



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

# POROVNÁNÍ MODELŮ NAJÍŽDĚCÍCH TRAS SYSTÉMOVÉ ELEKTRÁRNY V PROGRAMECH MODES A PSCAD

MODEL COMPARISON OF RESTORATION PATHS FOR A SYSTEM POWER STATION IN MODES AND PSCAD

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Peterka

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

BRNO 2019



# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Michal Peterka

**ID:** 161242

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2018/19

## NÁZEV TÉMATU:

### Porovnání modelů najížděcích tras systémové elektrárny v programech MODES a PSCAD

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište problematiku obnovy přenosové soustavy a zdrojů se schopností startu ze tmy. Zaměřte se především na napěťové jevy typické pro obnovovací trasy a ostrovní provozy.
2. Popište výpočetní programy MODES a PSCAD.
3. Vytvořte model najížděcích tras Orlík – Chvaletice a Dlouhé Stráně – Chvaletice.
4. Proveďte analýzu napěťových poměrů na obou najížděcích trasách v MODES a PSCAD a proveďte jejich porovnání.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 4.2.2019

**Termín odevzdání:** 22.5.2019

**Vedoucí práce:** Ing. Michal Ptáček, Ph.D.

**Konzultant:**

**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

#### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Tato práce se zabývá porovnáním dvou najížděcích tras při startu ze tmy v simulačních programech MODES a PSCAD. Cílem bylo porovnat průběhy napětí v jednotlivých uzlech a systémovou frekvenci. Zároveň byly simulace porovnány i s reálnou zkouškou. Modely tras v programu MODES byly vytvořeny již dříve a úkolem bylo vytvořit stejné trasy v programu PSCAD při použití parametrů dostupných z MODESu. Modely tras v prostředí PSCAD zahrnovaly původní, ale i nové modely jednotlivých prvků, které musely být seskládány z funkčních bloků. Výsledky programů se mírně lišily, což bylo způsobeno především odlišnostmi některých prvků, které byly použity. V práci byly uvedeny všechny potřebné informace k tomu, aby byly simulace opakovatelné.

## KLÍČOVÁ SLOVA

MODES, PSCAD, simulace, najížděcí trasa, synchronní generátor, napětí, frekvence

## ABSTRACT

The thesis deals with the comparison of two restoration paths in case of the black start in the MODES and PSCAD simulation programs. The aim was to compare the voltage waveforms in individual nodes and the system frequency. At the same time, simulations were compared with a real test. The route models in the MODES program were created earlier and the task was to create the same routes in the PSCAD program using the parameters available from the MODES program. The route models in the PSCAD environment included both the original and the new models of individual elements, which had to be assembled from function blocks. The results of the programs differed slightly, which was caused mainly by the differences of some elements that were used. In the thesis, all the necessary information was stated to make the simulations repeatable.

## KEYWORDS

MODES, PSCAD, simulation, restoration path, synchronous generator, voltage, frequency

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Porovnání modelů najížděcích tras systémové elektrárny v programech MODES a PSCAD jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne:

.....

Podpis autora

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Michalu Ptáčkovi Ph.D. za odborné rady a vstřícnost při zpracování. Dále bych chtěl poděkovat odborníkům z firmy ČEPS za poskytnuté podklady a cenné rady, díky kterým jsem mohl tuto práci dokončit.

**OBSAH**

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>6</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>2 BLACKOUT.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 PROVOZ ES.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 PLÁN OBRANY PROTI PORUŠE .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3 OBNOVA PO PORUŠE.....</b>	<b>15</b>
<b>3 OSTROVNÍ PROVOZ .....</b>	<b>18</b>
<b>4 NAPĚŤOVÉ JEVY TYPICKÉ PRO OBNOVOVACÍ TRASY A OSTROVNÍ PROVOZY .....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 FEROREZONANČNÍ PŘEPĚTÍ .....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 SAMOBUZENÍ GENERÁTORU .....</b>	<b>22</b>
<b>4.3 FERRANTIHO JEV .....</b>	<b>22</b>
<b>5 NAJÍŽDĚCÍ TRASY PŘI STARTU ZE TMY .....</b>	<b>25</b>
<b>5.1 NAJÍŽDĚCÍ TRASA DLOUHÉ STRÁNĚ – CHVALETICE.....</b>	<b>25</b>
<b>5.2 NAJÍŽDĚCÍ TRASA ORLÍK – CHVALETICE .....</b>	<b>27</b>
<b>6 MODEL Y TRAS V PROSTŘEDÍ MODES .....</b>	<b>28</b>
<b>6.1 MODEL GENERÁTORU.....</b>	<b>28</b>
<b>6.2 ROVNICE SYNCHRONNÍHO STROJE .....</b>	<b>28</b>
<b>6.3 MODEL BUZENÍ A REGULÁTORU BUZENÍ.....</b>	<b>29</b>
6.3.1 MODEL BUDIČE .....	29
6.3.2 MODEL REGULÁTORU BUZENÍ .....	30
6.3.3 DOPLŇKOVÉ FUNKCE REGULÁTORU .....	31
<b>6.4 MODEL TURBÍNY A REGULACE TURBÍNY.....</b>	<b>32</b>
<b>6.5 MODEL TRANSFORMÁTORU A VEDENÍ.....</b>	<b>33</b>
<b>6.6 MODEL ZÁTĚŽE .....</b>	<b>34</b>
<b>7 MODEL Y TRAS V PROSTŘEDÍ PSCAD.....</b>	<b>36</b>
<b>7.1 MODEL GENERÁTORU.....</b>	<b>36</b>
<b>7.2 MODEL BUZENÍ A REGULÁTORU BUZENÍ.....</b>	<b>36</b>
7.2.1 MODEL BUDIČE .....	36
7.2.2 MODEL REGULÁTORU BUZENÍ .....	37
7.2.3 MODEL OMEZOVAČE PROUDŮ .....	38
7.2.4 MODEL SYSTÉMOVÉHO STABILIZÁTORU .....	39
<b>7.3 MODEL TURBÍNY A REGULACE TURBÍNY.....</b>	<b>39</b>
<b>7.4 MODEL TRANSFORMÁTORU .....</b>	<b>40</b>
7.4.1 PŘEPÍNAČ ODBOČEK .....	40
<b>7.5 MODEL VEDENÍ .....</b>	<b>40</b>

---

7.6 MODEL ZÁTĚŽE.....	41
8 VÝSTUP PROGRAMŮ .....	42
8.1 TRASA DLOUHÉ STRÁNĚ – CHVALETICE.....	42
8.1.1 REÁLNÁ ZKOUŠKA .....	44
8.2 TRASA ORLÍK – CHVALETICE.....	47
ZÁVĚR.....	50
POUŽITÁ LITERATURA .....	52
SEZNAM PŘÍLOH.....	54
A PARAMETRY ELEKTRÁRENSKÉHO BLOKU.....	55
B PARAMETRY TRANSFORMÁTORŮ A PŘEPÍNAČE ODBOČEK.....	65
C PARAMETRY VEDENÍ A ZÁTĚŽE .....	67
D SYMBOLIKA MEZI PROGRAMY.....	72
E SCHÉMA MODELŮ TRAS PSCAD.....	73

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1: Mapa přenosové soustavy ČR [25].</i>	11
<i>Obr. 2-1: Schéma přechodu mezi jednotlivými stavy včetně možných zásahů [3].</i>	15
<i>Obr. 2-2: Propojení ES ČR se zahraničím na úrovni 400 kV [1].</i>	17
<i>Obr. 4-1: Rozdělení přepětí podle příčiny vzniku [10].</i>	20
<i>Obr. 4-2: Náhradní schéma generátoru [11].</i>	22
<i>Obr. 4-3: Parametry vedení</i>	23
<i>Obr. 4-4: Schéma a fázorový diagram <math>\pi</math> článku při chodu naprázdno</i>	23
<i>Obr. 5-1: Schéma trasy Dlouhé Stráně – Chvaletice. Převzato a upraveno ze [12].</i>	25
<i>Obr. 5-2: Schéma trasy Orlik – Chvaletice. Převzato a upraveno ze [12].</i>	27
<i>Obr. 6-1: Budič AC_4, převzato a upraveno z [24].</i>	30
<i>Obr. 6-2: Budič DC_1, převzato z programu MODES</i>	30
<i>Obr. 6-3: Regulátor buzení, převzato a upraveno z [24].</i>	31
<i>Obr. 6-4: Omezovač statorového a rotorového proudu, převzato a upraveno z [24].</i>	31
<i>Obr. 6-5: Systémový stabilizátor [24].</i>	32
<i>Obr. 6-6: Model turbíny [24].</i>	32
<i>Obr. 6-7: Model regulátor vodní turbíny [24].</i>	33
<i>Obr. 6-8: Regulátor otáček vodní turbíny [24].</i>	33
<i>Obr. 6-9: Model ekvivalentního asynchronního motoru [24].</i>	34
<i>Obr. 7-1: Vnitřní struktura AC budiče</i>	37
<i>Obr. 7-2: Vnitřní struktura modelu DC budiče</i>	37
<i>Obr. 7-3: Vnitřní struktura regulátoru buzení</i>	38
<i>Obr. 7-4: Vnitřní struktura modelu omezovače proudů</i>	38
<i>Obr. 7-5: Vnitřní struktura modelu stabilizátoru</i>	39
<i>Obr. 7-6: Vnitřní struktura přepínače odboček</i>	40
<i>Obr. 8-1: Průběhy napětí uzlů v simulaci programu PSCAD trasy EDS – ECHV</i>	42
<i>Obr. 8-2: Průběhy napětí uzlů v simulaci programu MODES trasy EDS – ECHV</i>	42
<i>Obr. 8-3: Průběh frekvence v simulaci programu MODES trasy EDS – ECHV</i>	43
<i>Obr. 8-4: Průběh odchylky frekvence v simulaci programu MODES trasy EDS – ECHV</i>	43
<i>Obr. 8-5: Průběh napětí a frekvence reálné zkoušky. Převzato a upraveno ze [12].</i>	44
<i>Obr. 8-6: Průběh napětí simulace reálné zkoušky PSCAD.</i>	45
<i>Obr. 8-7: Průběh napětí simulace reálné zkoušky MODES.</i>	45
<i>Obr. 8-8: Průběh frekvence simulace reálné zkoušky PSCAD.</i>	46



