). Z výše uvedených důvodů můžeme pro účely této práce elektromagnetické přechodné jevy považovat za konstantní.

Další důležitý prvek tvoří **budicí systém**, který se používá pro buzení synchronního stroje. Model budicího systému je znázorněn na obrázku 4.4 a skládá se z PI regulátoru a zjednodušeného modelu budiče.

Popis parametrů budicího systému:

V_{ref} - referenční hodnota napětí

V_t - napětí synchronního stroje

V_{sig} – opravená hodnota vstupního napětí

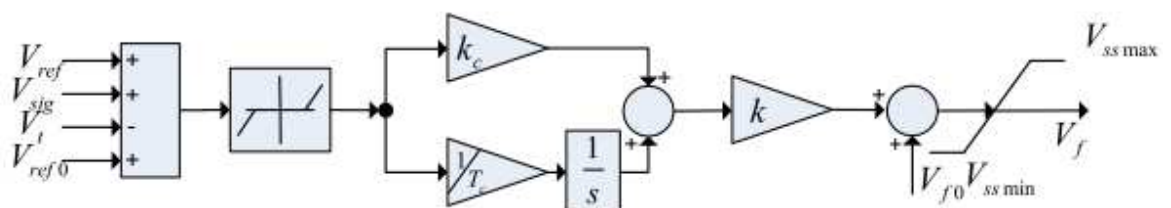
V_{0ref} - počáteční hodnota referenčního napětí, uvažujeme rovno jedné

V_{f0} - počáteční hodnota budicího napětí V

k_c – činitel zesílení PI regulátoru

T_c - časová konstanta PI regulátoru

k – zisk budiče



Obr. 4.4 Model budiče [12]

Spotřebiče můžeme reprezentovat **asynchronními motory s rotorem nakrátko**. Asynchronní stroj může pracovat v generátorickém režimu nebo v režimu motorickém. Režim provozu rozlišuje znaménko u M momentu (plus pro motorický režim, mínus pro generátorický). Všechny elektrické proměnné a parametry přepočteme na stator. Matematický model se obvykle sestavuje při těchto předpokladech:

- *Napájecí soustava je třífázová, souměrná a s harmonickými napětími.*
- *Vinutí jednotlivých fází jsou rovnoměrně rozložena v drážkách po obvodu statoru.*

Uvažují, že vinutí skutečných strojů jsou rozložena ve velkém počtu drážek. Také pomijím vliv drážkování a skutečné vinutí nahradím proudovou vrstvou na rozhraní vzduchové mezery.

- *Shodné velikosti odporů a indukčností jednotlivých vinutí, nezávislé na frekvenci.*

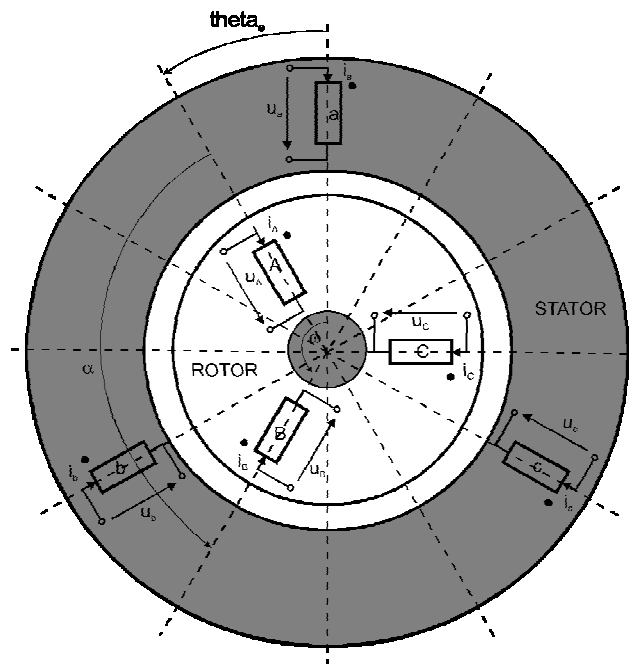
Podle tohoto předpokladu se zanedbává povrchový jev a vliv vířivých proudů na indukčnosti.

- *Lineární magnetizační charakteristika*
- *Stroj je magneticky symetrický*

Předpokládám, magnetickou vodivost v radiálním směru konstantní pro všechny úhly θ .

- *Zanedbávám ztráty v železe stroje.*

[1]



Obr. 4.5 Náhradní schéma asynchronního motoru převzato z [16]

Napěťová rovnice pro jednu fázi statoru vychází z Faradayova zákona a má tvar:

$$u_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \quad (4.33)$$

Dále analogicky zbývající rovnice pro stator:

$$u_b = R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \quad (4.34)$$

$$u_c = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \quad (4.35)$$

A soustavu doplníme rovnicemi pro rotor:

$$u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \quad (4.36)$$

$$u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \quad (4.37)$$

$$u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \quad (4.38)$$

V souladu s předpokladem stejné velikosti odporu jednotlivých vinutí pro uvažovaný model asynchronního stroje lze psát:

$$R_a = R_b = R_c = R_1 \quad (4.39)$$

$$R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = R_2 \quad (4.40)$$

Proud tekoucí uvažovaným vinutím spolu s proudy tekoucími zbylými vinutími, která mají s uvažovaným vinutím magnetickou vazbu, vytvoří spřažené magnetické toky. Obecně tedy lze pro lineární obvody napsat rovnici pro spřažený tok ve tvaru:

$$\Psi_j = \sum_k \Psi_{jk} = \sum_k L_{kk} i_k \quad (4.41)$$

kde $L_{kk}(L_{jj})$ jsou vlastní indukčnosti j – statorového (k – rotorového) vinutí. [17]

Rovnice (4.41) platí v souladu s předpokladem konstantní vzduchové mezery asynchronního stroje, vzduchová mezera nezávisí na úhlu natočení rotoru vůči statoru. Pak ovšem platí:

$$\text{vlastní indukčnost statoru: } L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L_s \quad (4.42)$$

$$\text{vlastní indukčnost rotoru: } L_{AA} = L_{BB} = L_{CC} = L_r \quad (4.43)$$

$$\text{vzájemné indukčnosti statoru: } L_{ab} = L_{ac} = L_{bc} = M_s \quad (4.44)$$

$$\text{vzájemné indukčnosti rotoru: } L_{AB} = L_{AC} = L_{BC} = M_r \quad (4.45)$$

Dále uvažujeme $L_{jk} = L_{kj}$ jsou vzájemné indukčnosti vinutí statoru a vinutí rotoru. Vzájemné indukčnosti vinutí statoru a rotoru závisejí na úhlu natočení rotoru vůči statoru. Předpokládáme symetrický stroj se sinusově rozloženými vinutími, proto musí platit:

$$L_{aA} = L_{Aa} = L_{bB} = L_{Bb} = L_{cC} = L_{Cc} = M \cos(\vartheta_e) \quad (4.46)$$

$$L_{aB} = L_{Ba} = L_{bC} = L_{Cb} = L_{cA} = L_{Ac} = M \cos(\vartheta_e + 2\pi/3) \quad (4.47)$$

$$L_{aC} = L_{Ca} = L_{bA} = L_{Ab} = L_{cB} = L_{Bc} = M \cos(\vartheta_e - 2\pi/3) \quad (4.48)$$

kde ϑ_e značí elektrický úhel rovný $\vartheta_e = p \times \vartheta$, a p je počet pólových dvojic stroje.

Uvažujeme základní pozici jedné fáze statorového vinutí, proto lze pro sprážené magnetické toky uvažovat:

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & -M_s & -M_s & M \cos(\vartheta_e) & M \cos\left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -M_s & L_s & -M_s & M \cos\left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\vartheta_e) & M \cos\left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -M_s & -M_s & L_s & M \cos\left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\vartheta_e) \\ M \cos(\vartheta_e) & M \cos\left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & L_r & -M_r & -M_r \\ M \cos\left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\vartheta_e) & M \cos\left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & -M_r & L_r & -M_r \\ M \cos\left(\vartheta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos\left(\vartheta_e + \frac{2\pi}{3}\right) & M \cos(\vartheta_e) & -M_r & -M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

[16]

$$\text{Vinutí nemá vyvedený společný uzel, tedy platí } i_b + i_c = -i_a, \quad (4.52)$$

$$\text{pro rotor zapíšeme } i_B + i_C = -i_A. [16] \quad (4.53)$$

$$\text{Můžeme vyčíslit } \cos \frac{2}{3}\pi = -\frac{1}{2} \quad (4.54)$$

Po dosazení do rovnice (4.49) například pro fázi *a* dostaneme:

$$\psi_a = \left(L_a + \frac{1}{2} M_s \right) i_a + \frac{3}{2} M_{iA} \quad (4.55)$$

$$\text{Lze formálně označit indukčnost jedné fáze statoru } L_S = \left(L_a + \frac{1}{2} M_s \right) \quad (4.56)$$

$$\text{Vzájemná indukčnost statoru a rotoru } L_{SH} = \frac{3}{2} M \quad (4.57)$$

Při analýzách asynchronních strojů se používají transformace do dvou ortogonálních os otáčejících se vhodně zvolenou rychlostí. Výhody těchto transformací spočívají ve snížení počtu fází analyzovaného stroje a dále mohou při správné volbě transformace převést střídavé veličiny na stejnosměrné. Provedeme transformaci do souřadného systému pevně svázaného se státorem (Clarkovu transformaci). Protože se stator a rotor vůči sobě otáčejí, mění se jejich vzájemná indukčnost. Zavedeme pomocnou komplexní konstantu: $a = e^{\frac{2}{3}\pi}$. V praktických výpočtech užíváme přepisy této konstanty do následujících výrazů:

$$a \cdot a^2 = 1, \quad (4.58)$$

$$a \cdot a = a^2, \quad (4.59)$$

$$a^2 \cdot a^2 = a, \quad (4.60)$$

$$1 + a + a^2 = 0 \quad (4.63)$$

$$\text{Transformace z rotoru na stator: } \bar{u}_r^s * e^{-j\vartheta} = R_r \bar{i}_r^s * e^{-j\vartheta} + \frac{d}{dt} (\bar{\Psi}_r^s * e^{-j\vartheta}) \quad (4.64)$$

$$\bar{u}_r^s e^{-j\vartheta} = R_r \bar{i}_r^s e^{-j\vartheta} + \frac{d\bar{\Psi}_r^s}{dt} (e^{-j\vartheta}) - j \frac{d\vartheta}{dt} e^{-j\vartheta} \bar{\Psi}_r^s \quad (4.65)$$

$$\text{Souřadný systém statoru} \quad \bar{u}_r^s e^{-j\vartheta} = R_r \bar{i}_r^s e^{-j\vartheta} - j\omega_{el} \bar{\Psi}_r^s \quad (4.66)$$

Můžeme přejít do α, β souřadnic spojených se státorem (Clarkova transformace):

$$u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \quad (4.67)$$

$$u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \quad (4.68)$$

$$u_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} + \omega_{el} \Psi_{r\beta} \quad (4.69)$$

$$u_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} + \omega_{el} \Psi_{r\alpha} \quad (4.70)$$

kde

$$\Psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + L_h i_{r\alpha} \quad (4.71)$$

$$\Psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + L_h i_{r\beta} \quad (4.72)$$

$$\Psi_{r\alpha} = L_r i_{r\alpha} + L_h i_{s\alpha} \quad (4.73)$$

$$\Psi_{r\beta} = L_r i_{r\beta} + L_h i_{s\beta} \quad (4.74)$$

[14]

