### BlackStart jako zvláštní případ ostrovního provozu

### Ing. Petr Neuman, CSc.<sup>1)</sup>, Ing. Zdeněk Hruška<sup>1)</sup>, Ing. Pavel Hrdlička<sup>2)</sup>, Bc. Martin Příhoda<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> ČEPS, a.s., Elektrárenská 774/2, Praha 10 <sup>2)</sup> Elektrárna Opatovice, Pardubice

#### Abstrakt:

Příspěvek rozšiřuje problematiku řešení simulačních výpočtů elektromechanických přechodových dějů při realizaci startu ze tmy (BlackStart). Předpokladem provádění komplexních výpočtů a simulací přechodových dějů v PS je existence a dostupnost výkonných SW výpočetních a simulačních prostředků, jakými je mezi jinými také použitý MATLAB – SIMULINK -SimPowerSystems. Elektromechanické a elektromagnetické přechodné děje jsou simulovány na příkladu BlackStart.

V prvním příkladě jsou elektromechanické a elektromagnetické přechodné děje simulovány v rámci procesu BlackStart, tj. najetí vlastní spotřeby (VS) jaderné elektrárny Temelín (ETE) pomocí vodní elektrárny Lipno (ELI). Zde byla simulačně ověřována strategie eliminující vznik ferorezonance a vlastních kmitů při spínacích operacích pod napětím.

V druhém příkladě jsou provedeny simulační výpočty přechodných dějů při najetí vlastní spotřeby bloku Elektrárny Opatovice, při podání napětí z malé vodní elektrárny Práčov, přes rozvodnu Opičinek 110 kV. Vodní elektrárna VE Práčov je zapojena v distribuční síti 35 kV. Byly provedeny simulační výpočty přechodných dějů a vyhodnocena schopnost najetí EOP. Simulační výpočty byly také realizovány v Toolboxu SimPowerSystems, v režimu "fázorové" simulace.

Cílem řešení celé problematiky je ověřit funkčnost připravených provozních plánů ČEPS, k čemuž slouží provádění zkoušek za běžného provozu. Pro minimalizaci rizik při těchto zkouškách je však vhodné a v současnosti téměř nezbytné provádění simulačních výpočtů před provedením vlastních zkoušek v reálném provozu.

#### ÚVOD

Příspěvek rozšiřuje problematiku řešenou v článku [1], ve kterém byly publikovány simulační výpočty elektromechanických přechodových dějů při realizaci startu ze tmy (blackstart). Související elektromagnetické přechodové děje byly dosud pro ČEPS prováděny externí organizací [2]. Rozdělení těchto dvou dějů a jejich samostatné a nezávislé výpočty mohou způsobit zanedbání některých důležitých souvislostí a tím prakticky snížit přesnost dosažených výsledků. Rozdělením na dva nezávislé výpočty se zanedbá řada dějů probíhajících v rozsáhlých nelineárních soustavách [3], jakými nesporně elektrizační přenosové a distribuční soustavy jsou. Rozdělením dojde k zanedbání určitých rezonancí a vlastních kmitů, vyšších harmonických, určitých neperiodických a potenciálně nestabilních dějů, apod.

### II. SEPARÁTNÍ PROVOZ ELI - ETE

I.

Pro elektrické spojení elektrárny Lipno a Temelín byla využita distribuční síť 110 kV viz. Obr. 1. Na základě předběžných výpočtů byla zvolena strategie připnutí roztočeného nenabuzeného stroje k celé trase, která se nacházela v beznapěťovém stavu.

Po sestavení trasy byl generátor nabuzen postupným ručním zadáním žádaného svorkového napětí až na hodnotu 95% Un. Tento postup eliminoval vznik ferorezonance a vlastních kmitů při spínacích operacích pod napětím. Cílem simulace bylo ověřit, zda během zatěžování stroje VE Lipno nedojde k překročení limitních hodnot napětí a frekvence. Přičemž při překročení zadaných mezí dojde k zapůsobení ochran a k odstavení hydroalternátoru.



Obr. 1 Schéma napájecí trasy separátu ELI – ETE – zjednodušené jednopólové schéma

### III. ZJEDNODUŠENÝ MODELIJA SIMULACE BLACKSTARTU

Prvním příkladem je zjednodušený model vytvořený v simulačních prostředcích SimPowerSystems, s jedním asynchronním motorem na vlastní spotřebě ETE – viz Obr.2. Při sestavování modelu byly využity vybrané standardní bloky z knihovny Toolboxu SimPowerSystems. Kromě jiných bloků byl využit model synchronního stroje s vyniklými póly, asynchronního motoru a transformátoru. K modelu generátoru byl sestaven regulátor otáček a napětí – viz Obr.3. Současně byl vytvořen model vodní turbíny s nepružným vodním sloupcem pomocí subsystémů v Simulinku.