---

<i>Obr. 8-9: Průběh odchylky frekvence simulace reálné zkoušky MODES.</i>	46
<i>Obr. 8-10: Průběhy napětí uzlů v simulaci programu PSCAD trasy EOR – ECHV.</i>	47
<i>Obr. 8-11: Průběhy napětí uzlů v simulaci programu MODES trasy EOR – ECHV.</i>	47
<i>Obr. 8-12: Průběh frekvence v simulaci programu PSCAD trasy EOR – ECHV.</i>	48
<i>Obr. 8-13: Průběh odchylky frekvence v simulaci programu MODES trasy EOR – ECHV.</i>	48
<i>Obr. 8-14: Detail zapnutí největšího pohonu při reálné zkoušce EOR – ECHV. Převzato a upraveno z [1].</i>	49
<i>Obr. A-1: Model generátoru.</i>	55
<i>Obr. A-2: Model AC budiče.</i>	58
<i>Obr. A-3: Model DC budiče.</i>	59
<i>Obr. A-4: Model regulátoru buzení trasy EDS – ECHV vpravo a EOR – ECHV vlevo.</i>	60
<i>Obr. A-5: Model omezovače proudů.</i>	61
<i>Obr. A-6: Model stabilizátoru.</i>	62
<i>Obr. A-7: Model turbíny.</i>	63
<i>Obr. A-8: Model regulátoru otáček turbíny.</i>	64
<i>Obr. B-1: Transformátor se vstupem pro změnu napětí.</i>	66
<i>Obr. C-1: Model asynchronního motoru.</i>	68
<i>Obr. E-1: Model trasy EDS – ECHV.</i>	73
<i>Obr. E-2: Model trasy EOR – ECHV.</i>	74

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1: Vymezení frekvence v Hz pro pásma provozu [4]</i> .....	14
<i>Tab. 2-2: Systémové frekvenční odlehčování [4]</i> .....	14
<i>Tab. 3-1: Porovnání synchronního a ostrovního provozu a pokrývání nerovnováhy <math>\Delta P</math> [18]</i> .....	18
<i>Tab. 5-1: Kritéria pro úspěšnou zkoušku [12]</i> .....	25
<i>Tab. 5-2: Časy spuštění jednotlivých motorů trasy Dlouhé Stráně – Chvaletice. Převzato ze scénáře programu MODES.</i> .....	26
<i>Tab. 5-3: Časy spuštění jednotlivých motorů trasy Orlik – Chvaletice. Převzato ze scénáře programu MODES.</i> .....	27
<i>Tab. 8-1: Rozběhy motorů reálné zkoušky EDS - ECHV</i> .....	44
<i>Tab. A-1: Parametry generátoru</i> .....	57
<i>Tab. A-2: Výpočtové parametry generátoru</i> .....	58
<i>Tab. A-3: Hodnoty parametrů modelu AC Budic</i> .....	59
<i>Tab. A-4: Hodnoty parametrů vnitřní struktury AC budic</i> .....	59
<i>Tab. A-5: Hodnoty parametrů modelu DC Budic</i> .....	59
<i>Tab. A-6: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu DC budic</i> .....	59
<i>Tab. A-7: Hodnoty parametrů modelu Regulator 1/2</i> .....	60
<i>Tab. A-8: Hodnoty parametrů modelu Regulator 2/2</i> .....	60
<i>Tab. A-9 :Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Regulator 1/3</i> .....	60
<i>Tab. A-10: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Regulator 2/3</i> .....	61
<i>Tab. A-11: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Regulator 3/3</i> .....	61
<i>Tab. A-12: Hodnoty parametrů modelu Omezovac</i> .....	61
<i>Tab. A-13: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Omezovac 1/3</i> .....	61
<i>Tab. A-14: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Omezovac 2/3</i> .....	62
<i>Tab. A-15: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Omezovac 3/3</i> .....	62
<i>Tab. A-16: Hodnoty parametrů modelu Stabilizator</i> .....	62
<i>Tab. A-17: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Stabilizator 1/2</i> .....	63
<i>Tab. A-18: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Stabilizator 2/2</i> .....	63
<i>Tab. A-19: Hodnoty parametrů modelu Hydro Tur 1</i> .....	63
<i>Tab. A-20: Hodnoty parametrů modelu Hydro Gov 2</i> .....	64
<i>Tab. A-21: Výpočtové parametry regulátoru otáček</i> .....	64
<i>Tab. B-1: Parametry transformátorů</i> .....	65

---

<i>Tab. B-2: Výpočtové parametry transformátorů</i> .....	66
<i>Tab. C-1: Parametry vedení Pi článku</i> .....	67
<i>Tab. C-2: Parametry vedení s rozloženými parametry</i> .....	68
<i>Tab. C-3: Výpočtové parametry vedení EDS – ECHV</i> .....	68
<i>Tab. C-4: Výpočtové parametry vedení EOR – ECHV</i> .....	68
<i>Tab. C-5: Koefficienty zatížení motorů</i> .....	69
<i>Tab. C-6: Parametry motorů</i> .....	70
<i>Tab. C-7: Hodnoty parametrů motorů trasy Dlouhé Stráně – Chvaletice</i> .....	70
<i>Tab. C-8: Hodnoty parametrů motorů trasy Orlík – Chvaletice</i> .....	71
<i>Tab. D-1: Symbolika mezi programy</i> .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>

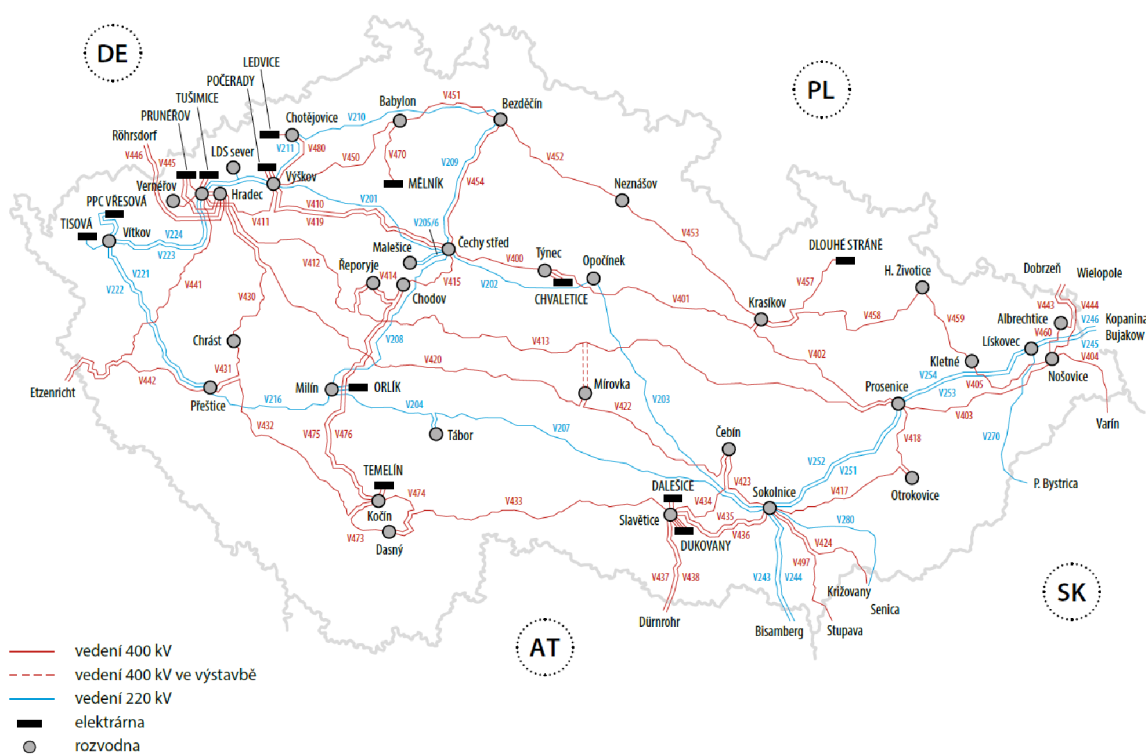
## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$f$	Frekvence	Hz
$P$	Činný výkon	W
$\Delta P$	Rozdíl činného výkonu	W
$U, u$	Napětí	V
$R$	Odpor	$\Omega$
$I, i$	Proud	A
$\omega$	Úhlová rychlost	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
$C$	Kapacita	F
$Y$	Admitance	S
$Z$	Impedance	$\Omega$
$l$	Délka	m
$L$	Indukčnost	H
Zkratka	Význam	-
ČEPS	Česká přenosová soustava	-
DS	Distribuční soustava	-
OZ	Opětovné zapnutí	-
ECHV	Elektrárna Chvaletice	-
EDS	Elektrárna Dlouhé stráně	-
ORK	Elektrárna Orlík	-
TYN	Rozvodna Týnec	-
BT	Blokový transformátor	-
ES	Elektrizační soustava	-
EAS	Evropský systém sdílení informací mezi operátory	-
UCTE	Unie pro koordinaci přenosu elektřiny	-
PS	Přenosová soustava	-
JE	Jaderná elektrárna	-
EDU	Jaderná elektrárna Dukovany	-
ETE	Jaderná elektrárna Temelín	-
VE	Vodní elektrárna	-
PVE	Přečerpávací vodní elektrárna	-
OZE	Obnovitelné zdroje energie	-
VM	Výrobní modul	-

# 1 ÚVOD

Elektrizační soustava slouží k přenosu a distribuci elektrické energie mezi místem výroby a místem spotřeby. Jedná se o vzájemně propojený soubor zařízení pro výrobu, přenos, transformaci a distribuci elektřiny, včetně elektrických přípojek a přímých vedení, a systémů měřicí, ochranné, řídicí, zabezpečovací, informační a telekomunikační techniky. Dělíme ji na přenosovou a distribuční soustavu. Přenosová soustava je sestavena ze sítí 400 kV, 220 kV a vybraných 110 kV, jedná se o páteřní síť soustavy. Slouží k přenosu elektrické energie na velké vzdálenosti, zajišťuje propojení se zahraničními soustavami a také slouží k vyvedení výkonu ze systémových elektráren. Schéma přenosové soustavy ČR je na Obr. 1-1 [25]. Distribuční soustava je sestavena z vedení a zařízení 110 kV s výjimkou vedení, která jsou součástí PS a vedení a zařízení o napětí 0,4/0,23 kV, 1,5 kV, 3 kV, 6 kV, 10 kV, 22 kV, 25 kV a 35 kV, sloužící k zajištění distribuce elektřiny na vymezeném území ČR [21] [22].