Rovnice pro elektromagnetický moment:

$$M_{elmg} = \frac{3}{2} p L_h \text{Re} \{ \bar{J} \bar{i}_r i_s^* \} \quad (4.75)$$

$$M_{elmg} = \frac{3}{2} p (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}) \quad (4.76)$$

Doplníme rovnicemi pro mechanický moment:

$$M_{elmg} - M_z = J \frac{d\omega_{mech}}{dt} \quad (4.77)$$

$$M_{elmg} - M_z = \frac{J}{p} \frac{d\omega_{el}}{dt} \quad (4.78)$$

$$\omega_{mech} = \frac{d\omega_{el}}{p} \quad (4.79)$$

Pro úplnost lze na závěr rekapitulovat hlavní veličiny matematického modelu AM

Písmenné značení	Veličina
R_a, R_b, R_c	Odpory jednotlivých vinutí statoru
L_{aa}, L_{bb}, L_{cc}	Vlastní indukčnosti jednotlivých fází statoru
L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}	Vlastní indukčnosti jednotlivých fází rotoru

L_{ab}, L_{ac}, L_{bc}	Vzájemné indukčnosti statoru
L_{AB}, L_{AC}, L_{BC}	Vzájemné indukčnosti rotoru
P	Počet pólových dvojic stroje
M_{elmg}	Elektromagnetický moment AM
M_z	Zátěžný moment
$\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c,$	Spřažené magnetické toky
$u_{aa}, u_{a\beta}$	Transformovaná napětí statoru
$u_{ra}, u_{r\alpha}$	Transformovaná napětí rotoru
$\Psi_{sa}, \Psi_{s\beta}$	Transformované magnetické toky statoru
$\Psi_{ra}, \Psi_{r\beta}$	Transformované magnetické toky rotoru

Obr. 4.6 Veličiny matematického modelu AM - rekapitulace

Volba systému, ve kterém budeme asynchronní motor modelovat, může značně ovlivnit rychlost a přesnost simulace. Podle [10] je doporučováno: Použijte systém pevně svázaný se státorem, pokud napětí na statoru není symetrické nebo spojitě a napětí na rotoru je symetrické nebo nulové (motor s kotvou nakrátko). Pro účely této diplomové práce je výše uvedená Clarkova transformace (CT) v souladu s výše uvedeným doporučením. Jako další přednost CT se ukazuje její využívání simulačním softwarem SIMULINK. Nejen z těchto důvodů dále v diplomové práci používám SIMULINK pro simulaci mimořádných stavů ES.

4.2 Analýza konkrétních simulovaných situací mimořádného stavu energetizační soustavy

Každý technický výpočet lze s jistou mírou abstrakce chápat jako modelování. Svým způsobem matematické metody používané v elektrotechnice napodobují chování jednotlivých technických zařízení. Nutným předpokladem pro úspěšné zvládnutí simulačních výpočtů je dostupný dobře zpracovaný software a výkonný HW. Vlastnímu formulování cílů simulačních výpočtů musí předcházet úvaha o typu zkoumaného děje (ustálený, přechodný). Na základě rozhodnutí o druhu zkoumaného děje lze rozhodnout, které skutečnosti či děje lze zanedbat. Obecná výhoda simulačních modelů spočívá v možnosti provést výpočty bez nutnosti provádět testování a měření na vyčleněné části přenosové sítě.

4.2.1 Cíle simulačních výpočtů

Pomocí simulačních výpočtů v této diplomové práci bych rád identifikoval rizika vznikající z určité mimořádné situace v ES. Uvažuji zvláštní případ ostrovního provozu, kdy po vyčlenění části ES podává vodní elektrárna výkon pro start ze tmy jednoho bloku větší tepelné elektrárny. Důvodů pro volbu těchto variant mám několik. Ovšem zcela zásadním důvodem je ekvivalence s podpůrnou službou poskytovanou vybranými vodními elektrárnami provozovateli přenosové soustavy. Mám na mysli certifikovanou službu start ze tmy poskytovanou například elektrárnou Orlík pro ČEPS. Provozovatel přenosové soustavy musí mít připraveny plány obnovy, které řeší situace po frekvenčním kolapsu části nebo celé soustavy. Potom vyvstává potřeba obnovy napájení jednotlivých elektrárenských bloků, jejich sfázování se zbytkem sítě a postupné připojování odběratelů. Jednou z možností obnovy soustavy je tzv. start ze tmy vybraného zdroje. Pomocí individuálních modelů potřebuji získat časové průběhy napětí a frekvence. Postup hodnocení v konkrétním případě uvádím v kapitole 5.6.1

Pomocí těchto průběhů potom lze posoudit stabilitu jednotlivých testovaných variant a v neposlední řadě ověřit správnost jednotlivých kroků plánu obnovy ES. Tím se dostávám k dalšímu cíli diplomové práce, tj. k ověření provozních plánů ČEPS pro start ze tmy elektrárny Chvaletice po podání výkonu pro obnovení VS z elektrárny Orlík.

4.2.2 Varianty simulovaných situací startu ze tmy na elektrárně Orlík

Pro výše uvedenou situaci elektrizační soustavy lze definovat velké množství variant. Z těchto možností vybírám tři simulované situace. Všechny zvolené situace mají společnou konfiguraci tvořenou vedeními, blokovými transformátory a jedním generátorem vodní elektrárny.

První situace modeluje stav při spouštění kouřového ventilátoru na vlastní spotřebě elektrárny Chvaletice. Zátěž tvoří pouze největší spotřebič VS ve zvoleném bloku tepelné elektrárny.

V případě potřeby zpřesnění výpočtů se dostáváme k dalšímu modelu. Do vlastní spotřeby startované elektrárny uvažujeme v tomto případě čtyři největší pohony elektrárny. Při volbě počtu motorů jsem vycházel z úvahy, že tyto asynchronní motory tvoří téměř $\frac{3}{4}$ příkonu potřebného pro VS.

Poslední modelovaná varianta kompletuje předchozí myšlenky a pro simulační výpočty používám všechny pohony VS. Všechny modelované situace umožňují prověřit dynamické

chování pohonů VS a stabilitu přechodového elektromagnetického děje, zejména s ohledem na vznik případných kmitů.

Nevýhodou všech sestavených modelů je, že uvažujeme trasu předem sepnutou s postupně přibuzovaným generátorem až na hodnotu 95 % jmenovitého napětí U_n . Během najížděcího procesu nedochází k žádným vypínacím či spínacím procesům. Pokud by k takovým procesům v reálné situaci došlo, pak se předpokládá zastavení procedury blackstartu. Následně by se proces spouštění zahájil znovu od začátku.

Připínání trasy může přivodit u transformátoru vznik ferorezonance. Rezonance je obvykle pro nás nepříznivý fyzikální děj, při kterém, mechanický, akustický, nebo elektromagnetický systém uchovává a jednoduše převádí energii mezi dvěma nebo více jejími podobami (například přeměna střídavého elektrického pole na magnetické pole a zpět v případě Ferrantiho jevu - střídavé magnetické pole vyvolá proudy protékajícími kapacitou mezi jednotlivými vodiči, ale i mezi vodiči a zemí, přičemž indukují do vedení napětí. Tato napětí se přičítají k napětím zdrojů).

Při takovýchto jevech se projevují ovšem i ztráty mezi jednotlivými periodami, tzv. útlum. Při malých hodnotách tlumení (a tedy nízkých ztrátách) se velikost rezonanční frekvence přibližně rovná vlastní frekvenci systému. [21]

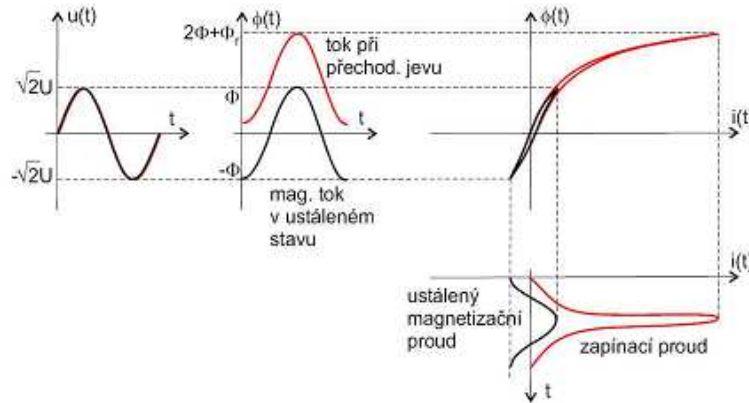
Obecně fyzikální systémy mají více rezonančních frekvencí. Rezonanční děj představuje pro vlastní systém téměř vždy značné riziko. Oscilace běžně mají schopnost dosáhnout takových amplitud, které dokáží přístroje porušit, ne-li přímo zničit.

Ferorezonance se od rezonance liší zejména:

- Rezonance vzniká ve větším rozsahu kapacity.
- Jiný kmitočet napětí a proudu z jednoho zdroje.

Ferorezonanci si lze prezentovat například na transformátoru, kdy v závislosti na počátečním náboji a na zbytkovém magnetickém toku v jádře transformátoru při jeho připojení ke zdroji může nastat více stabilních stavů. Vezmeme-li v úvahu rovnici (4.81) lze pro okamžitou hodnotu magnetického toku e odvodit, že průběh Φ je harmonický a za napětím zaostává o čtvrt periody [20]. Na obrázku 4.7 pak vidíme, že ferorezonanční magnetizační proud má několika násobnou velikost proti ustálenému magnetizačnímu proudu.

$$\Phi = \int \frac{U_m}{N} * \cos(\omega t) dt = -\frac{U_m}{\omega N} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (4.81)$$



Obr. 4.7 Vznik ferorezonančního proudu převzato z [20]

4.3 Shrnutí čtvrté kapitoly

V zásadě využíváme výpočetní modelování pro simulaci provozních a mimořádných stavů v energetické soustavě. Změny zatížení nebo poruchy způsobují přechodné děje v ES. Pomocí simulačních výpočtů ověřujeme vliv přechodných dějů na působení regulačních systémů, ochran a automatiky. Výhoda simulací se jeví zvláště zřetelně při zkoušení nebo testování blackstartu přenosové sítě.

Možnost simulovat funkci přenosové či distribuční soustavy a také prověřit její chování v různých podmínkách bez nutnosti vyčleňovat části ES značně zpřesňuje a také zlevňuje možnosti reakce na mimořádné stavy. Přes obrovský pokrok, který simulační programy přinášejí, není, hlavně u náročnějších úloh, možné zdárný výsledek očekávat bez sestavení individuálního modelu pro každou modelovanou situaci. Každá simulace pracuje s menším či větším zjednodušením. Při volbě dostatečně přesného zjednodušení modelu a správné interpretaci výsledků se ukazuje výhodnost simulací. V určitých situacích nelze vystačit pouze s počítačovou simulací, pro analýzu problému či ověření výsledků se musí provést dodatečné experimenty (zkoušky, měření) na fyzickém modelu.

5 Simulační výpočty při startu ze tmy elektrárny Orlík do většího odběru elektrické energie

Start elektrárny ze tmy provází v zásadě riziko vzniku nestabilních elektromagnetických přechodových dějů vznikajících zejména při rozběhu velkých pohonů. Před spuštěním VS potřebujeme ověřit, zda zvládneme celý proces rozběhu velkých asynchronních motorů

zejména s ohledem na velké změny činných a jalových výkonů. Při běžném synchronním provozu ES činnost primární regulace frekvence udržuje odchylku kmitočtu od jmenovité hodnoty 50 Hz v mezích 49,8 -50,2 Hz. Při vybočení frekvence z těchto mezí provádí dispečink provozovatele přenosové soustavy opatření určené provozní instrukcí v souladu s frekvenčním plánem.