Obr. 2 Principielní schéma regulátoru otáček



Obr. 3 Průběh simulované frekvence







Obr. 4 Celkový model separátu v programu SimPowerSystems



Obr. 6 Vybraný počáteční úsek průběhu simulovaného proudu ve fázi A

Z průběhu na Obr. 6 je vidět výskyt vyšších harmonických v průběhu proudu. V programu MATLAB – SIMULINK však přímo existují již uživatelsky připravené SW nástroje, kterými lze časový průběh veličiny filtrovat a identifikovat vyskytující se vyšší harmonické. Například zajímají-li nás 2. až 5. harmonická, lze pro zjištění jejich výskytu použít zaintegrovaný Kalmanův filtr 11.řádu.

Axidabi Wasarmets Subscriptions Subscription	Hép		_	_	_	_			
Di Territer Schellender 9 Di Territer Schellender 9 Di Territer Schellender 9 Di Territer Schellender 9 Don Reper 1/ Mitteldissonett Oce		Available Measurem	ents		Selected Nessurements				
Update 000000	2: Une-Share Statust / Industry 1: There-Base Scatters / Industry 2: There-Base Scatters / Industry 3: There-These Sca			ی ب	33 18 00m 4/.	in: Receiviant Benderd, dinater B		3	
		Update Octocitiyor= <mark>Comple</mark>						Occe	

Obr. 7 Okno pro parametrizaci osciloskopu SIMULINK



Obr. 8 Jeden z typů záznamu průběhu proudů ve třech fázích a odpovídající schéma SimPowerSystems



Obr. 9 Detailnější záznam průběhu proudů ve třech fázích



Obr. 10 Jiný typ záznamu průběhu proudů ve třech fázích

# IV. REALISTICKÝ MODEL VLASTNÍ SPOTŘEBY ETE A SIMULACE SPÍNACÍCH PROCESŮ

Druhým příkladem na kterém byly provedeny základní simulace je podrobnější model SimPowerSystems s pěti asynchronními motory na vlastní spotřebě ETE – viz následující Obr.11.



Obr. 12 Průběh simulované frekvence v rozšířeném modelu ELI – ETE



Obr. 11 Rozšířený model separátu ELI - ETE v programu SimPowerSystems



Obr. 13 Počáteční úsek průběhu simulované frekvence separátu ELI – ETE

Na tomto druhém příkladu byly simulovány rovněž zapínací procesy, a to pro jinou variantu Blackstart, než v reálné provozní zkoušce použitá varianta popsaná v úvodu kapitoly 2. Připomínáme že u první varianty je trasa předem sepnuta a generátor je postupně nabuzován až na hodnotu 95 % jmenovitého napětí Un. Přitom nedochází k žádným vypínacím či spínacím procesům a pokud by k takovým došlo, doporučuje se zkoušku přerušit a začít znovu od začátku. Takový postup je sice nejbezpečnější, ale přitom je nejvíce vzdálen běžným provozním podmínkám.

Proto byla simulována i varianta, kdy generátor je nabuzen a provozován při plném jmenovitém napětí na vlastní spotřebě a trasa je k němu postupně připínána. Obecně pojmenovanou nevýhodou je, že tento postup neeliminuje možný vznik ferorezonance a vlastních kmitů při spínacích operacích pod napětím.

Na následujících obrázcích nyní uvedeme vybrané typické průběhy, které dobře dokumentují uvedený cíl této podkapitoly.



Obr. 14 Časový průběh zapínacích proudů až do ustáleného stavu



Obr. 15 Počáteční časový průběh zapínacích proudů v přechodovém úseku



Obr. 16 Časový průběh zapínacích proudů až do ustáleného stavu



Obr. 17 Počáteční časový průběh zapínacích proudů v přechodovém úseku

## V. SIMULACE NAJETÍ ELEKTRÁNY OPATOVICE

V Elektrárně Opatovice byly provedeny simulační výpočty přechodných dějů a vyhodnocena schopnost najetí EOP z jiného zdroje. Údaje o trase VE Práčov – OPOČ – EOP je v následující tabulce.