V případě, že v elektrizační soustavě nastane vícenásobná porucha, může tato porucha zapříčinit kaskádovité vypínání vedení a zařízení elektrizační soustavy. Soustava se následně může rozdělit na několik oddělených částí s vlastní frekvencí, případně pouze na lokální ostrovní provozy, které se také vyznačují vlastní frekvencí a zdrojem, který je pro ten chod uzpůsobený. V nejhorším případě pak nastane úplný výpadek, tzv. „Blackout“. V případě úplného výpadku sítě následuje obnova napájení systémových elektráren z elektráren schopných tzv. „startu ze tmy“. Obnova napájení je složitá operace, která s sebou nese řadu rizik a problémů. Tato práce se věnuje popisu úplného výpadku sítě, ostrovnímu provozu, napěťovým jevům při obnově a dvěma vybraným obnovovacím trasám.



Obr. 1-1: Mapa přenosové soustavy ČR [25].

## 2 BLACKOUT

Blackout charakterizuje rozsáhlý výpadek dodávek elektrické energie na velkém území po dobu desítek hodin nebo dnů, jehož důvodem může být porucha elektrárny či selhání přenosové soustavy. V případě, že se jedná pouze o lokální výpadek, případně je-li dodávka elektrické energie obnovena v řádu desítek minut až hodin, nejedná se o blackout. Blackout je problematika velice komplexní vzhledem k provázanosti celé infrastruktury [26].

### 2.1 Provoz ES

Vzhledem k tomu, že má spotřeba elektrické energie až na některá období spíše stoupající tendenci a parametry v síti se pořád mění, riziko poruchovosti roste a není jednoduché predikovat stabilitu v případě nepředvídatelných okolností.

Jedna ze základních ochran proti plošnému výpadku je kritérium N-1, kdy je soustava schopná při výpadku jednoho prvku soustavy se s tímto stavem sama vyrovnat, ovšem při výpadku dvou a více prvků už nemusí. V případě rozpadu elektrizační soustavy, který je zapříčiněn narušením stability chodu soustavy, jsou odpojeny systémové zdroje, které nemají kam dodávat vyrobenou energii nebo při překročení pásma frekvence viz Tab. 2-1 na vlastní spotřebu. K tomuto stavu ale nutně dojít nemusí a elektrárna zůstane připojená do ostrovní sítě. Na hladině 110 kV se také mohou udržet ostrovní provoz, avšak nelze z nich obnovit přenosovou soustavu [2].

Na základě povinností vyplývajících z energetického zákona, musí ČEPS garantovat řadu činností potřebných pro udržení bezpečného a spolehlivého provozu přenosové soustavy. Pro případ vzniku problémů byl zpracován tzv. Plán proti šíření poruch v přenosové soustavě, který určuje základní principy a prostředky pro zajištění bezpečnosti provozu [1].

I přes tato opatření může dojít shodou nepříznivých okolností k částečnému nebo úplnému rozpadu soustavy. Společnost ČEPS má pro tyto případy zpracován tzv. Plán obnovy, který stanovuje strategii a postupy k zajištění co nejkratší doby obnovy soustavy [1].

Elektrizační soustava je dle [2] dynamický systém. Okamžité hodnoty provozních parametrů se v čase mění a musí platit výkonová rovnováha pro ustálený stav dána vztahem při zanedbání ztrát:

$$P_{ZO} = P_{SO} + P_{ZTO} + P_{PO}, \quad (1.1)$$

kde  $P_{ZO}$  je okamžitý výkon zdrojů,  $P_{SO}$  je okamžitá spotřeba,  $P_{ZTO}$  jsou okamžité ztráty a  $P_{PO}$  je okamžité saldo přeshraničních obchodů.

V případě porušení této výkonové rovnováhy nastane přechodný stav, který má za následek změnu frekvence. Tato změna probíhá do doby, než dojde k vyrovnání rovnováhy mezi výrobou a spotřebou. Pokud však dojde k nekontrolovatelným změnám některého z provozních parametrů soustavy a tyto změny se nepodaří zvrátit, může dojít k narušení stability chodu soustavy a případně k jejímu rozpadu [2]. Rozeznáváme dva druhy stability.

Napětíová stabilita musí mít nastavené meze tak, aby neplánovaný výpadek vedení nebo zdroje nezpůsobil pokles nebo růst napětí do hodnot, který by se mohl rozvinout v napětíový kolaps. Napětíový kolaps je dle [23] pokles napětí, při kterém může dojít k přerušení dodávky elektrické energie. V případě poklesu pod určitou mez podpětíové ochrany odpínají zatížení, nebo generátory a při přepětí vybaví přepětíové ochrany [2].

Výkonová stabilita musí mít meze statické i dynamické stability nastaveny tak, aby jakýkoliv zkrat, výpadek vedení, transformátoru nebo generátoru nezapříčinil ztrátu synchronismu ostatních zdrojů. V případě ztráty synchronismu dojde k neomezenému vzájemnému pohybu alternátorů, připojených do jedné soustavy. Některé alternátory se začnou vlivem odlehčení urychlovat a jiné naopak zpomalovat. V krajním případě může následně nastat situace, kdy se jednotlivé části soustavy rozdělí na skupiny s vlastní frekvencí a vytvoří tzv. ostrovní provoz. Výsledný stav se označuje jako stav nouze [2].

## 2.2 Plán obrany proti poruše

Hlavním úkolem plánu obrany je dle [3], [4] zamezení nekontrolovatelného šíření poruchy a zkrácení doby trvání poruchy. Jednou ze základních koncepcí je dodržování již zmiňovaného kritéria N-1. V případě nesplnění kritéria dispečer PS přijímá preventivní opatření s cílem obnovy normálního stavu.

Obranný plán obsahuje dle [4] následující opatření:

- řízení propustnosti sítě  
Snaha zabránit přetížení sítě, přenosové schopnosti přeshraničního profilu.
- opatření proti přetížení  
Přenosová soustava je provozována tak, aby splňovala kritérium N-1. V případě více poruch s následkem přetížení vedení, může dispečer měnit topologii sítě, přerozdělit výkony elektráren, přerušit práce na vedeních s cílem zapnout tato vedení, zvýšit napětí v daných mezích, požádat o přerozdělení výkonu elektráren provozovatele sousední soustavy, dát pokyn dispečerům DS k snížení odběru.
- opatření proti kaskádovitému šíření poruchy  
Na straně sítě se jedná o blokování hladinových regulátorů od podpětí, odpojení jen postižené části v nejkratším čase, vypnutí vedení nebo transformátoru distanční ochranou v případě nebezpečí ztráty synchronismu, automatické OZ při jednofázových poruchách.  
Na straně výroby se jedná o přednostní využívání rychlých nezávislých budících soustav, správné nastavení kontroly meze podbuzení, omezovačů proudů a systémových stabilizátorů v regulátorech buzení, správná funkce proporciální regulace otáček turbín a regulátorů ostrovního provozu, rychlé řízení ventilů a další zařízení chránící proti přeběhu otáček turbíny.
- opatření proti poklesu a vzrůstu frekvence  
V běžném provozu ( $\pm 200$  mHz) je frekvence udržována pomocí primární regulace frekvence a sekundární regulace frekvence a činného výkonu. V případě vybočení frekvence z těchto mezí se opatření určují podle frekvenčního plánu viz Tab. 2-1 [4].

Tab. 2-1: Vymezení frekvence v Hz pro pásma provozu [4]

Typ elektrárny Provoz	Uhelné	JE		VE	PVE		Paroplynové	OZE a nové VM
		EDU	ETE		turbína	čerpání		
Normální provoz bez omezení	48.5-50.5	48.5-50.5		48.5-50.5	48.5-50.5	49.5-50.5	48.5-51.5	49-51
Časově omezen	46-48.5	47.5-48.5	47.9-48.5	46-48.5	46-48.5	49-49.5	48-48.5	47.5-49
	50.5-53	50.5-52.5	50.5-51.5	50.5-53	50.5-53	50.5-52(53)	51.5-52	51.-51.5
Nepřípustný	f > 53	f > 52.5	f > 51.5	f > 53	f > 53	f > 52(53)	f > 52	f > 51.5
	f < 46	f < 47.5	f < 47.9	f < 46	f < 46	f < 49	f < 48	f < 47.5
Automatické odpojení od ES	f > 53	f > 52.5	f > 51.5	f > 50.2(51.5)	f > 50.2(51.5)	f > 52(53)	f > 52	f > 51.5
	f < 47.5	f < 47.9	f < 47.9	f < 47.5	f < 47.5	f < 49.8-49.2	f < 48	f < 47.5

Frekvenční odlehčování zátěže pomocí frekvenčních relé instalovaných v rozvodnách 110 kV a 22 kV viz Tab. 2-2 [4].