Frekvenční plán obsahuje a popisuje instrukce určené v příloze vyhlášky č. 219/2001 Sb. O stavech nouze v elektroenergetice. Prováděná opatření se nejprve týkají výrobců – elektráren (bez ohledu, jestli jsou vyvedeny do přenosové nebo distribuční soustavy, tak posléze i odběratelů (frekvenční odlehčování).

Pro vodní elektrárny stanovuje normální provoz bez omezení ve frekvenčním pásmu 48,5-50,5 Hz. Při vybočení odchylky frekvence o odchylku větší než ± 200 mHz přichází signál „snížený nebo zvýšený kmitočet“ a bloky se automaticky přepínají do otáčkové proporcionální regulace a odpínají od centrálního regulátoru f a P. Přichází povel k automatickému odpojení automatické regulace napětí (ASRU) ze systému terciární regulace napětí.

Při dalším poklesu kmitočtu pod hodnotu 49.8 – 49.2 Hz se automaticky odpojují od ES bloky PVE a přechází do režimu vlastní spotřeby (čerpadlový režim). Při dalším poklesu frekvence přechází do turbínového režimu. Při poklesu frekvence pod 49 Hz se v pásmu 49 – 47.5 Hz automaticky odpínají lokální distribuční soustavy (závodní elektrárny) do separátního provozu. Při poklesu frekvence do pásma nepřijatelného provozu se nejprve automaticky odpojují jaderné a paroplynové elektrárny a přechází do vlastní spotřeby. Následně při poklesu frekvence pod 46 Hz i uhelné, vodní a přečerpací vodní elektrárny spouští režim vlastní spotřeby.

Při nárůstu frekvence nad 50.2 Hz se automaticky odpojují od sítě na vlastní spotřebu vybrané bloky VE a PVE v turbínovém režimu. Při 51.5 Hz se automaticky vypínají zbývající bloky PVE v turbínovém režimu a bloky VE, pokud nezregulovaly na nulový výkon. Při dosažení pásma nepřijatelného provozu pro nadfrekvenci se bloky vypínají od sítě do provozu na vlastní spotřebu se zpožděním zohledňujícím přechodné zvýšení frekvence.

5.1 Vznik a typy ostrovního provozu

Jedním z mimořádných stavů části ES, který může nastat v souvislosti se šířením poruchy je ostrovní provoz. Ostrovní provoz podle Kodexu přenosové soustavy vzniká po poruše – vypnutí vedení nebo jejich části případně transformátorů chybnou manipulací nebo ochranami.

Postižená část sítě ztrácí synchronní spojení se zbytkem soustavy a pracuje asynchronně (při poklesu frekvence pod 46 Hz se obvykle u vodních elektráren přechází do režimu ostrov).

Existuje i druhý způsob vzniku ostrovního režimu, a to záměrnou činností při obnově ES po frekvenčním nebo napět'ovém kolapsu soustavy, kdy dojde nejprve k tzv. startu ze tmy bez podpory okolní přenosové sítě, rozběhu vlastní spotřeby, jejímu najetí a dalšímu postupnému zatěžování. [11]

Pro účely této diplomové práce se nadále zabývám pouze druhou možností. S určitou přípustnou mírou zjednodušení lze na black-start nahlížet jako na zvláštní případ ostrovního režimu. Ostrovní provoz končí dodáním činných a jalových výkonů po synchronizaci a přifázování ke zbytku soustavy. Přifázování se provádí pomocí automatických fázovacích synchronizačních zařízení, která kontrolují plnění fázovacích podmínek. Vyregulování frekvence v ostrově do pásma vhodného pro fázování řídí dispečer přenosové soustavy podle příslušné provozní instrukce. [11]

V ostrovním režimu musí platit energetická rovnováha. Matematicky vyjádřeno platí pro ostrovní režim rovnice

$$\sum_{i=1}^n P_{gi} = \sum_{i=1}^n P_{oi} + \sum_{i=1}^n P_{vsi} \quad [5.1]$$

kde P_g ... výkony dodávané generátory

P_o odebrané výkony

P_{vs}vlastní spotřeba [4]

Činitelé v rovnici se mohou měnit náhodnou změnou zatížení např. výpadkem nějakého zařízení. Při ostrovním režimu se synchronními generátory vyrovnává případná energetická nerovnováha. V tomto případě platí rovnice pro mechanický moment v závislosti na zátěžném úhlu β .

$$M = - \frac{m \times p}{\omega_s} \times U \times I_k \times \sin \beta \quad [5.2]$$

Kde β ...zátěžný úhel [°]

ω_ssynchronní úhlová rychlost [s^{-1}]

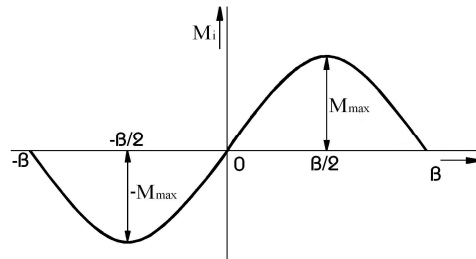
I_kproud nakrátko [A]

Usružené napětí [V]

ppočet pólů [-]

m...počet fází [-] [5]

Grafické znázornění závislosti je na obr.5.1



Obr. 5.1. Momentová charakteristika synchronního stroje převzato z [7]

5.2 Obnova po poruše

Obnovu soustavy po poruše typu black-out umožňuje systém podpůrných služeb jednotlivých ES a u nás ji definuje Kodex PS [11].

Při rozpadu soustavy a odpojení výroby od přenosové nebo distribuční soustavy je provoz výroby zabezpečen na úrovni vlastní spotřeby bloku, a to bez časového omezení. Pro zabezpečení provozu přenosové soustavy obsahují soustrojí vodní elektrárny Orlík regulátory ostrovního provozu, které zabezpečují řízení bloku v ostrovním režimu.

Na požadavek dispečera přenosové soustavy je blok podle potřeby opětovně přifázován k síti za spolupráce s tímto dispečerem. Tím se přechází do situace blackstart a energetický dispečink může výrobní soustrojí elektrárny Orlík využít pro obnovení napětí v síti v součinnosti s elektrárnou Kamýk.

Elektrárna Orlík vlastní certifikace pro poskytování systémové služby start ze tmy. Nejen z těchto důvodů je důležité provádět zkoušky najetí ze tmy. Avšak testování jednotlivých stupňů startu ze tmy je za běžného provozu přenosové sítě prakticky nemožné. Důvody leží ve velké organizační náročnosti a provází je riziko napěťového nebo frekvenčního rozpadu ES. Správně zvolené výpočty elektromagnetických přechodných dějů s korektně nastaveným zjednodušením mohou pomoci nalézt část problémů ještě před spuštěním testů.

5.3 Stručná charakteristika simulačního softwaru

Simulink je nadstavba výpočetního softwarového prostředí MATLAB pro simulaci a modelování dynamických systémů, používající algoritmy MATLABu pro výpočet soustavy nelineárních diferenciálních rovnic. Jeho uživatelsky přívětivé ovládání dává uživateli možnost rychle a snadno vytvářet modely dynamických soustav ve formě blokových schémat a rovnic.

MATLAB nabízí uživateli interaktivní prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. Je to nástroj, jak pro relativně pohodlnou interaktivní práci, tak pro vývoj širokého spektra aplikací. [9]

Mimo standardních úkolů umožňuje Simulink rychle a přesně simulovat i rozsáhlé systémy při využití výkonných výpočetních prostředků PC. Pomocí Simulinku a jeho grafického editoru se dají formulovat modely lineárních, nelineárních, nespojitých nebo spojitých systémů pouhým přesouváním funkčních bloků myší. Simulink také umožňuje spouštět určité části simulačního schématu na základě výsledku logické podmínky. Tyto spouštěné a povolované subsystémy umožňují použití programu v náročných simulačních experimentech. Simulink disponuje otevřenou architekturou, dovolující uživatelům vytváření vlastních celých účelových bloků rozšiřujících již tak hojně knihovny Simulinku.

Hierarchická struktura modelů umožňuje koncipovat i velmi složité systémy do přehledné soustavy subsystémů prakticky bez omezení počtu bloků. Simulink, stejně jako MATLAB, dovoluje připojovat funkce napsané uživateli v jazyce C. Velmi dobře zpracované grafické výstupy Simulinku je možné přímo využít k tvorbě dokumentace. Vynikajícím rysem Simulinku je nezávislost uživatelského rozhraní na počítačové platformě. Přenositelnost modelů a schémat mezi různými typy počítačů umožňuje vytvářet rozsáhlé modely, které vyžadují spolupráci většího kolektivu řešitelů na různých úrovních.[12]

5.4 Idealizovaný model pro simulaci startu ze tmy

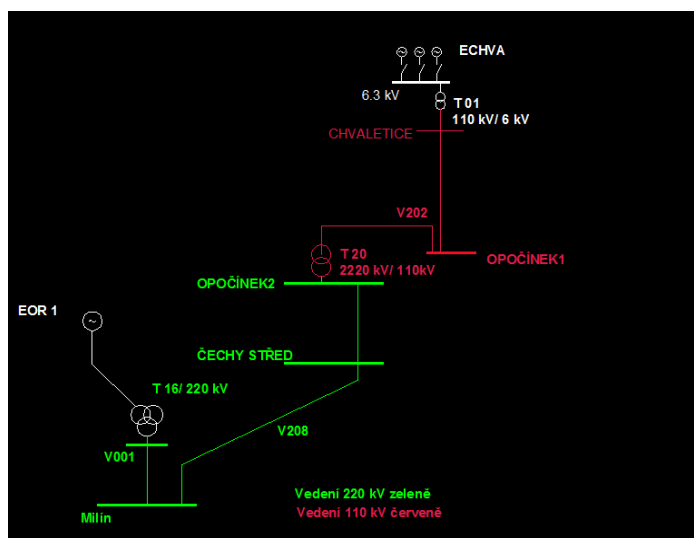
Byla modelována situace, kdy pracuje pouze jeden generátor elektrárny Orlík s otáčkovou regulací. Výkon generátoru vyvádí blokové transformátory přes dvě linky 220 kV do rozvodny Milín, Z rozvodny Milín přechází výkon po trase 220kV do rozvodny Čechy-střed, dále do rozvodny Opočíněk2. Odtud VVN transformátor po linkách 110 kV přes rozvodnu Opočíněk1 podává výkon na VN transformátor na rozvodně Chvaletice k obnově vlastní spotřeby bloku tepelné elektrárny Chvaletice (ECH) viz obr.5.5.2. Tabulka tab.5.5.1 pak uvádí spotřebiče vlastní spotřeby rozbíhané na bloku elektrárny Chvaletice. Z těchto spotřebičů pro modelování situace vybírám kouřový ventilátor o příkonu 4,957 MVA.

Označení	Typ	Výkon [MVA]
CHL	Chladička	1,00
EKV	Motory nn	0,2

KV	Kouřový ventilátor	4,957
VV_1	Vzduchový ventilátor	1,204
VV_2	Vzduchový ventilátor	1,204
VC_12	Čerpadla vodoproudých vývěv	2x0,312
KC1	Kondezátní čerpadlo prvního stupně	0,312
KC2	Kondezátní čerpadlo druhého stupně	0,94
NOC	Čerpadlo najíždějícího oleje	0,2
EN_1	Napáječka	4,88
M1_1	První mlýnský okruh	0,787
M1_2	Druhý mlýnský okruh	0,787
M1_3	Třetí mlýnský okruh	0,787

Tab. 5.5.1 Spotřebiče vlastní spotřeby ECH

Pro simulaci startu ze tmy volím výše uvedený ventilátor z důvodu zjednodušení situace, neboť tento ventilátor je největším spotřebičem na vlastní spotřebě. Jeho spuštění při black-startu bude z hlediska vzniku přechodných jevů kritickým místem startu ze tmy.