TABULKA I

Predbezne udaje o generatoru	VE VE Placov
Sn [MVA]	13
Pn {MW]	9,75
Un [kV]	6,3
xd	1,13
xq	0,708
xd'	0,303
xd"	0,13
xq"	0,13
Td0'	7,55
Td'	0,84
Td"	0,04
Та	0,2
Tm [s]	3

TABULKA II
Předběžné údaje o trase Práčov - Opatovice

	místo	R	Х	В	ost. Údaje
TR 6/35 kV	VE Práčov	0,013	0,264	0	uk=11%, 15 MVA, bráno ze strany 6 kV
VN 893	R35 Chrudim	1,5789	1,85	15,5	12 T-odboček, celkem 5 A tj cca 100 kVA
VN 841	R35 Tuněchody	2,14636	2,912	24,397	bez odboček
TR 35/110	R110 Tuněchody	0,13475	3,36875	0	uk=11%, 40 MVA, bráno z vn strany
V1131 (V1132)	R110 Opočínek	2,192375	7,138373	49,40736	možnost paralelního provozu
V1171 (V1172)	R110 EOP	1,05079	6,230376	48,20701	možnost paralelního provozu
T103	R6.3 EOP	2,26512	40,172	0	uk=8,3%, 25 MVA, bráno z vvn strany

## VI. SIMULAČNÍ VÝPOČTY

Simulační výpočty byly pro příklad najetí VE Práčov – OPOČ – EOP realizovány "fázorově" – viz Obr.18.



Obr. 18 Model separátu VE Práčov – EOP v programu SimPowerSystems



Obr. 19 Průběh elektromagnetického napětí Ef na generátoru Práčov



Obr. 20 Průběh mechanického výkonu Pm hydroturbíny Práčov





Obr. 22 Průběh otáček w generátoru Práčov



Obr. 23 Průběh výstupního napětí Ug generátoru Práčov



Obr. 24 Průběh napětí Utrf na transformátoru 6.3/37.5 kV Práčov



Obr. 25 Průběh napětí na lince 110 kV Tuněchody-Opočínek



Obr. 26 Průběh napětí na rozvodně R110 EOP



Obr. 27 Průběh činného výkonu P za transformátorem T101 110/6.3 kV vlastní spotřeby VS



Obr. 28 Průběh jalového výkonu Q za transformátorem T101 110/6.3 kV vlastní spotřeby VS



Obr. 29 Charakteristika P-Q vlastní spotřeby VS 6.3 kV elektrárny EOP



Obr. 30 Charakteristika Q-U vlastní spotřeby VS 6.3 kV elektrárny EOP





Obr. 32 Počáteční časový průběh napájecího napětí v přechodovém úseku



Obr. 33 Průběh simulovaných proudů až do ustáleného stavu



Obr. 34 Průběh simulovaných proudů v přechodovém úseku



Obr. 35 Průběh činného výkonu napáječky











Obr. 39 Průběh simulované odchylky otáček asynchronního motoru AM

# VII. ZÁVĚR

Schopnost startu ze tmy (BS) je podpůrnou službou (PpS) poskytovanou pro provozovatele přenosové soustavy ČEPS, a.s. Ojedinělou příležitostí ověřit funkčnost připravených plánů je provádění zkoušek za běžného provozu. Pro minimalizaci rizik při těchto zkouškách je vhodné provádění simulačních výpočtů před provedením zkoušek. Výpočty prověří, zda nedojde k nebezpečným jevům jako přepětí, frekvenční či napěťový kolaps. Lze tak nejen předejít poškození zařízení elektrické soustavy, ale především zabezpečit úspěšnou provozní realizaci a požadovanou certifikaci podpůrné služby BS.

### LITERATURA

- K. Máslo, Z. Hruška, A. Kasembe: Výpočty elektromechanických přechodných dějů. 10 mezinárodní vědecká konference Electric Power Engineering 2009, Dlouhé Stráně, květen 2009.
- [2] K. Máslo, K. Witner, A. Kasembe, L. Kočiš, M. Švancar: Výpočet přechodných dějů při startu ze tmy. 8. mezinárodní vědecká konference Electric Power Engineering 2007, Dlouhé Stráně, červen 2007.
- [3] P. Neuman: Dynamické modely vhodné pro simulaci elektrizační soustavy ve stavech blízkých kritickým pro analýzu i trénink dispečerů. Cyklus E2007, č.9, listopad 2007.