Tab. 2-2: Systémové frekvenční odlehčování [4]

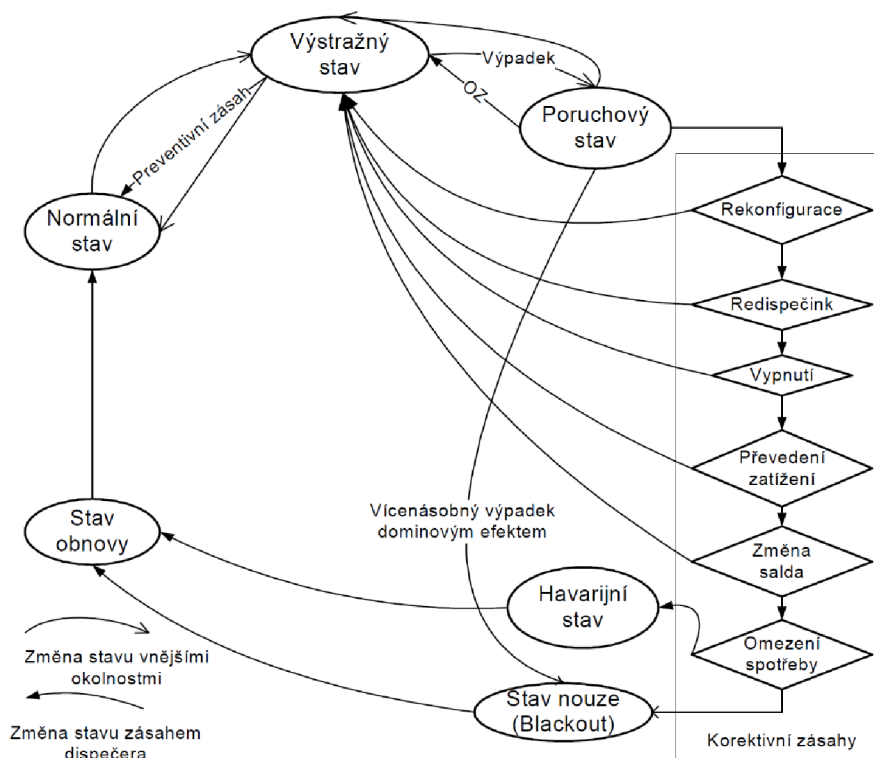
Stupeň / frekvence [Hz]	1. /49	2. /48.7	3. /48.4	4. /48.3	5. /48.1	6. /48.0
Objem odlehčované zátěže [%] z netto zatížení na území, na kterém příslušný PDS zajišťuje distribuci	10	10	10	2	10	8

- opatření proti poklesu a vzrůstu napětí  
 Opatření založena na primární, sekundární, terciární regulaci napětí a zásazích v rámci operačního řízení provozu.  
 Elektrárenské bloky o výkonu 100 MW a více mají v činnosti automatické regulátory buzení, které udržují svorkové napětí, stabilitu strojů, kývání a pracovní bod v dovolené P-Q oblasti. Transformátory 400/220 kV, 400/110 kV, 220/110 kV jsou vybaveny přepínači odboček pod zatížením a transformátory 400/110 kV a 220/110 kV jsou vybavovány hladinovými regulátory, které udržují konstantní napětí na sekundární straně.  
 Dále se využívají kompenzační prostředky a mimořádné prostředky, kdy se při napětí nad 420 kV vypínají přenosová vedení 400 kV při zachování kritéria N-1 a při napětí pod 380 kV dochází ke zvýšení jalového výkonu bloků.  
 Dále spuštění rychle startujících záloh.
- opatření proti kývání  
 V případě vzniku netlumených kyvů se soustava neoslabuje dalším vypínáním a distanční ochrany vedení jsou pro zamezení chybné funkce při výskytu stabilního kývání vybaveny závorou proti kývání. Při větších hodnotách tranzitů v propojené soustavě může dojít k tzv. mezisystémovým kyvům o frekvenci 0,2 – 1 Hz. K tlumení těchto kyvů slouží systémové stabilizátory. Dále je dispečer oprávněn odstavovat elektrárenské bloky v místě největších netlumených kyvů.
- opatření proti ztrátě synchronismu  
 Narušení statické stability a následnou ztrátu synchronismu rozpozná vypínací funkce distančních ochran, které před tímto stavem chrání. V rozvodnách 400 kV jsou kontrolovány doby trvání třífázového zkratu, aby nedošlo k narušení dynamické stability blízkých generátorů.



Jakmile vznikne hrozba přetížení prvků sítě z důvodu výpadku jednoho zařízení, soustava se dostává do poruchového stavu viz Obr. 2-1[3]. Dispečer následně provádí nápravná opatření podle provozních instrukcí.

- rekonfigurace  
Změna zapojení sítě.
- redispečink  
Přerozdělení výkonu mezi elektrárnami.
- vypnutí  
Vypínání prvků soustavy.
- převedení zatížení  
Vyšší zatížení jednoho prvku soustavy za účelem snížení zatížení prvku druhého.
- změna salda  
Změna přeshraničních toků energie.
- omezení spotřeby  
Odpojování jednotlivých spotřebitelů od sítě.



Obr. 2-1: Schéma přechodu mezi jednotlivými stavy včetně možných zásahů [3]

V dnešní době je již samozřejmostí mezinárodní spolupráce pro předcházení a řešení poruch. Z toho důvodu byl na úrovni střeoevropského regionu implementován varovný a informační systém EAS umožňující vzájemnou informovanost.

## 2.3 Obnova po poruše

Postup obnovy soustavy podléhá dle [4] daným prioritám:

1. obnova napájení vlastní spotřeby jaderných elektráren
2. obnova napájení vlastní spotřeby klasických systémových elektráren

3. obnova napájení hlavního města Praha
4. obnova napájení velkých aglomerací
5. obnova napájení ostatních spotřebitelů

Strategie obnovy zahrnuje přesně definované postupy vyžadující správný chod jednotlivých činností uvnitř postižené sítě i mezi sousedními sítěmi.

Hlavní strategie obnovy soustavy spočívá dle [1], [2] ve dvou možnostech:

- obnova bez použití napětí ze sítě  
Jedná se o klasický způsob najetí ze tmy. Je zde vyžadována schopnost vybraných bloků obnovit provoz bez podpory vnějšího zdroje. Výběr bloků, které tuto schopnost umožňují provádí provozovatel přenosové soustavy na základě výpočtů a reálných testů. Prvotním cílem je napájení vlastní spotřeby jaderných elektráren. Vzhledem k malé vlastní spotřebě jsou ideálními zdroji pro start ze tmy vodní elektrárny. Jaderná elektrárna Dukovany je v případě obnovy napájena z vodní elektrárny Dalešice. Elektrárna Dalešice je v tomto případě napájena z vodní elektrárny Mohelno, která je schopna startu ze tmy. Jaderná elektrárna Temelín je v případě obnovy napájena z vodní elektrárny Lipno. Obnovu zároveň umožňuje i podpůrná služba se schopností ostrovního provozu, kdy blok pracuje do izolované části, tzv. v ostrovním provozu.
- obnova s použitím napětí z vnější sítě  
Jedná se o obnovu založenou na možnosti rychle získat elektrickou energii o kmitočtu 50 Hz od zahraničních partnerů. Tento způsob obnovy je upřednostňován, jelikož se soustava České republiky nachází uvnitř propojené Evropské sítě a existuje zde propojení na okolní energetické společnosti viz Obr. 2-2 [1]. Tento způsob obnovy předpokládá, že okolní společnosti nebudou poruchou zasaženy a výkon, který poskytnou neohrozí stabilitu jejich soustavy. Je využívána tzv. „open-all“ strategie, kdy po poruše typu blackout dispečer provede vypnutí všech vypínačů v zasažené oblasti a v tomto stavu provádí podle definovaných instrukcí obnovu napětí bez rizika sepnutí částí soustav s odlišnými parametry.

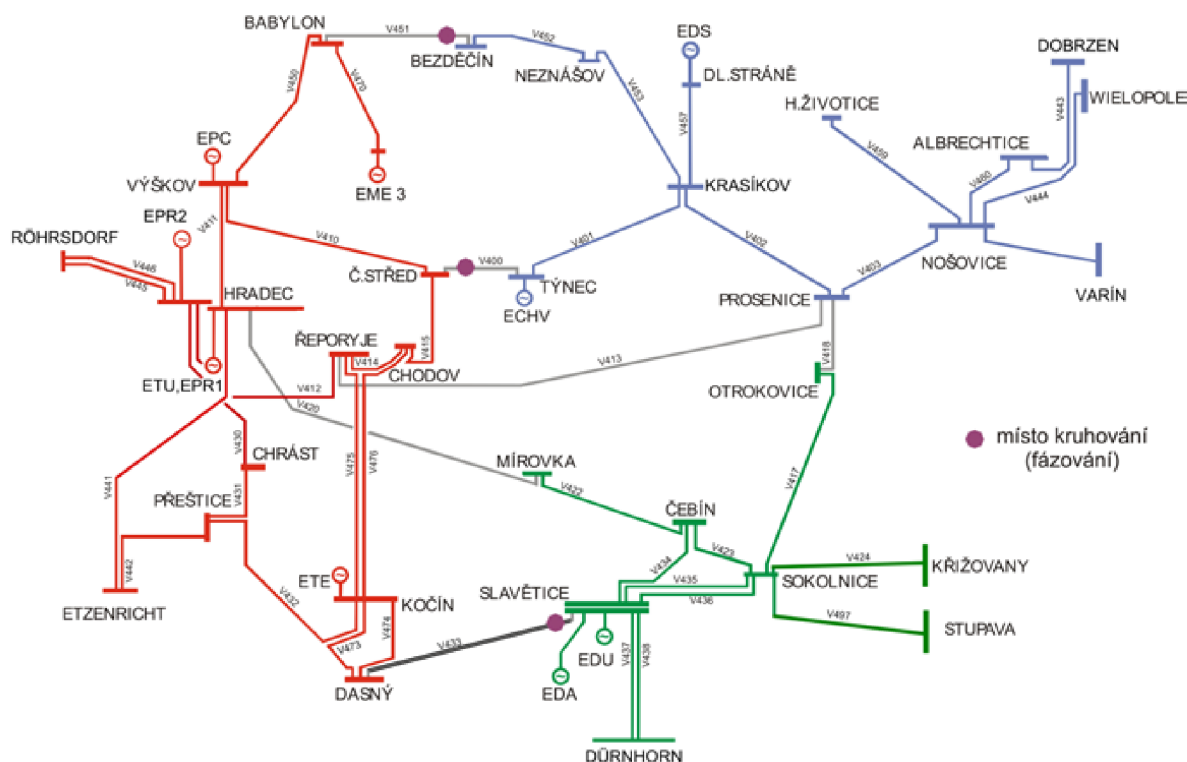
Dle [5] schopnost startu ze tmy znamená najetí bloku bez pomoci vnějšího zdroje na jmenovité otáčky, dosáhnout jmenovitého napětí, připojení k síti a jejího napájení v ostrovním režimu. Tato schopnost vybraných bloků je nezbytná pro obnovení dodávky elektrické energie po úplném nebo částečném rozpadu sítě a je dána vyhláškou č. 80/2010 Sb.