Obr. 5.5.2 Jednopolově - trasa EOR-ECH

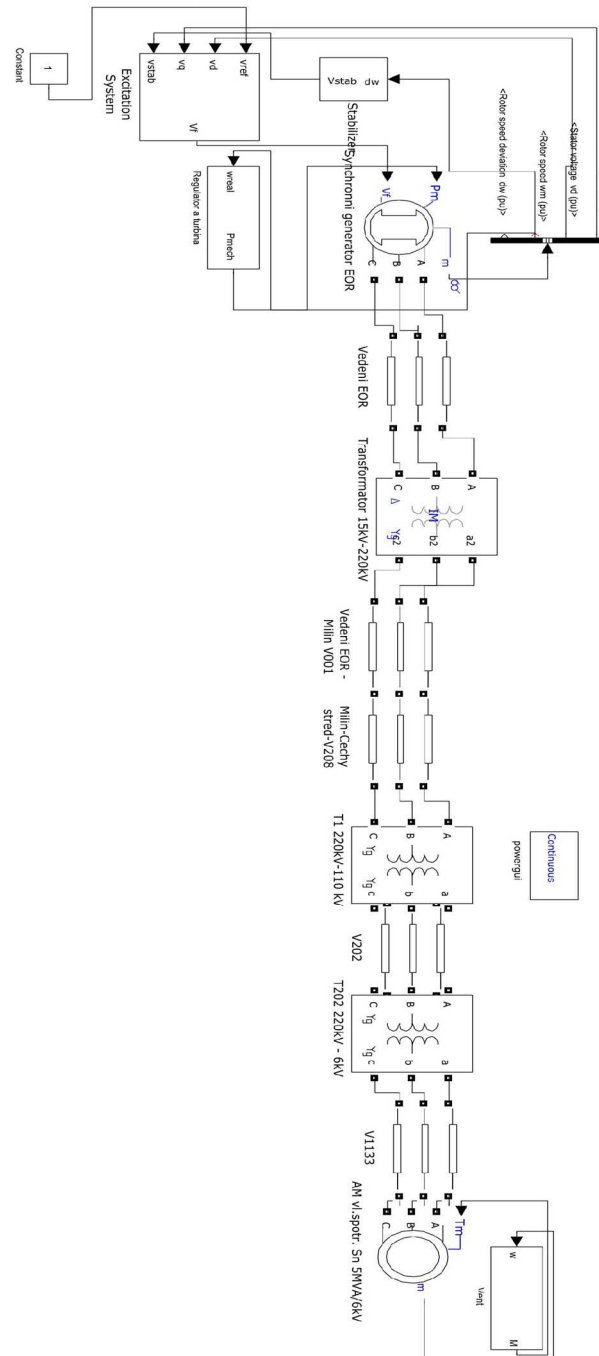
5.4.1 Kritéria hodnocení simulace vybraných situací

Hodnocení spočívá v kontrole, zda nedojde k vychýlení frekvence či napětí z povolených regulačních limit: Nesmí působit podpěťová ochrana 6 kV ve vlastní spotřebě startované elektrárny (první stupeň ochrany působí při poklesu napětí pod $0,8 \cdot U_{gn}$ po dobu 1s, druhý stupeň při poklesu pod $0,65 \cdot U_{gn}$ po dobu 2s). [8] Frekvenční odchylky musí zůstat v hranicích běžného provozu vodních turbín, tj. 48,5 až 50,5 Hz (Kodex PS). [8]

Nesmí působit přepěťová ochrana na VE Orlík $U_g < 16.3 \text{ kV}$ [8]

5.4.2 Popis simulovaného modelu

Pro sestavení modelované soustavy používám standardní tool box modely z nabídky SimPowerSystems v software Simulink. Mimo jiné aplikuji model asynchronního motoru pro simulaci vlastní spotřeby, dále pro model hydrogenerátoru vybírám z nabídky stroj s vyniklými póly a transformátory. Při sestavování modelu pro simulaci používám parametry vedení uvedené v tabulce 5.5.7 a hydroalternátoru, uvedené v tabulce na obr.5.5.6.



Obr.5.5.5 Simulační model-první varianta

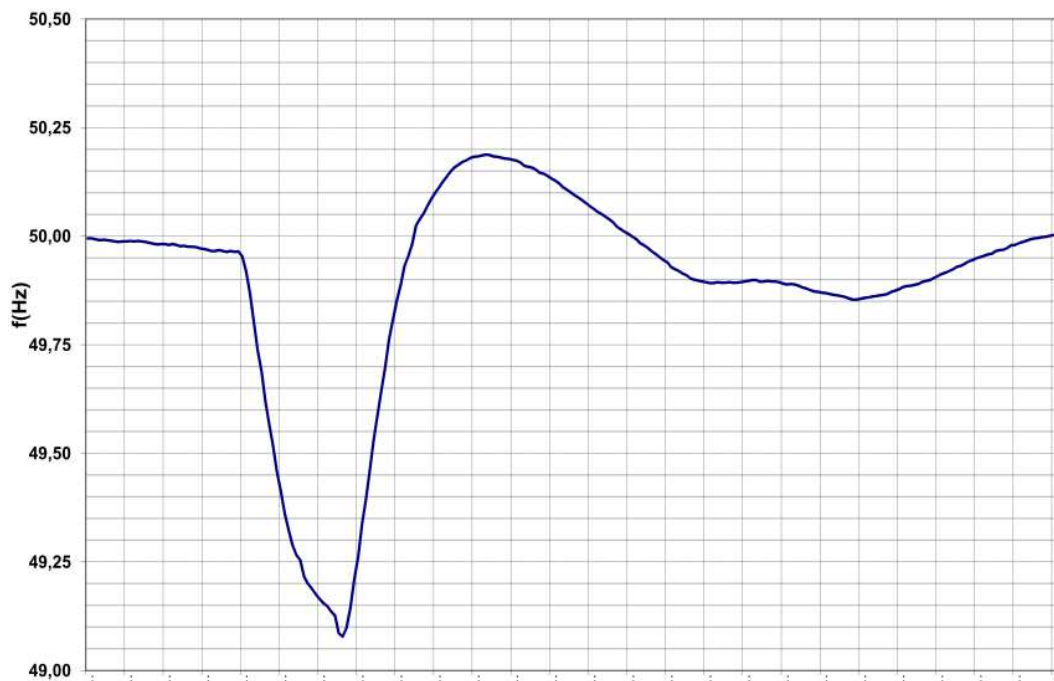
Veličina	Název	Jednotka	Hodnota
Typ generátoru	HV 173080/32		
S_n	Zdánlivý jmenovitý výkon	MVA	100
P_n	Činný jmenovitý výkon	MW	91
U_n	Sdružené napětí statoru	kV	15
I_n	Jmenovitý proud na svorkách statoru	A	3850
n	Otáčky	1/min	187,2
R_s	Odpor fáze statoru při provozní teplotě	Ω	0,0046
X_d	Podélná synchronní reaktance	[%]	102
X_q	Příčná synchronní reaktance	[%]	58
X_d'	Přechodná podélná reaktance	[%]	27,5
X_q'	Přechodná příčná reaktance	[%]	58
X_d''	Rázová podélná reaktance	[%]	20
X_q''	Rázová příčná reaktance	[%]	22
X_0	Netočivá reaktance	[%]	15
X_2	Zpětná reaktance	[%]	21,5
T_d'	Podélná přechodná časová konstanta	s	2,21
T_d''	Podélná rázová časová konstanta	s	0,0038
T_q'	Příčná přechodná časová konstanta	s	0,42
T_q''	Příčná rázová časová konstanta	s	0,013
T_a	Stejnoseměrná časová konstanta statoru	s	0,18
U_{bmax}	Maximální budící napětí stroje	V	252
I_{bmax}	Maximální budící proud stroje	A	846,6
U_{bn}	Jmenovité budící napětí stroje	V	240
I_{bn}	Jmenovitý budící proud stroje	A	830
U_{b0}	Jmenovité budící napětí stroje naprázdno	V	110
I_{b0}	Jmenovitý budící proud stroje naprázdno	A	480
$\cos \varphi$	Účinník	-	0,91
H	Účinnost stroje	[%]	97,94

Tab.5.5.6. Použité simulační parametry pro hydroalternátor

Parametry vedení uvažované trasy				
	Pro 220 kV	Pro 220 kV	Při 110 kV	Při 110 kV
	EOR – Milín	Milín-Čechy střed	Čechy střed-Opočíněk2	Opočíněk1-Chvaletice
	V001	V208	V202	V1133
Délka v [km]	9	87	72	18
Reaktance X_p [Ω/km]	0,4	0,4	0,41	0,41
Indukčnost L_p [mH/km]	1	1	0,93	0,93
Kapacita C_p [μF/km]	0,012	0,012	0,0125	0,0125
Rezistivita R_p [Ω/km]	0,087	0,087	0,125	0,125

Tab.5.5.7 Parametry uvažované trasy

Průběh simulované frekvence ukazuje obrázek 5.5.8. Trasa je předem připravena a generátor postupně přibuzován až na 95 procent jmenovitého výkonu.



Obr.5.5.8 Průběh simulované frekvence

Z grafu na obr.5.5.8 lze odečíst, že frekvenční odchylka $\Delta f_{\max} = 0,95$ Hz nevybočuje z mezí povolených pro start ze tmy v souladu s kodexem přenosové soustavy.



Obr.5.5.9 Výsledný průběh simulovaného napětí generátoru – první varianta



Obr.5.5.10 Výsledný průběh simulovaného napětí VS za transformátorem – první varianta

5.5 Model se čtyřmi spotřebiči VS pro simulaci BS

Jako alternativní modelovanou situací pro simulaci rozběhu vlastní spotřeby elektrárny Chvaletice volím rozběh čtyř největších spotřebičů VS. Tyto čtyři pohony totiž tvoří téměř 75 % příkonu dodávaného pro rozběh VS. Tím bych rád eliminoval nevýhodu předchozího modelu, tj. rozběh pouze jednoho pohonu.

Trasu pro modelovanou situací sestavuji stejným způsobem (tj. z rozvodny Milín se převádí výkon po trase 220kV do rozvodny Čechy-střed, dále do rozvodny Opočíněk2. Odtud VVN transformátor po linkách 110 kV přes rozvodnu Opočíněk1 podává výkon na VN transformátor na rozvodně Chvaletice k obnově vlastní spotřeby bloku tepelné elektrárny Chvaletice (ECH) viz obr. 4.4.2). Tabulka na obrázku 5.5.11 pak uvádí čtyři uvažované asynchronní motory vlastní spotřeby rozbíhané na bloku elektrárny Chvaletice.

Označení	Typ	Výkon [MVA]
CHL	Chladička	1,00
KV	Kouřový ventilátor	4,957
EN_1	Napáječka	4,88
VV_1	Vzduchový ventilátor	1,204

Tab.5.5.11 Spotřebiče VS pro simulaci reálnější varianty BS

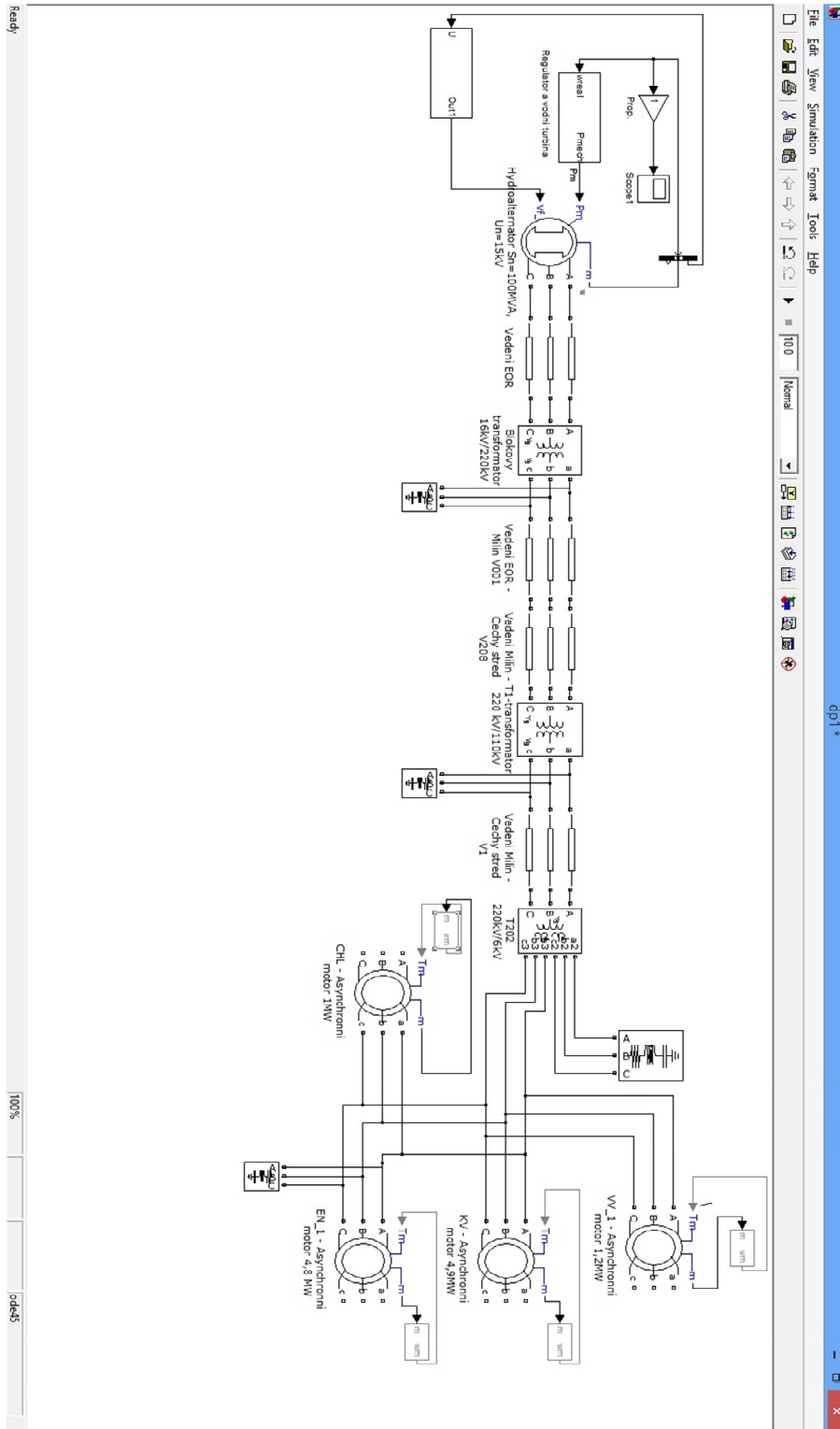
5.5.1 Kritéria hodnocení simulace druhé varianty

Při hodnocení využívám metodiku naznačenou v kapitole 5.4.1.

5.5.2 Popis druhého simulovaného modelu

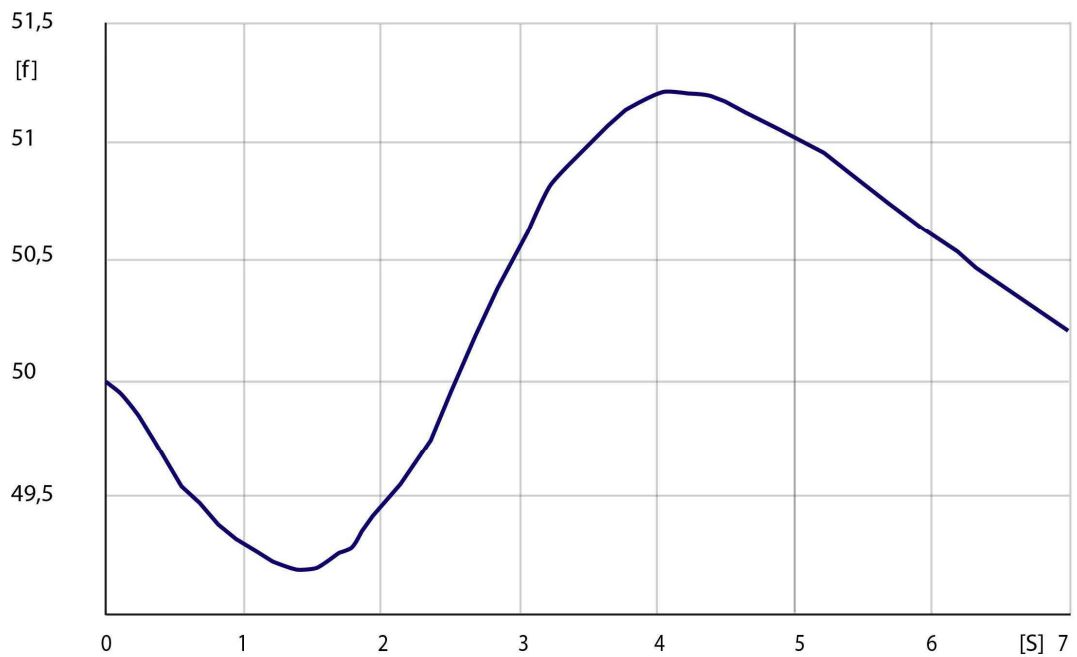
Opět využiji připravené nabídky simulačního software Simulink a aplikuji modely asynchronních motorů pro simulaci vlastní spotřeby, dále pro model hydrogenerátoru vybírám z nabídky stroj s vyniklými póly a vkládám též bloky pro transformátory.

Parametry vedení druhé simulované situace zobrazuje tabulka 5.5.7 a parametry hydroalternátoru, lze nalézt v tabulce 5.5.6. Sestavený model v prostředí Simulink představuje obr.5.6.2.



Obr.5.6.2 Simulační model druhé varianty

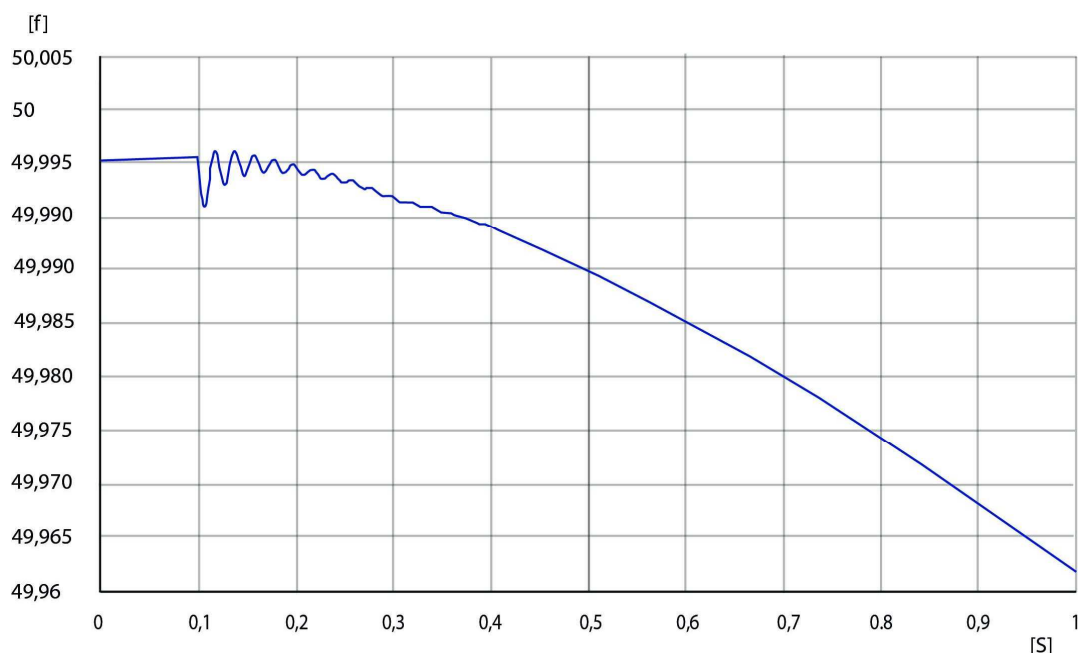
Výsledný průběh frekvence simulované situace zobrazuje obr.5.6.3



Obr. 5.6.3 Průběh simulované frekvence – druhá varianta

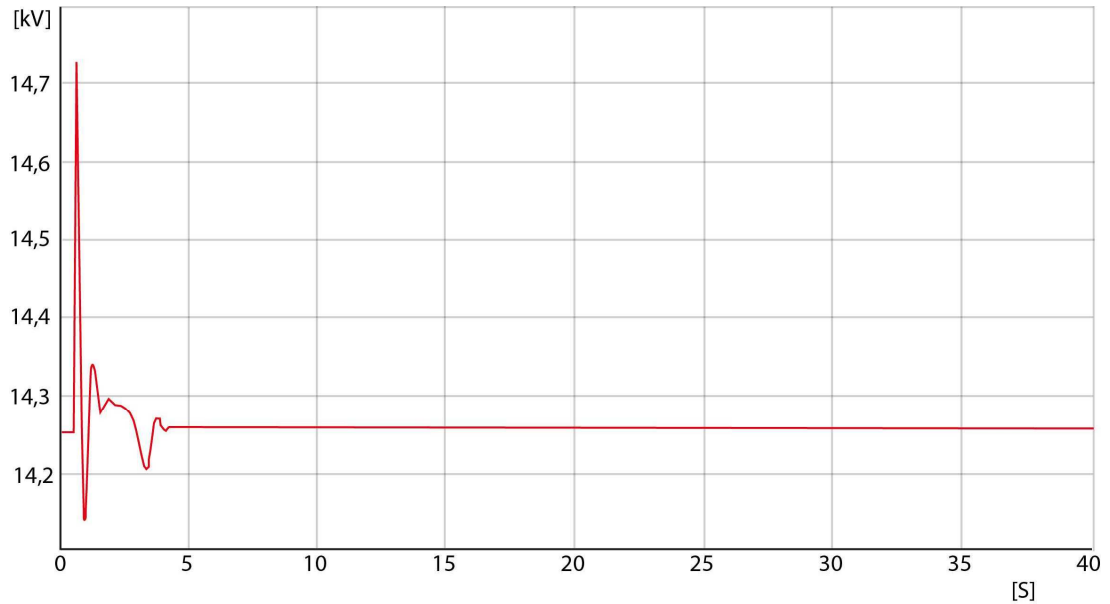
Z grafu na obr.5.6.3 lze odečíst, že maximální frekvenční odchylka $\Delta f_{\max} = 1,25$ Hz nevybočuje z mezí povolených pro start ze tmy v souladu s kodexem přenosové soustavy.