Požadavky na vybrané bloky pro start ze tmy [dle kodexu V [4]]:

- dodržení postupu
  1. Okamžité zahájení postupu najíždění bez použití vnějšího zdroje napětí.
  2. Podání napětí do nadřazené sítě v požadované kvalitě, blok pracuje v regulačním režimu ostrovního provozu.
  3. Obnovení napájení stanovených částí sítě dle pokynů Dispečinku ČEPS.
  4. Postupné zatěžování ostrova činným výkonem pomocí předem definovaných změn zatížení.
  5. Provoz ve stanovených výkonových mezích s limitem frekvenčních a napěťových odchylek.
  6. Opětné připojení ostrova k soustavě.
  7. Paralelní provoz soustavou.

## 8. Další provoz dle pokynů ČEPS.

- koordinovanost postupu  
Poskytovaná podpurná služba je v souladu s Plánem obnovy, kompatibilní s postupy obnovy, provozními instrukcemi a předpisy dotčených subjektů.
- schopnost ostrovního provozu  
Blok je schopen pracovat v ostrovním provozu a má platnou certifikační zkoušku.
- dostupnost služby  
Poskytovatel služby provádí periodické testy a má právo požadovat inspekci připravenosti plnění této služby.



Obr. 2-2: Propojení ES ČR se zahraničím na úrovni 400 kV [1]

### 3 OSTROVNÍ PROVOZ

Dle [6] se regulace frekvence v ostrovním provozu od regulace v běžném provozu liší. Ostrovní provoz vzniká po poruše, kdy postižená část sítě ztrácí synchronní spojení se zbytkem soustavy a pracuje se stejnou, nebo odlišnou frekvencí. Dalším důvodem pro vznik ostrovního provozu je při obnově typu blackout. Po poruše nejprve dochází ke startu ze tmy, následuje rozběh vlastní spotřeby dalších bloků, jejich spuštění a zatěžování. Ukončení ostrovního provozu probíhá synchronizací a přiřazováním ke zbytku soustavy. Synchronizace se provádí pomocí automatických synchronizačních zařízení, která kontrolují splnění fázovacích podmínek. Porovnání synchronního a ostrovního provozu viz Tab. 3-1 [18]. Vzhledem k tomu, že práce se zabývá problematikou startu ze tmy, je zde zahrnuta i základní problematika ostrovního provozu.

Tab. 3-1: Porovnání synchronního a ostrovního provozu a pokrývání nerovnováhy  $\Delta P$  [18]

	Synchronní provoz	Ostrovní provoz
Udržování výkonové rovnováhy	komplexní systémová služba zajištěná provozovatelem PS	regulace otáček turbín, součinnost provozovatelů sítí a elektráren, frekvenční odlehčování
Primární pokrytí $\Delta P$	primární regulace $f$	proporcionální regulace otáček, frekvenční odlehčování
Sekundární pokrytí $\Delta P$	sekundární regulace $f$ a $P$	změna základního otevření, změna zatížení, centrální regulace frekvence

Rozdíl mezi provozy je především v tom, že v synchronním propojení využívá regulační oblast výpomoci ostatních regulačních oblastí, zatímco ostrovní provoz se musí spoléhat pouze na vlastní zdroje.

Elektrárenský blok přechází automaticky do režimu ostrovního provozu při poklesu frekvence pod 49,8 Hz nebo při vzrůstu frekvence nad 50,2 Hz. Ostrovní režim představuje vysoké nároky na regulaci činného výkonu, protože zatížení se v čase rychle mění a vyvolané změny napětí a frekvence musí blok řešit svou autonomní regulací (v případě paralelního provozu jsou změny řešeny prostřednictvím systémových služeb) [5].

Požadavky na schopnosti bloku dle [5]:

- přechod do ostrovního provozu

Při přechodu do ostrovního provozu je nutné okamžitě zajistit především:

1. Změnu regulace bloku na proporcionální regulaci otáček.
2. Odpojení dálkové regulace výkonu (odpojení bloku ze sekundární regulace  $f$  a  $P$ ).
3. Pokud možno aperiodický a stabilní přechod otáček na hodnotu, která je dána frekvencí ostrovního provozu s nastavenými parametry regulace otáček.
4. Stabilní odepnutí bloku do provozu na vlastní spotřebu, pokud kmitočty vybočí z mezí dle Tab. 2-1.
5. Přepnutí potřebných regulací do režimu vhodného pro ostrovní provoz.

- ostrovní provoz

Regulace a technologické zařízení musí zajistit:

1. Stabilní spolupráci s ostatními bloky v ostrovním režimu.
2. Adekvátní odezvu dodávaného činného a jalového výkonu na změny frekvence a napětí  
Adekvátní odezvou je myšlena idealizovaná závislost výkonu turbíny  $P_{id}$  na stacionární (odeznění rychlých elektro-mechanických přechodných dějů) odchylce frekvence:

$$P_{id} = P_0 - \frac{100}{\delta} \cdot \frac{P_n}{f_n} \cdot \Delta f, \quad (3.1)$$

kde  $P_0$  je výkon bloku před přechodem do ostrovního provozu, případně základním otevřením regulačních orgánů (regulační ventily u parních turbín; ovladače paliva u plynových turbín; rozváděcího/oběžného kola u vodních turbín),  $\delta$  je statika proporcionálního regulátoru otáček,  $P_n$  je jmenovitý výkon,  $f_n$  je jmenovitá frekvence  $\Delta f$  je odchylka frekvence.

3. Dle pokynů dispečera měnit dostatečně plynule výkon soustrojí.
- opětovné připojení ostrovního provozu k soustavě  
Blok musí být schopen:
    1. V režimu ostrovního provozu pracovat po dobu minimálně 2 hodin.
    2. Dle pokynů dispečera regulovat frekvenci ostrovního provozu tak, aby mohlo dojít k opětovnému přifázování k propojené soustavě.
    3. Blok musí být schopen připojení k vnější síti při kmitočtu dle pásma provozu bloků a svorkovém napětí ( $92 < U < 108$ ) %  $U_n$ .
    4. V případě fázování bloku v rozvodně PS, musí být blok schopen přivést napětí po blokovém vedení do této rozvodny.
  - opětovné připojení ostrovního provozu k soustavě

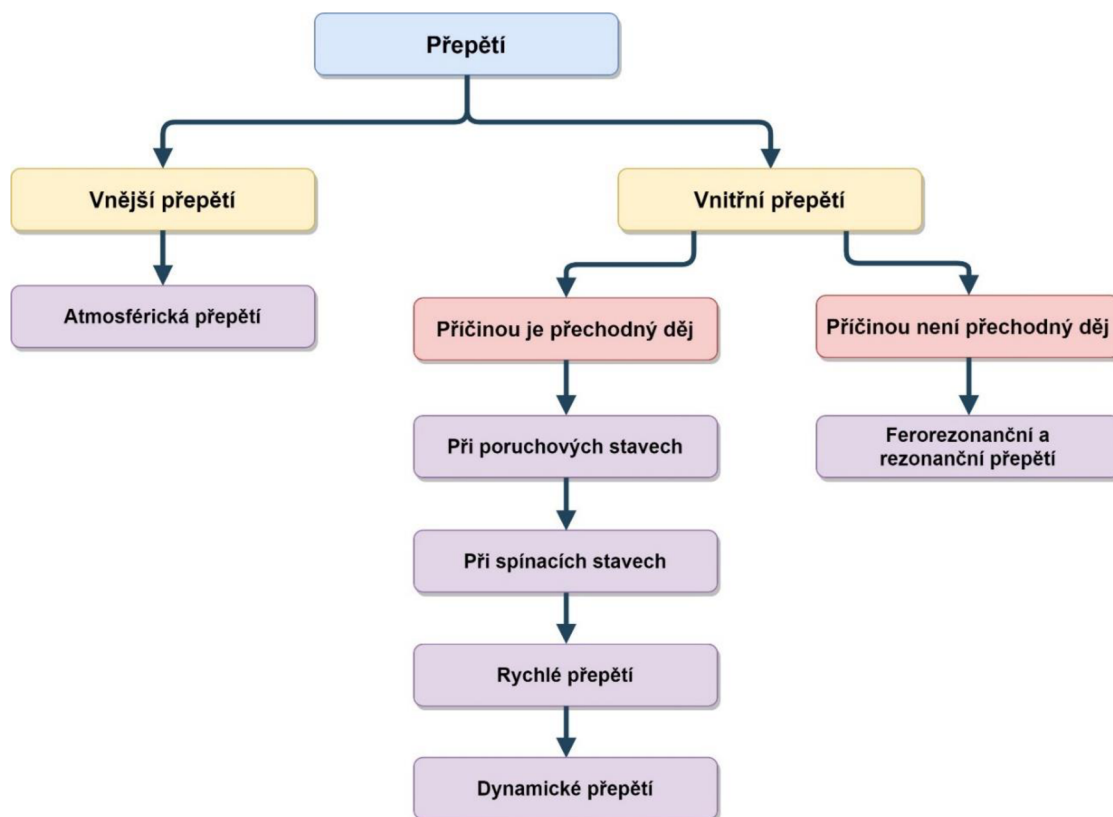
Poskytovatel služby ostrovního provozu provádí periodické certifikační testy a má právo požadovat možnost inspekce připravenosti k plnění této podpůrné služby provedené způsobem, který neovlivní provoz bloku.

## 4 NAPĚŤOVÉ JEVY TYPICKÉ PRO OBNOVOVACÍ TRASY A OSTROVNÍ PROVOZY

V elektrických sítích se neustále dějí změny parametrů, způsobeny například spínacími operacemi, zkraty, zemními spojeními, poruchami a podobně. Tyto změny mají vliv na průběhy napětí a proudů, které se v čase mění. V reálné síti mezi ustálenými stavy probíhá přechodný děj.

Následkem přechodných dějů je i vznik přepětí. Přepětí je časově závislé zvýšení jmenovitého napětí nad hodnotu stanovenou normou. Vyjadřuje se v absolutních hodnotách, poměrných hodnotách nebo procentech.

Na Obr. 4-1 [10] lze vidět rozdělení přepětí podle příčiny vzniku. Atmosférická přepětí mohou vzniknout při přímém úderu blesku do vedení, zemního lana nebo mohou být indukovaná ve vedeních při úderu blesku v malé vzdálenosti od vedení (asi do 5 km). Poruchové stavy představují již zmíněné zkraty a zemní spojení. Spínací operace představují spínání kapacitních, induktivních proudů, obvodů s polovodičovými prvky, vedení naprázdno (Ferrantiho jev), OZ vedení. Rychlé přepětí vzniká při spínání malých kapacitních proudů v zapouzdřených rozvodnách. Dynamické přepětí vzniká při náhlé ztrátě zatížení a při nesouměrných stavech. Dále se přepětí může dělit na trvalé (přepětí síťového kmitočtu, u kterého se efektivní hodnota považuje za konstantní), dočasné (přepětí síťového kmitočtu trvající několik sekund až několik tisíc sekund) a přechodné (krátkodobé obvykle tlumené přepětí, trvající několik milisekund nebo méně) [10].



Obr. 4-1: Rozdělení přepětí podle příčiny vzniku [10]

## 4.1 Ferorezonanční přepětí

Ferorezonanční přepětí se může vyskytovat v obvodech se všemi napět'ovými úrovněmi, kde je nelineární indukčnost  $L$  (cívka s feromagnetickým jádrem) a kapacita  $C$ . Ve třicátých letech minulého století začal být tento jev problematický, jelikož se v distribučním systému začaly používat sériové kondenzátory k regulaci napětí [7].

Ferorezonance se od lineární rezonance liší. V lineárních systémech rezonance nastává, pokud se kapacitní reaktance rovná indukční reaktanci. Výsledkem jsou vysoká napětí a proudy sinusového tvaru s rezonanční frekvencí. Na rozdíl od lineární rezonance není ferorezonance jednoduše předvídatelná, vzhledem k nelinearitě může existovat několik možností v závislosti na rozsahu parametrů v obvodu. Zároveň je velmi citlivá na počáteční podmínky (magnetická remanence, spínací operace, ztráty v obvodu, náboj v kapacitách). Pokud v systému nastala změna a ten se nachází ve stavu ferorezonance, neznamena to, že v něm musí setrvat po celou dobu. Při další změně může jev zaniknout. Následkem ferorezonance mohou být také vysoká napětí a proudy, ale průběhy jsou často nepravidelné a chaotické [8], [9].

Vzhledem k vysokým proudům může ferorezonance vést k přílišnému zahřívání transformátoru, to může mít za následek poškození izolace. V případě příliš vysokého napětí mohou první cykly ferorezonance vést k problému s koordinací izolace zahrnující frekvence vyšší, než je frekvence systému [9].

Dle [9] některá základní kritéria, která umožňují vznik ferorezonančního přepětí:

- Kapacita v sérii s nelineární indukčností nebo s nezatiženým, případně málo zatíženým transformátorem (pod 10–20 % jmenovitého zatížení).
- Jednopolové spínací procesy v třífázovém systému.

Transformátory, které mohou vliv na vznik ferorezonančního přepětí:

- Jednofázový transformátor a napět'ový transformátor napájený přes sériovou kapacitu.
- Trojfázový distribuční transformátor zatížený jednopolovým přepínáním nebo přerušením.
- Případně kompenzační tlumivka s feromagnetickým jádrem.

Kapacity, které mohou mít vliv na vznik ferorezonančního přepětí:

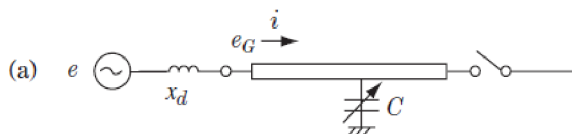
- Sériové kompenzační kondenzátory.
- Paralelní kompenzační kondenzátory.
- Kabelová vedení.
- Kapacity pro rozložení napětí ve výkonových vypínačích.
- Dlouhá vedení.
- Kapacitní vazby v transformátorech.

Možnosti, jak předejít ferorezonančnímu přepětí:

- Změna nelineárních vlastností zapojené indukčnosti.
- Snížení velikosti připojených kapacit. Menší kapacita znamená menší rezonanční energii.
- Omezení sériového spojení mezi kapacitami a nelineárními indukčnostmi. To může být například provedeno uzemněním. V případě existence sériového spojení je dobré použít tlumící odpor.

## 4.2 Samobuzení generátoru

Je-li ke generátoru dle [11] připojena kapacitní zátěž, jak je zobrazeno na Obr. 4-2 [11], na svorkách generátoru vznikne přepětí, a to i v případě, že je generátor plně odbuzen. Generátor není schopen tuto kapacitní zátěž kompenzovat a projevem je trvalý nárůst napětí. Tento jev se nazývá samobuzení generátoru.



Obr. 4-2: Náhradní schéma generátoru [11]

V případě, že generátor pracuje ve stavu naprázdno, s konstantním momentem na hřídeli a plně odbuzen, rotor si stále drží zbytkový magnetismus z posledního chodu generátoru. Zároveň je přítomné i malé svorkové napětí  $e_G$ . Pokud za těchto podmínek připojíme velmi malou kapacitní zátěž, svorkové napětí se téměř nezmění. Pokud se navýší velikost připojené kapacity, svorkové napětí se stejně jako kapacitní proud vinutím generátoru navýší.

Samobuzení generátoru je tedy způsobeno připojením čistě kapacitní zátěže. Následkem je vysoké, trvalé přepětí a přehřívání generátoru způsobené ztrátami v železe v důsledku saturace jádra.

Zároveň dle [12] vzniká riziko samobuzení v situaci, kdy je kapacitní reaktance připojených vedení  $X_c$  přepočtená na primární stranu blokového transformátoru  $X_{cp}$  menší než součet synchronní podélné reaktance generátoru  $X_d$  a rozptylové reaktance blokového transformátoru  $X_s$  přepočtené na primární stranu blokového transformátoru  $X_{sp}$ . Tedy při splnění nerovnosti:

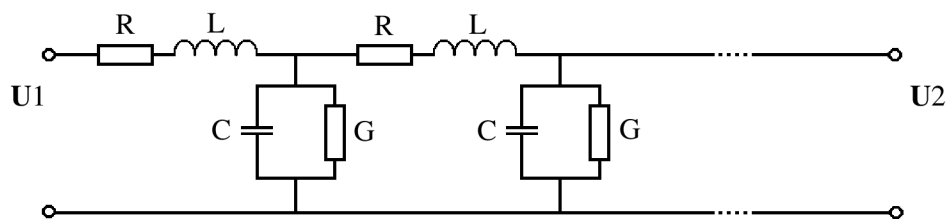
$$X_{cp} < X_d + X_{sp} \quad (4.1)$$

## 4.3 Ferrantiho jev

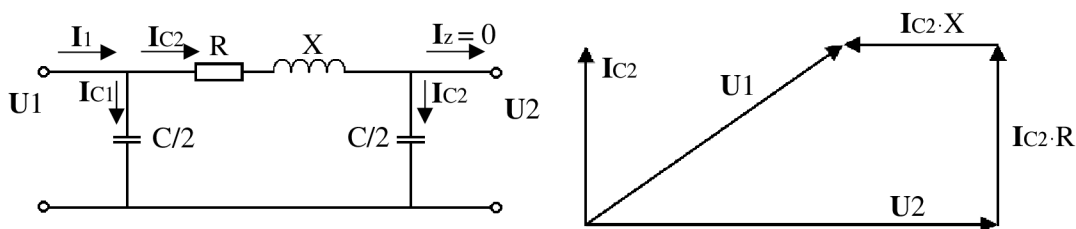
Jak je známo, tak elektrický proud teče z místa s vyšším potenciálem do místa s nižším potenciálem, aby kompenzoval rozdíl těchto potenciálů. Ve většině případů provozu elektrických sítí se setkáváme s jevem, kdy napětí na začátku vedení má vyšší hodnotu než napětí na konci. To je způsobeno úbytkem napětí podél vedení na jeho parametrech. Ovšem roku 1890 přišel vědec Sebastian Ziani de Ferranti s teorií, že v případě málo zatížených nebo nezatížených dlouhých vedení je napětí na konci vyšší než na jeho začátku. Tomuto jevu se říká podle svého objevitele Ferrantiho jev [13].

Charakteristickými parametry dle [14], [15] podél vedení je odpor  $R$ , indukčnost  $L$  (magnetické pole kolem vodičů), kapacita  $C$  (elektrostatické pole od vodiče k zemi) a svod  $G$  viz Obr. 4-3. Pro vedení délky 240 km a více jsou hlavními parametry kapacita a indukčnost. Pokud je vedení zatíženo, vzniká úbytek napětí především na odporu a indukčnosti. Ferrantiho jev vzniká v případě, že je vedení napájeno, ale nezatíženo, případně velmi málo zatíženo a proud tekoucí přes kapacity vedení je větší než proud tekoucí do zátěže. Skrze příčnou kapacitu vedení teče kapacitní proud do země, zároveň teče kapacitní proud skrze podélnou indukčnost a vzniká tak růst napětí podél vedení. S rostoucí délkou vedení se rozdíl napětí zvyšuje. Schématický popis a fázorový diagram jsou na Obr. 4-4.





Obr. 4-3: Parametry vedení

Obr. 4-4: Schéma a fázorový diagram  $\pi$  článku při chodu naprázdno

Ke stabilizaci napětí slouží sériové kondenzátory kompenzující indukčnost a kompenzační tlumivky kompenzující kapacitu vůči zemi. Použití sériových kondenzátorů může způsobit problémy jako sub-synchronní rezonanci, ferorezonanci nebo vysoké obnovovací napětí. Zatímco kondenzátory se umísťují podél vedení v různých místech, tlumivky se umísťují nejčastěji na konci vedení. V tomto případě je rozdíl napětí mezi začátkem a koncem vedení regulován amplitudou a fázovým úhlem [14].