Graf na obrázku 5.6.4 pak detailněji zobrazuje průběh frekvence na počátku startu elektrárny.

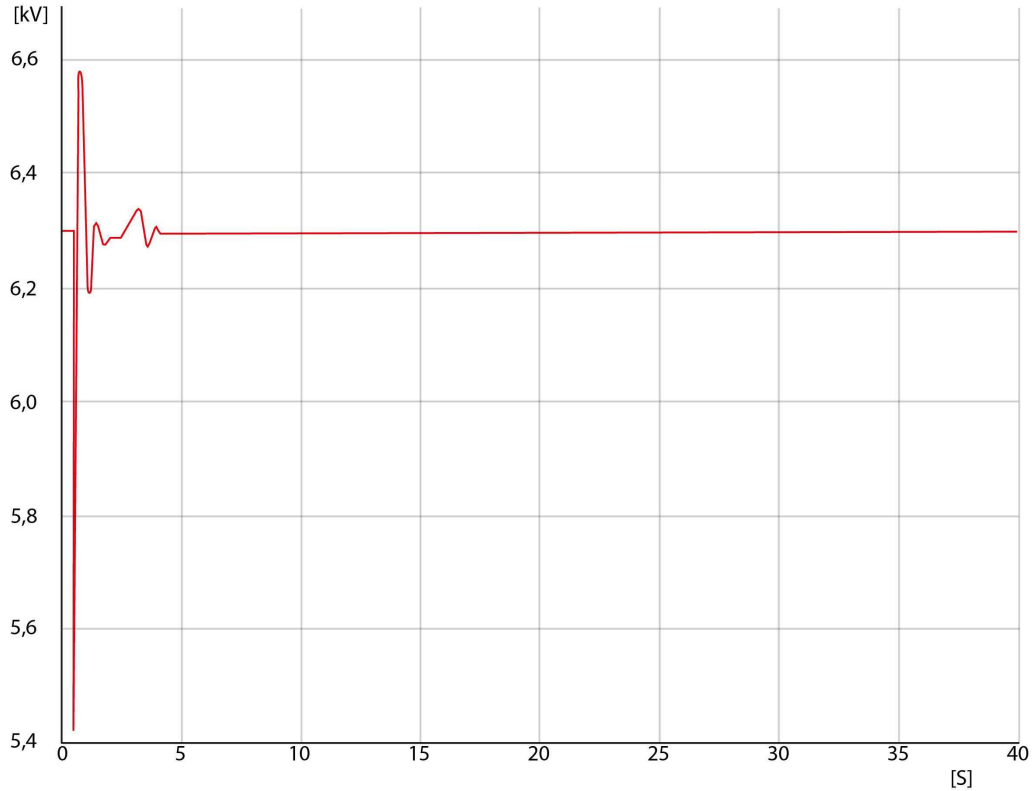


Obr. 5.6.4 Počátek průběhu simulované frekvence – druhá varianta

Frekvence na počátku přechodového jevu má tendenci ke kmitání, ovšem vznikající kmity jsou rychle zatlumeny zřejmě vlivem činných složek odporu alternátoru, především tlumicích obvodů.



Obr.5.6.5 Výsledný průběh simulovaného napětí generátoru-druhá varianta



Obr.5.6.6 Výsledný průběh simulovaného napětí VS za transformátorem – druhá varianta

Z grafu zobrazujícího průběh napětí generátoru, lze odečíst maximální hodnotu vzniklého přepětí tj. 14,7 kV. Napětí poklesne maximálně na hodnotu 14,1 kV.

Zároveň z průběhů napětí usuzuji, že zákmity na křivkách napětí jsou velmi rychle utlumeny účinkem činných odporů v tlumících obvodech alternátoru, samozřejmě též vlivem činné složky impedance transformátorů, dále pak na odporu vedení. Z těchto důvodů by zřejmě ke spuštění ochran nedošlo i z důvodu nesplnění časových podmínek.

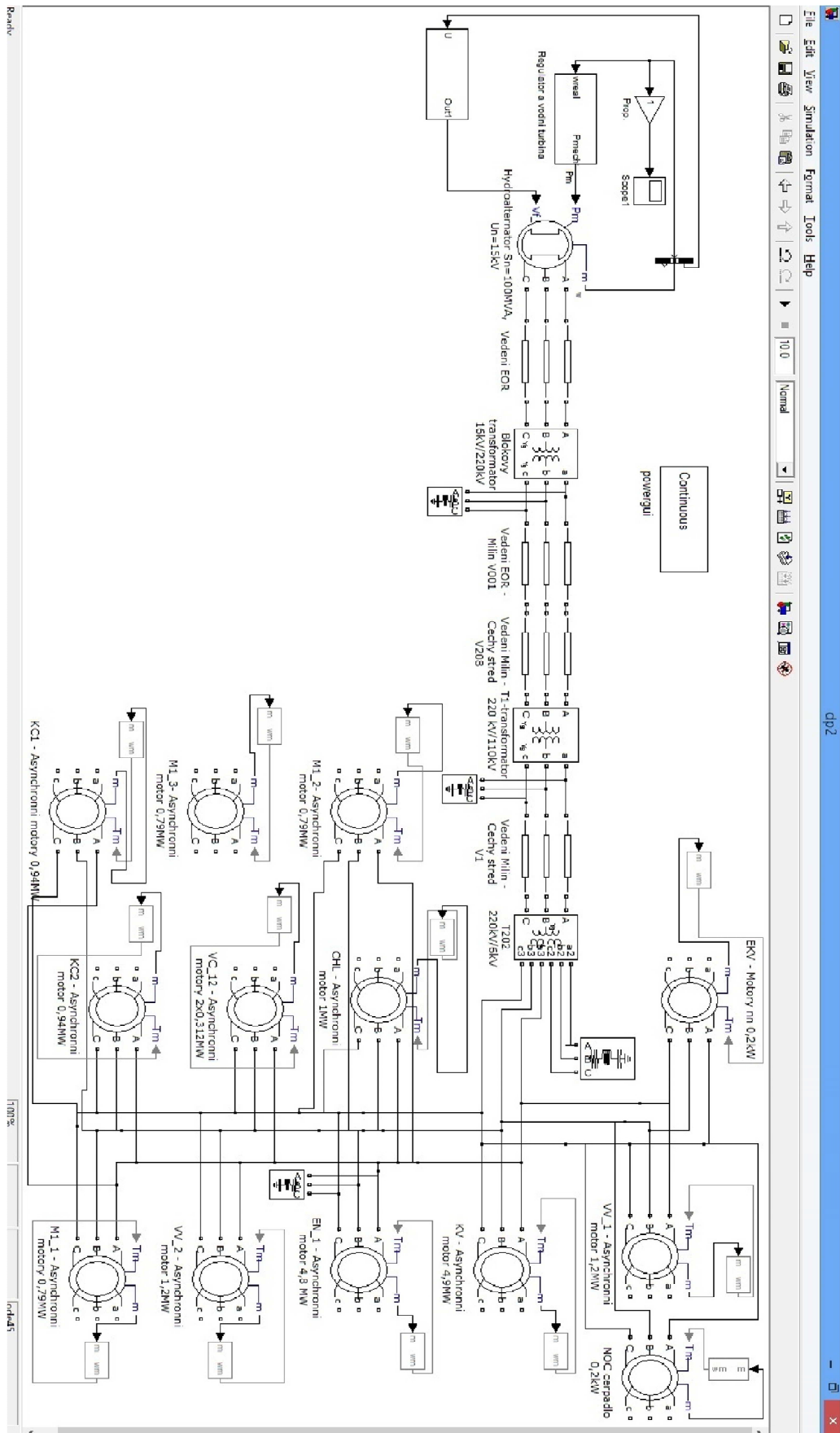
5.6 Model s rozběhem všech pohonů ECHV

Pro úplnost provádím simulaci i ve variantě, která se logicky nabízí. Totiž simulaci rozběhu vlastní spotřeby jednoho bloku elektrárny Chvaletice, kdy uvažuji variantu s rozběhem všech pohonů vlastní spotřeby. Generátor postupně nabuzen a běží na jmenovitém napětí VS, připojen do vyčleněné trasy. Tento model se téměř blíží reálné situaci, nicméně je poměrně složitý a náročný na výpočetní výkon.

Trasu pro modelovanou situaci sestavuji stejným způsobem (tj. z rozvodny Milín se převádí výkon po trase 220kV do rozvodny Čechy-střed, dále do rozvodny Opočíněk2. Odtud VVN transformátor po linkách 110 kV přes rozvodnu Opočíněk1 podává výkon na VN transformátor na rozvodně Chvaletice k obnově vlastní spotřeby bloku tepelné elektrárny Chvaletice (ECH) viz obr. 4.4.2). Tabulka na obrázku 5.5.1 pak uvádí uvažované asynchronní motory vlastní spotřeby rozbíhané na bloku elektrárny Chvaletice.

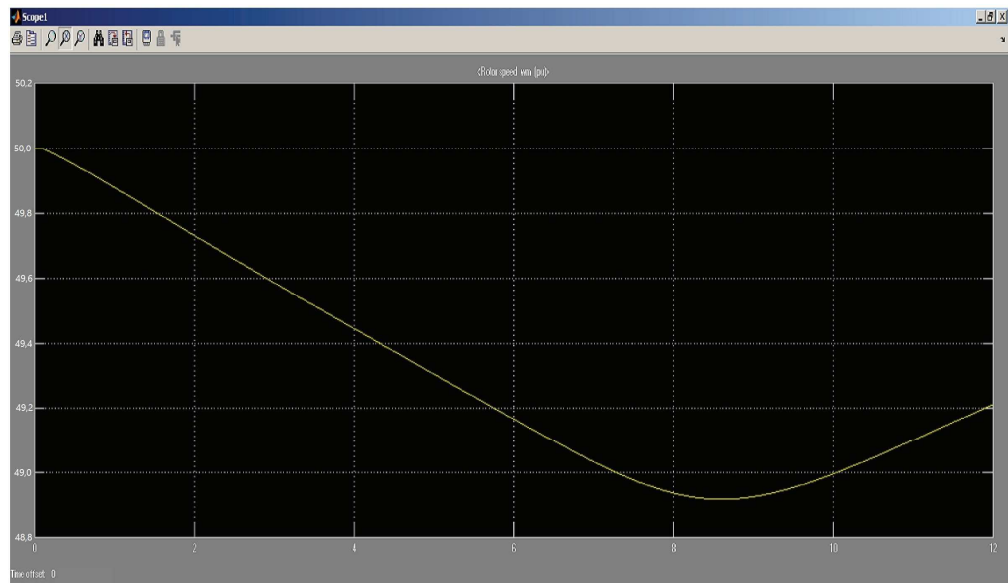
5.6.1 Kritéria hodnocení simulace druhé varianty a popis třetího simulovaného modelu

Opět při kontrole výsledků simulace vycházím z kodexu PS. Hodnocení provádím podle stejné metodiky jako u předchozích modelů. Pro sestavení modelu používám opět modely transformátorů, generátoru a asynchronních motorů, stejným způsobem jako u předchozích variant. Sestavený model v prostředí Simulink představuje obr.5.7.1. Parametry generátoru zobrazuje tabulka 5.5.6. a parametry trasy tabulka 5.5.7.



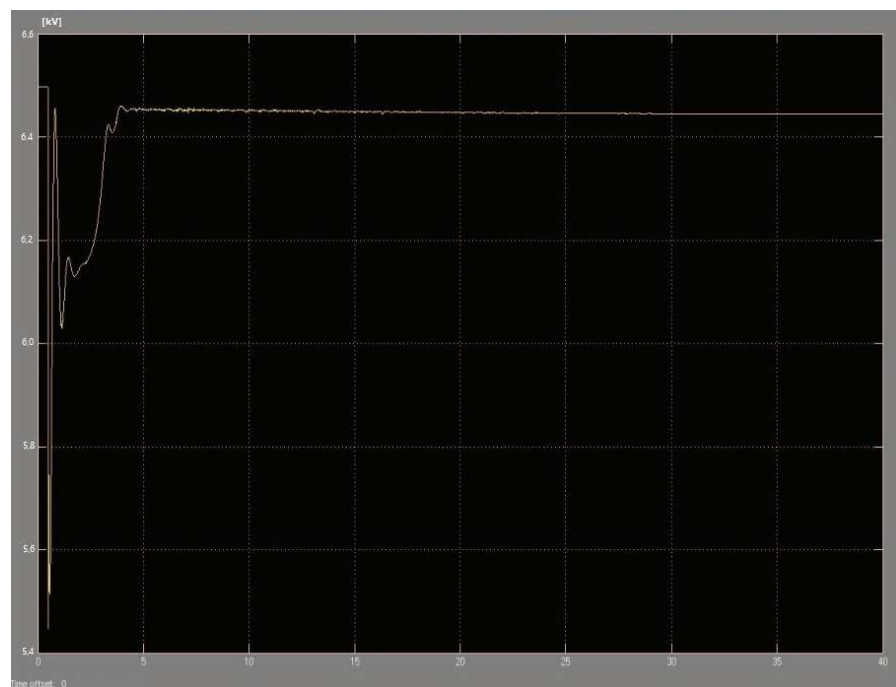
Obr.5.7.1 Simulační model poslední varianty

Výsledný průběh frekvence simulované situace znázorňuje obr.5.7.2

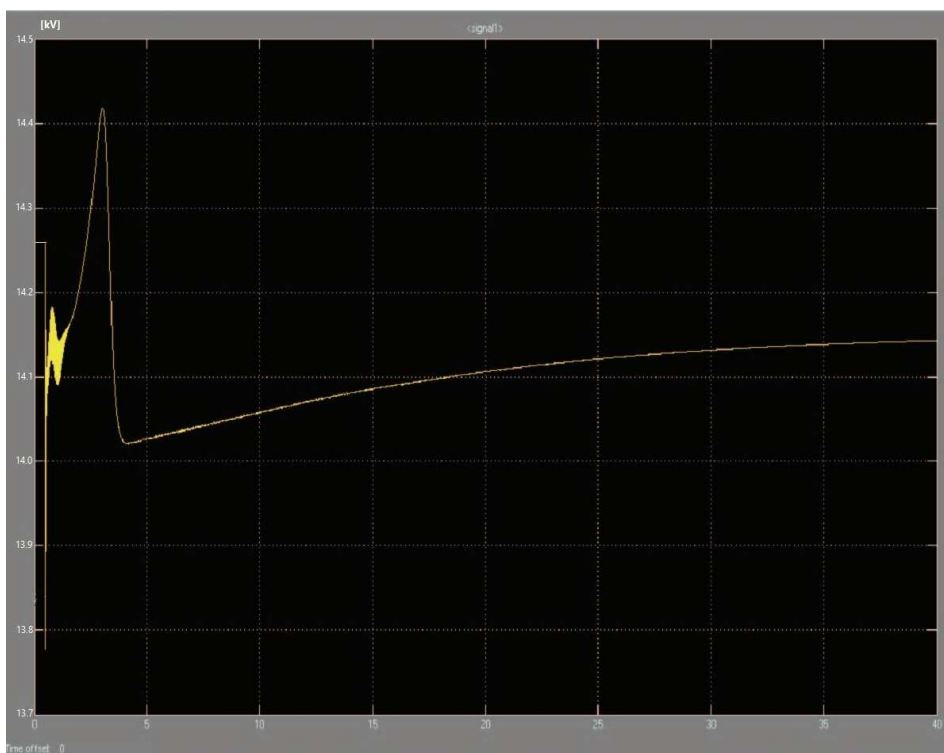


Obr.5.7.2 Průběh simulované frekvence – třetí varianta

Z grafu na obr.5.7.2 lze odečíst, že maximální frekvenční odchylka $\Delta f_{\max} = 1,2$ Hz nevybočuje z mezí povolených pro start ze tmy v souladu s kodexem přenosové soustavy.



Obr.5.7.3 Výsledný průběh simulovaného napětí VS za transformátorem – třetí varianta



Obr.5.7.4 Výsledný průběh simulovaného napětí generátoru – třetí varianta

Z grafu na obr.5.7.3. odečteme odečíst maximální hodnotu vzniklého přepětí tj. 14,45 kV.. Na začátku přechodového jevu se objevují tendence ke kmitání. Tyto kmity utlumí velmi rychle amortizér synchronního stroje.

Dále vidíme, že napětí sice poklesne maximálně na hodnotu 13,8 kV, ale pouze na velmi krátkou dobu. Můžeme vyslovit závěr, že podpět'ové ochrany nebudou působit.

Odečtením z grafu na obr. 5.7.4 zjistíme, že napětí klesne až k hodnotě 5,5 kV, ale opět tento pokles trvá velmi krátkou dobu. Malé zákmity na křivce napětí jsou rychle tlumeny zřejmě činnými odpory ve vinutí motorů.

6 Ověření funkčnosti provozních plánů elektrárny Orlík při startu ze tmy

6.1 Stručný výtah z provozní instrukce ČEPS

Tento výtah z provozní instrukce popisuje postup obnovy napájení vlastní spotřeby elektrárny Chvaletice (VS ECH) z vodní elektrárny Orlík (EOR) při poruše typu black-out. Provozní instrukce předpokládá celou přenosovou soustavu nebo alespoň její významnou část

ve stavu bez napětí. Dále se předpokládá podání napětí z elektrárny Orlicko po trase uvedené na obr.4.4.2 pro obnovu vlastní spotřeby elektrárny Chvaletice.

Elektrárna Orlicko jako první krok zahájí rozběh vybraného hydrogenerátoru, dále EOR provádí zapnutí příslušného generátorového vypínače v EOR. Ve dvou etapách se dále provádí nabuzení výše vybraného hydrogenerátoru. Prvá etapa nabuzení končí při dosažení 50% U_{gn} , potom se provádí nabuzení až na hodnotu 95% U_{gn} . Zároveň s nabuzováním generátoru se provádí v uzlových bodech trasy kontrola napětí, které by nemělo překročit hodnotu 239 kV. Elektrárna Chvaletice provádí postupné najíždění pohonů vlastní spotřeby vybraného generátoru. Elektrárna Chvaletice sleduje napětí a v případě potřeby požádá o korekci napětí EOR. Po každém najetí spotřebiče vlastní spotřeby ECH se zkontrolují sledované parametry celého ostrova. Dle sledovaných kritérií se hodnotí úspěšnost postupu.

Sledované parametry vychází z nastavení podpětových ochran a frekvenčního plánu ČEPS, nesmí překročit meze normálního provozu vodních elektráren. Tyto uvádí tabulka 6.1.

Sledované parametry black startu			
Podpětová ochrana		Povolená doba [s]	Max.podpětí [k]
	1.stupeň	6	4,8
	2.stupeň	2	3,9
		Horní mez [Hz]	Dolní mez [Hz]
Odchyšky frekvence		-1,5	+0,5

Tab. 6.1 Nastavení stupňů podpětové ochrany a frekvenční meze

Po úspěšném najetí vlastní spotřeby se zahájí fáze přípravy najetí vybraného generátoru ECH. Po dosažení provozních parametrů vybraného generátoru ECH bude dotyčný blok připojen generátorovým vypínačem k energetické soustavě v rozvodně Týnec. Další generátory ECH lze najíždět pomocí provozovaného generátoru ECH přes jednu přípojnicí a jeden transformátor 400/110 k v rozvodně Týnec nebo z blokového transformátoru 110 kV/6kV.

6.1.1 Předpoklady funkčnosti provozních plánů

Provozní plány předpokládají předem připravenou a sepnutou trasu, doporučují při vzniku negativních spínacích procesů proceduru startu ze tmy přerušit a začít znovu. Zvolené modely vyhovují pro ověření provozních plánů elektrárny Orlicko, jak bude dále zdůvodněno.

6.1.2 Ověření funkčnosti provozních plánů vzhledem k prvnímu modelu

Z obr. 5.5.8 a obr. 5.5.9 lze usuzovat, že kritéria najíždění vlastní spotřeby ECH jsou splněna. Maximální odchylka frekvence $\Delta = 0,95$ Hz se nachází v tolerančních mezích pro start ze tmy, rovněž pokles napětí při startu $\Delta U_{gmax} = 900$ V (6,5% z U_{gn}) nastává po dobu 500ms. To znamená, že podpěťová ochrana vlastní spotřeby elektrárny Orlík nebude působit. Přepěťová ochrana též nevybaví, protože maximální napětí 14,8 kV nedosahuje úrovně maximálního dovoleného přepětí 16,3 kV.

Obecná nevýhoda zmíněné situace spočívá v uvažování sice největšího, ale pouze jednoho spotřebiče vlastní spotřeby startující elektrárny. Uvažovaná taktika připnutí roztočeného nenabuzeného stroje k připravené trase bez napětí, eliminuje na jedné straně ferorezonance, ale zároveň se snižuje přesnost dosažených výsledků.

6.1.3 Ověření funkčnosti provozních plánů vzhledem k druhému modelu

Druhý příklad, ve kterém jsem prováděl základní simulace v prostředí Simulink PowerSystems kalkuluje s čtyřmi největšími pohony ve vlastní spotřebě startující elektrárny. Tím eliminuji obecnou nevýhodu prvního uvažovaného modelu.

Jak vyplývá z grafů uvedených na obr. 5.6.3 a na obr. 5.6.4 odchylka frekvence zůstala v mezích stanovených pro normální provoz vodních elektráren (48,5-50,5 Hz). Z grafu zobrazujícího průběh napětí generátoru lze odečíst maximální hodnotu vzniklého přepětí tj. 14,7 kV. Lze nahlédnout dle obr. 5.6.5, že maximální hodnota napětí nedosahuje hraniční hodnoty pro působení přepěťové ochrany 16,3kV. Z hlediska případného vybavení frekvenčních či přepěťových ochran proběhne blackstart bez problémů. Podpěťové ochrany též nebudou působit, napětí poklesne maximálně na hodnotu 14,1 kV.

Odečtením z grafu na obr. 5.6.6 zjistíme, že nebude působit podpěťová ochrana 6 kV ve vlastní spotřebě startované elektrárny. Automatika ochrany spouští první stupeň chránění při poklesu napětí pod $0,8 \cdot U_{gn}$ po dobu 1s, druhý stupeň při poklesu pod $0,65 \cdot U_{gn}$ po dobu 2s. [8]

6.1.4 Ověření funkčnosti provozních plánů vzhledem k třetímu modelu

Jak vyplývá z grafů uvedených na obr. 5.7.2 a na obr. 5.7.4 odchylka frekvence zůstala v mezích stanovených pro provoz vodních elektráren. Dále odečtením z grafu na obr. 5.7.3 pro

napětí zjistíme, že maximální vzniklé přepětí nedosahuje k hranici pro spuštění přepětíové ochrany. Též automatiky ochrany ve vlastní spotřebě startované elektrárny nebude působit, napětí klesá k hodnotě 5,5 kV, ale pouze po krátkou dobu.