Potřeba kompenzační tlumivky vzniká u dlouhých přenosových vedení 220 kV a výše. Kabe-  
lové vedení má mnohem větší kapacitu vůči zemi než venkovní vedení a musí u něj být již při  
napětí nad 100 kV použita tlumivka. To stejné se týká velkých městských sítí, kde se musí zabránit  
zvýšenému napětí v důsledku poruchy velkého odběru [14].

Problém se zvýšeným napětím může nastat i při paralelní kompenzaci jalového výkonu induk-  
tivního charakteru. Běžně provozované elektrické zátěže jsou induktivního charakteru a pro svůj  
provoz potřebují jalový výkon taktéž induktivního charakteru, který je pro přenos nežádoucí z dů-  
vodu zvýšených ztrát na vedení. Z tohoto důvodu se provádí kompenzace, kdy je paralelně k zátěži  
připojen zdroj kapacitního jalového výkonu (kondenzátor), který kompenzuje zmíněný induktivní  
jalový výkon. Důsledkem je menší přenášený jalový výkon a tím snížené ztráty na reaktanci na  
vedení. Čím více roste spotřeba jalového výkonu, tím více kondenzátorů se musí připojit. V při-  
padě, že je spotřeba jalového výkonu přerušena, mohou být připojené kondenzátory stále v pro-  
vozu. Tím se jalový výkon dodávaný kondenzátory začne přenášet po vedení kvůli absenci induk-  
tivní zátěže, která by ho spotřebovala. Následkem je zvyšující se napětí na konci vedení při zacho-  
vání stejného napájecího napětí [14].

Matematický popis Ferrantiho jevu je dle [16] výpočtem rozdílu napětí mezi napájecí stranou  
a nezátěženou stranou:

Pro  $\pi$  model vedení platí následující:

$$\bar{U}_1 = \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2}\right) \cdot \bar{U}_2 + \bar{Z} \cdot \bar{I}_2 \quad (4.2)$$

Vzhledem k tomu, že se jedná o nezatížené vedení, bude  $\bar{I}_2 = 0$

$$\bar{U}_1 = \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2}\right) \cdot \bar{U}_2 \quad (4.3)$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2}\right) \cdot \bar{U}_2 - \bar{U}_2 \quad (4.4)$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \bar{U}_2 \cdot \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2} - 1\right) \quad (4.5)$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \bar{U}_2 \cdot \left(\frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2}\right) \quad (4.6)$$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_2 = \bar{U}_2 \cdot \left(\frac{j\omega Cl \cdot (Rl + j\omega Ll)}{2}\right) \quad (4.7)$$

Pro dlouhá vedení se může elektrický odpor zanedbat  $R = 0$

$$\bar{U}_1 - \bar{U}_2 = -\bar{U}_2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot l^2 \cdot L \cdot C}{2} \quad (4.8)$$

$$\bar{U}_2 - \bar{U}_1 = \bar{U}_2 \cdot \frac{\omega^2 \cdot l^2 \cdot L \cdot C}{2} \quad (4.9)$$

Z výsledné rovnice je patrné, že přírůstek napětí bude kladný, tudíž napětí na konci vedení bude mít vyšší hodnotu než na začátku a jeho velikost bude závislá na druhé mocnině délky vedení. Zároveň je zřejmé, že Ferrantioho jev je závislý jak na kapacitě, tak indukčnosti vedení.

Ačkoliv se simulace nezabývají přímo problematikou ferorezonančního přepětí nebo samobuzení, v reálné zkoušce se tyto jevy mohou vyskytovat, jak popisuje například podkapitola 5.1. Z tohoto důvodu zde jsou popsány základní informace o této problematice.

## 5 NAJÍŽDĚCÍ TRASY PŘI STARTU ZE TMY

Najížděcí trasy jsou základním pilířem při obnově po poruše typu blackout. Slouží k rozběhu vlastní spotřeby bloku elektrárny a tím k postupné obnově ES v případě, že není možná obnova ze zahraničí v dostatečně krátkém čase. Zdali je možné využít elektrárnu k najetí odstavené tepelné elektrárny, musí se nejprve ověřit, jestli je tuto službu schopna vykonávat. Elektromechanické simulaci, která má ověřit, zdali nedojde k významné odchylce napětí a frekvence se věnuje kapitola 6, 7 a 8. Aby byla reálná zkouška vyhodnocena jako úspěšná, musí dle [12] splňovat kritéria uvedená v Tab. 5-1. Ferorezonanční jev, který je popsán v trase Dlouhé Stráně – Chvaletice simulován nebyl, v programu MODES možnost simulace ferorezonančního jevu není možná a z důvodu postupného nabuzování generátoru do předem sestavené trasy by tento jev nevznikl. Důvodů, proč se simulace provádí je hned několik. Modely mohou poskytovat velmi přesný odhad chování systému v reálném provozu, což je využitelné jak při řízení sítě, tak při jeho rozvoji. Aby se simulace mohla uvažovat jako dostatečně přesná, je potřeba ji ověřit alternativním programem a zpětně i pomocí reálného měření. Užitečné může být nejen srovnání obou programů po stránce přesnosti výpočtu, ale i co se týče možností, které daný program nabízí (výhody a nevýhody). Dalším důvodem může být situace, kdy se dispečer bude rozhodovat při obnově mezi dvěma trasami, která je vhodnější například na základě stability, napěťových poměrů apod. V následujících odstavcích jsou popsány základní informace o trase startu ze tmy Dlouhé Stráně – Chvaletice a Orlík – Chvaletice. Další informace jsou v [12] a [17].

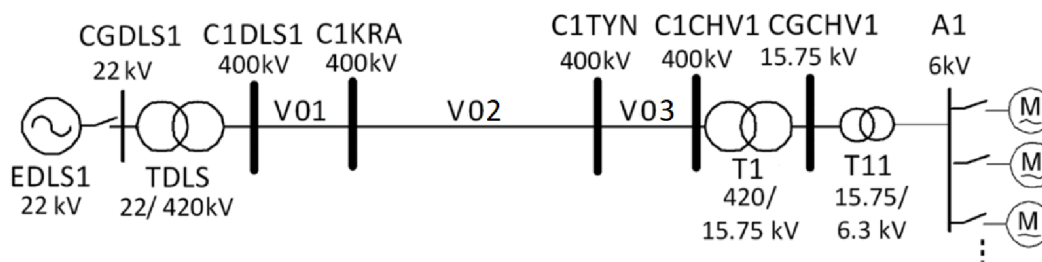
Tab. 5-1: Kritéria pro úspěšnou zkoušku [12]

Kritérium
$f$ během ostrovního provozu $\pm 200$ mHz (mimo rozběhy pohonů)
$f$ během rozběhu pohonů VS ECHV $< \pm 1,5$ Hz
$U$ na vlastní spotřebě $6 \div 6,4$ kV
$U$ na vlastní spotřebě při rozběhu motorů $> 4,8$ kV

### 5.1 Najížděcí trasa Dlouhé stráně – Chvaletice

Přečerpávací elektrárna Dlouhé stráně je jeden ze zdrojů schopný startu ze tmy.

Na Obr. 5-1 [12] je zobrazeno schéma trasy a v Tab. 5-2 časy spuštění jednotlivých motorů i s jejich popisem.



Obr. 5-1: Schéma trasy Dlouhé Stráně – Chvaletice. Převzato a upraveno ze [12].

Tab. 5-2: Časy spuštění jednotlivých motorů trasy Dlouhé Stráně – Chvaletice. Převzato ze scénáře programu MODES.

Čas	Číslo motoru	Typ	Výkon [MVA]	Příkon [MVA]
100	1	Chladička	2,277	2,530
160	2	Kouřový ventilátor 1	1,024	1,138
190	3	Čerpadlo vodoproudých vývěv	0,281	0,312
220	4	Kondenzátní čerpadlo prvního stupně	0,281	0,312
280	5	Kondenzátní čerpadlo druhého stupně	0,846	0,940
340	6	Čerpadlo najíždějícího oleje	0,180	0,200
400	7	Napáječka	4,392	4,880
460	8	Kouřový ventilátor 2	1,024	1,138
670	9	Vzduchový ventilátor	1,084	1,204
700	10	Vzduchový ventilátor	1,084	1,204
820	11	První mlýnský okruh	0,708	0,787
880	12	Druhý mlýnský okruh	0,708	0,787
960	13	Třetí mlýnský okruh	0,708	0,787

Zároveň byla zpracována i elektromagnetická studie, která analyzovala zkoušku z pohledu ferorezonance nebo samobuzení. Kompletní studie je dostupná v [12].

V případě provozního zapínání blokového transformátoru naprázdno dochází vlivem nesymetrie magnetického toku v jádře k jeho přesycení a zapínací proudy mohou dosáhnout i několikanásobku jmenovitého proudu transformátoru, které ale vlivem tlumení klesnou a ustálí se na hodnotě magnetizačního proudu. V případě, že se blackstart provádí tak, že se najede jmenovité napětí celé trasy až do nejbližší rozvodny ke startované elektrárně a blokový transformátor se zapne naprázdno, hrozí riziko, že zapínací proud transformátoru bude mít nepravidelný průběh a napětí na trase bude dosahovat vysokých dočasných přepětí, které bude omezeno omezovači přepětí. Tento přechodný přepětíový děj je zapříčiněn ferorezonancí mezi podélnou reaktancí generátoru, kapacitou vedení a blokovým transformátorem s přesyceným magnetickým obvodem. Náchylnost blackstartu k tomuto ději je dána kombinací těchto parametrů, tvarem magnetizační křivky blokového transformátoru a okamžiku zapnutí vypínače vůči průběhu napětí. Vzniklý děj může mít i trvalý charakter. Ferorezonanční jev, jak již bylo uvedeno, je omezován svodiči přepětí, které přispívají k jeho ztlumení. Zároveň ale absorbují energii, na kterou nejsou dimenzované a mohou se zničit. Je tedy nutné se ferorezonančnímu ději při blackstartu vyhnout [12].

V rámci příprav byla také provedena analýza obvodu v programu ATP-EMTP a bylo zjištěno, že ferorezonanční jev nastává prakticky ve všech případech zapnutí. Ferorezonančnímu ději se lze vyhnout, pokud se najíždí z generátoru celá trasa zároveň s připojeným blokovým transformátorem. V tomto případě nedojde k přesycení magnetického obvodu transformátoru a ferorezonanční jev nenastává [12].