6.2 Zhodnocení

Protože připravené provozní plány startu elektrárny Orlík předpokládají připojení roztočeného stroje k sepnuté trase a jeho postupné přibuzování až ke jmenovitému napětí. Vezmu-li tuto skutečnost do úvahy lze skutečně připnutí postupně nabuzovaného alternátoru k připravené trase akceptovat jako přijatelnou míru zjednodušení. Tato obecná nevýhoda všech simulovaných variant sice částečně eliminuje rizika vzniku ferorezonancí, nicméně výsledky simulace vyhovují stanoveným požadavkům. Lze tak konstatovat, že provozní plány ČEPS pro start ze tmy při dodržení předpokladů startu vyhovují pro stanovená frekvenční a napěťová kritéria.

7 Závěr

Zmenšení rizika black-outu při provozování menších lokálních zdrojů se ukázalo již v roce 1965 v New Yorku. Město New York a přilehlá velká území zůstala celou noc bez elektrické energie a přitom některá města v okolí napájená z menších zdrojů spíše lokálního charakteru zůstala po rozpadu soustavy napájena z těchto zdrojů v ostrovním režimu.

Jak již bylo uvedeno, je část elektrizační soustavy v ČR starší 40 let, ale protože soustava byla budována jako dostatečně robustní, usuzuji na nízkou pravděpodobnost velkého dlouhodobého black-outu. Dále při pohledu na výše uvedený souhrn velkých black-outů v Evropě je zřejmé, že výpadky dodávek elektrické energie jsou spíše krátkodobé. I největší zatím zaznamenaný celosvětový výpadek dodávky elektrické energie v Indii netrval dále než jeden den. Takovou dobu je například většina moderních chladniček a mrazniček schopna překlenout bez rizika zkažení potravin. Pravděpodobnější než totální black-out je rozpad elektrizační soustavy na samostatné ostrovy, k čemuž v minulosti došlo jak v rámci české přenosové soustavy, tak v rámci Evropy.

Po analýze velkých výpadků elektrické energie lze dojít k závěru, že nejčastější příčinou byla chyba obsluhy nebo dlouhodobé provozování sítě na samé hranici maximální přenosové kapacity. V případě výpadku velkého zdroje (blok jaderné či velké tepelné elektrárny) máme k dispozici zálohu primární či sekundární regulace, případně lze situaci řešit nákupem

elektrické energie propojené zahraniční energetické soustavy. I případnou poruchu na vedení VVN by energetická soustava ČR zvládla. Co by ovšem velmi pravděpodobně vedlo k rozpadu sítě, je sled dvou a více poruch v rychlém sledu, kdy čas na dispečerskou reakci je poměrně krátký. Obvykle musí reagovat během několik málo minut.

Jak napovídá kapitola popisující simulační výpočty, přináší tato technika několik výhod. Obvykle nám simulační výpočty přinášejí poměrně přesné a prakticky použitelné výsledky. Výsledky ze simulací lze získat bez složitého, pracného a mnohdy nemožného vyčleňování částí energetické soustavy pro spouštění testů, měření přechodných dějů.

V kapitole zabývající se riziky při obnovení napětí po výpadku přenosové sítě, jsem provedl simulace startu ze tmy do ostrovního režimu elektrárny Orlík a podání výkonu pro obnovení vlastní spotřeby tepelné elektrárny Chvaletice. Obnova provozu energetické soustavy po black-outu je podstatná systémová služba. Tyto služby jsou placené a zajišťované provozovatelem přenosové soustavy. Zkoušení najetí ze tmy (blackstart) představuje za běžného provozu energetické soustavy jisté riziko. Zároveň provádění takových testů bývá i velmi organizačně náročné. Provedení simulačních výpočtů před spuštěním testů snižuje náklady na tyto práce. Provedení simulací pomáhá odhalit případné problémy, které se při provádění zkoušek objevují jako např. napěťový nebo frekvenční kolaps nebo přepětové namáhání zařízení VVN. V diplomové práci provádím tři příklady takových výpočetních modelací pro případ najetí vlastní spotřeby velké tepelné elektrárny. Výhoda simulačního modelu spočívá v možnosti provést výpočty bez nutnosti provádět měření na vyčleněné části přenosové sítě. Též výhodná je podobnost simulovaného stavu tj. předem připravená a sepnutá trasa a postupně přibuzovaný generátor s připravenou provozní instrukcí. Ovšem první simulační model nemodeluje spínací pochody a nepostihuje případné elektromagnetické přechodné jevy, čímž úplně neodpovídá fyzikální realitě. Nepřesnost výše uvedeného simulačního modelu spočívá také v uvažovaném spotřebiči na vlastní spotřebě. Zde je uvažován pouze jeden, a to největší spotřebič, reálně se spotřebiče VS rozjedou postupně ve stanoveném pořadí.

Druhý simulovaný model se již více blíží fyzikální realitě počítá téměř se 75% výkonu potřebného k pokrytí VS. Simulovaná situace kalkuluje se čtyřmi asynchronními motory na vlastní spotřebě startované elektrárny. Ovšem i zde neuvažují spínací pochody, čím se model liší od reálné situace. Lze konstatovat, že takováto míra nepřesnosti se jeví jako přijatelná vzhledem k ověřovaným provozním plánům. Jedním z předpokladů provozních plánů blackstartu je postupný rozběh spouštěných pohonů. Podle těchto předpokladů podává elektrárna Orlík výkon s postupným nabuzováním generátoru do předem připravené trasy.

Poslední model se téměř blíží realitě uvažuje se všemi pohony VS, ale opět nerespektuje spínací pochody.

Ve všech simulovaných variantách průběh sledovaných veličin startu ze tmy ukazuje splnění sledovaných kritérií tj. frekvence a napětí. Závěrem lze tedy konstatovat, že provozní plány black-startu byly ověřeny.

Použitá literatura

- [1] CAHA, Zdeněk. *Elektrické pohony*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1990, 359 s. ISBN 80-030-0418-7.
- [2] PRAŽSKÁ ENERGETIKA a.s.: PRE energetická společnost. *Pražská energetika a.s.* [online]. ©1998 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://www.pre.cz/velkoodberatele/prehled-2011/vitejte-ve-tme-zvane-blackout.html>
- [3] TZB-INFO [online]. 2013 [cit. 2013-05-25]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://oze.tzb-info.cz/9517-blackout-a-obnovitelne-zdroje-energie>
- [4] MÜHLBACHER, Jan. *Metody řešení přechodných jevů v elektrizačních soustavách I*. 1.vydání. Plzeň: ZČU, 2003. 165 s. ISBN 80-7082-087-X.
- [5] SCHEJBAL, Konstantin; Jiřina MERTLOVÁ. *Elektroenergetika II: 1.část*.1.vydání Plzeň: ZČU, 1998. 124 s. ISBN 80-7082-451-42.
- [6] MERTLOVÁ, Jiřina; Konstantin SCHEJBAL. *Rozvodná zařízení*.1.vydání Plzeň: VŠSE, 1990. 302 s. ISBN 80-7082-017-9.
- [7] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vydání Plzeň: ZČU, 2006. 230 s. ISBN 80-704-3509-7.
- [8] RUSŇÁK, Štěpán; Petr ŘEZÁČEK. *Elektrické přístroje 1*. 2. přeprac. vydání Plzeň: ZČU, 2001. 155 s. ISBN 80-708-2825-0.
- [9] THE MATHWORKS, Inc.: *Mathwork – mathematica computing*: [online]. © 1994-2013 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com>
- [10] KRAUSE, Paul C, Oleg WASYNCZUK a Scott D SUDHOFF. *Analysis of electric machinery and drive systems*. 2nd ed. New York: IEEE Press, 2002, xiv, 613 s. ISBN 978-0-471-14326-0.
- [11] ČEPS a.s.: *ČEPS a.s.: Česká energetická přenosová soustava* [online]. ©2011. [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: www.ceps.cz
- [12] HUMUSOFT s.r.o.: *Humusoft – podpora software* [online]. ©2008- 2013 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://www.humusoft.cz/produkty/matlab/simulink/>
- [13] MÁSLA, Karel, Karel WITNER, Andrew KASEMBE, Lubomír KOČIŠ a Martin ŠVANCAR. *ELECTRIC POWER ENGINEERING 2007: Výpočet přechodných dějů při startu ze tmy z elektrárny Orlik* [online]. 2007, s. 16 [cit. 2013-05-25]. Dostupné z: <http://www.modesinfo.com/documents/EPE2007StartZeTmy.pdf>
- [14] THÖNDEL, Evžen.. *KONFERENCE TECHNICAL COMPUTING PRAGUE 2006 : SIMULAČNÍ MODEL ASYNCHRONNÍHO STROJE* [online]. 2006, s. 10 [cit. 2014-11-18]. Dostupné z: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB06/prispevky/thondel/thondel.pdf
- [15] SCHEJBAL, Konstantin. *Energetika.pdf*. Plzeň, 2010. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~nohac/EE1/Energetika.pdf>.] Základní pomocný text přednášek Doc. Schejbala. Fakulta elektrotechnická, Západočeská univerzita. Vedoucí práce doc.Ing.Konstantin Schejbal, Csc.
- [16] NOHÁČ, Karel. Stranka venovana pedagogicke cinnosti Karla Nohace. *Modelování asynchronních strojů ve fázových souřadnicích a,b,c* [online]. 2009, s. 37 [cit. 2014-11-19]. Dostupné z: http://home.zcu.cz/~nohac/Asynchr_stroj/Asynchr_stroj.htm
- [17] J.KUBÍN, *Autoreferát disertační práce*.©2006 [cit. 2014-09-25].Dostupné z :http://www.fm.tul.cz/files/autoreferat_kubin.pdf

- [19] HROMADA, Adam. Adams: *Historie vodních děl*. [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://www.tv-adams.wz.cz/prehrada_orlik.html
- [20] BÁTORA, Branislav. *Analýza ferorezonančních přepětí v elektrických sítích*. [online]. s. 31 [cit. 2015-04-20]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/25133>
- [21] MÁSLA, Karel, *Model asynchronního motoru pro dynamické výpočty* [online]. ©2011. [cit. 2013-05-]. Dostupné z: http://www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/Documents/ref12_Asmotor.pdf
- [22] Region Český Krumlov: *Historie vodní elektrárny Lipno*. [online]. [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://www.ckrumlov.info/img.php?img=6737&LANG=cz>
- [23] Informace pro studenty: *Měření a regulace*. DOC. ING. EMIL DVORSKÝ, CSc. Informace pro studenty [online]. [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://home.zcu.cz/~dvorsky/>
- [24] WAMS systémy pro monitoring elektrizační soustavy. In: *All for power* [online]. [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2011/wams_alstom.pdf
- [25] Skupina ČEZ: *Výzkum a vzdělávání*. [online]. [cit. 2015-04-28]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/vyzkum-a-vzdelavani/pro-zajemce-o-informace/historie-a-soucasnost/vyznamna-data.html>
- [26] TŮMA, Jiří. *Spolehlivost v elektroenergetice*. 1. vyd. Praha: ČVUT, [2006?], 291 s. ISBN 80-239-6483-6.
- [27] ORÁLEK, Petr. Energy Outlook: *Energy Outlook 2013*. [online]. s. 45 [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.cez.cz/cs/energy-outlook-2013.html>
- [28] ČEPS: *Mimořádná situace v PS ČR vlivem enormní výroby ve větrných parcích v Německu na přelomu roku 2014/2015*. In: [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: http://www.ceps.cz/CZE/Media/Studie-analyzy/Documents/Analyza_mimoradna_situace_PSCR_2015.pdf