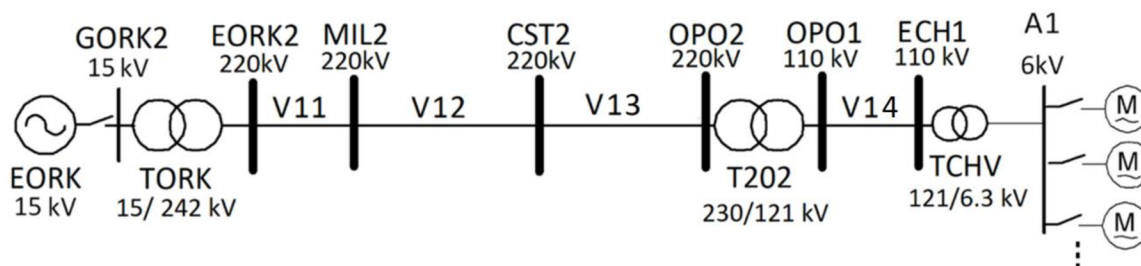
Další nežádoucí jev, který může nastat je samobuzení generátoru. Nastává v případě, že generátor není schopen kompenzovat kapacitní zátěž, například na dlouhých vedeních v provozu naprázdno. Výsledkem je trvalý nárůst napětí. Tento jev v tomto případě nenastává [12].

2. září 2017 byla provedena reálná zkouška startu ze tmy, která byla vyhodnocena jako úspěšná [12].

## 5.2 Najížděcí trasa Orlik – Chvaletice

Vodní elektrárna Orlik je další zdroj schopný napájet vlastní spotřebu bloku tepelné elektrárny Chvaletice v případě startu ze tmy.

Na Obr. 5-2 [12] je zobrazeno schéma trasy a v Tab. 5-3 časy spuštění jednotlivých motorů i s jejich popisem.



Obr. 5-2: Schéma trasy Orlik – Chvaletice. Převzato a upraveno ze [12].

Tab. 5-3: Časy spuštění jednotlivých motorů trasy Orlik – Chvaletice. Převzato ze scénáře programu MODES.

Čas	Číslo motoru	Typ	Výkon [MVA]	Příkon [MVA]
10	2.1	Chladička	2,277	2,530
60	2.2	Motory nízkého napětí	0,180	0,200
100	2.3	Kouřový ventilátor	4,464	4,960
150	2.4	Vzduchový ventilátor	1,080	1,200
200	2.5	Vzduchový ventilátor	1,080	1,200
250	2.6	Čerpadla vodoproudých vývěv	2·0,281	2·0,312
300	2.7	Kondenzátní čerpadlo prvního stupně	0,281	0,312
350	2.8	Kondenzátní čerpadlo druhého stupně	0,846	0,940
400	2.9	Čerpadlo najíždějícího oleje	0,180	0,200
450	2.10	Napáječka	4,392	4,880
500	2.11	První mlýnský okruh	0,708	0,787
530	2.12	Druhý mlýnský okruh	0,708	0,787
570	2.13	Třetí mlýnský okruh	0,708	0,787

Reálná zkouška rozběhu pohonů vlastní spotřeby elektrárny Chvaletice byla provedena v květnu 2008. V průběhu zkoušky poklesla frekvence během rozběhu kouřového ventilátoru, jakožto spotřebiče s největším výkonem cca o 1,4 Hz. Napětí nedosáhlo meze pro působení přepětové ochrany a zkouška tím byla úspěšně splněna [1].

## 6 MODELÝ TRAS V PROSTŘEDÍ MODES

Modely obou tras byly již v programu MODES vytvořeny firmou ČEPS. Následující odstavce popisují základní problematiku modelování jednotlivých komponent, součástí nejsou informace o jednotlivých parametrech, ty byly použity pro vytvoření nového modelu obou tras v programu PSCAD. Použitou symboliku mezi modely obou programů je možné dohledat v Tab. D-1. Jednotlivé popisy modelů vycházejí z dokumentu Popis modelování přechodných dějů v ES programem MODES, který je součástí balíku MODES. Neuvedené informace jsou vzhledem k jejich množství dohledatelné právě v tomto dokumentu.

### 6.1 Model generátoru

Jelikož se program MODES zabývá elektromechanickými přechodnými ději, je dle [24] možné při zanedbání elektromagnetických přechodných dějů ve statoru, nahradit generátor elektromotorickou silou  $E''$  za rázovou reaktanci. Dále se předpokládá pro zjednodušení rovnost  $X_q'' = X_d''$  a zanedbává se odpor statoru. V případě, že je generátor modelován současně s blokovým transformátorem, uváží se i jeho náhradní reaktance  $X_T$  a převod  $p$ :

$$X_T = u_K \cdot \frac{S_{Gn}}{S_{Tn}} \cdot \frac{U_{Tn}^2}{U_{Gn}}, \quad (6.1)$$

kde  $u_K$  je poměrné napětí nakrátko,  $S_{Gn}$  je jmenovitý výkon generátoru,  $S_{Tn}$  je jmenovitý výkon blokového transformátoru,  $U_{Tn}$  je jmenovité napětí transformátoru na straně generátoru a  $U_{Gn}$  je jmenovité napětí generátoru.

$$p = p_T \cdot \frac{S_v}{S_{Gn}}, \quad (6.2)$$

Kde  $p_T$  je poměr počtu závitů blokového transformátoru na straně generátoru ku počtu závitů na straně sítě a  $U_v$  je vztažné napětí.

### 6.2 Rovnice synchronního stroje

Při odvozování rovnic byly dle [24] přijaty tyto předpoklady:

- Platí pro malé odchylky otáček od synchronních.
- Jsou zanedbány transformační napětí (derivace statorových proudů podle času).
- Reaktance nejsou funkcí proudu (zanedbání sycení).
- Uvažuje se pouze 1. harmonická elektromotorické síly statoru.
- Rozložené vinutí rotoru se zjednodušeně uvažuje jako koncentrické.
- Tlumící vinutí (nebo účinek masivního rotoru) je nahrazeno po jednom ekvivalentním koncentrickém vinutí v podélné a dvou ekvivalentních koncentrických vinutí v příčné ose tlumící vinutí (nebo účinek masivního rotoru) je nahrazeno po jednom ekvivalentním koncentrickém vinutí v podélné a příčné ose.
- Tlumící vinutí jsou magneticky symetrická ( $X_q'' = X_d''$ ).
- Odpory statoru a kapacity mezi vinutími jsou zanedbány.
- Ztráty naprázdno a ztráty Jouleovy jsou hrazeny z mechanického výkonu.

Za těchto předpokladů platí dle [24] v Parkově transformaci, která je použita pro modelování generátoru v poměrných hodnotách pro rotorové obvody následující vztahy:

$$T_{d0}' \cdot E_q' = U_b + (X_d - X_d') \cdot I_d - E_q', \quad (6.3)$$

$$T_{q0}' \cdot E_d' = -(X_q - X_q') \cdot I_q - E_d', \quad (6.4)$$

$$T_{d0}'' \cdot E_q'' = E_q' + (X_d' - X_d'') \cdot I_d - E_q'', \quad (6.5)$$

$$T_{q0}'' \cdot E_d'' = E_d' - (X_q' - X_q'') \cdot I_q - E_d'', \quad (6.6)$$

kde  $E_q'$ ,  $E_d'$ ,  $E_q''$  a  $E_d''$  jsou průměty elektromotorických sil do os d a q,  $I_d$  a  $I_q$  jsou průměty proudu statoru,  $U_b$  je budicí napětí,  $T_{d0}'$ ,  $T_{d0}''$  a  $T_{q0}''$  jsou časové konstanty naprázdno,  $X_d$  je synchronní rázová reaktance v podélné ose,  $X_d'$  je přechodná reaktance v podélné ose,  $X_d''$  je rázová reaktance v podélné ose,  $X_q$  je synchronní reaktance v příčné ose a  $X_q'$  je přechodná reaktance v příčné ose.

Vztažnými hodnotami byly vzaty jmenovité hodnoty statorového proudu a napětí a budicí napětí naprázdno. Za těchto předpokladů je dle [24] elektromotorická síla za synchronní reaktance  $E_q$  rovna budicímu proudu a platí vztah:

$$E_q = I_b = E_q' - (X_d - X_d') \cdot I_d \quad (6.7)$$

Mechanická pohybová rovnice má následující tvar:

$$T_M \cdot s_G = \frac{N_T}{(1 + s_G) \cdot k_N} - \frac{P_G + \Delta P_G}{1 + s_U} - M_{AS} \quad (6.8)$$

$$\delta = \Omega_0 \cdot s_G \quad (6.9)$$

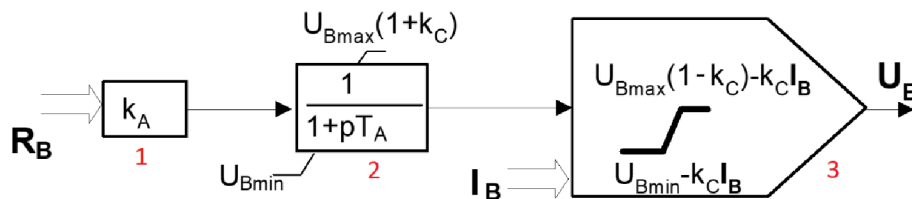
Kde  $s_G$  je skluz rotoru,  $\delta$  je absolutní zátěžný úhel,  $N_T$  je mechanický výkon turbíny vztažený na jmenovitý,  $P_G$  je elektrický výkon generátoru vztažený na jmenovitý zdánlivý výkon generátoru,  $T_M$  je mechanická časová konstanta vztažena na jmenovitý zdánlivý výkon,  $J$  je moment setrvačnosti,  $\Omega_M$  je mechanická kruhová rychlost,  $\Omega_0$  je synchronní kruhová rychlost,  $k_N$  je převodní koeficient mezi výkonem generátoru a turbíny a  $M_{AS}$  je asynchronní tlumící moment generátoru.

## 6.3 Model buzení a regulátoru buzení

Níže jsou popsány modely systému buzení, ze kterých se vycházelo při vytváření nových modelů v programu PSCAD. Některé modely byly upraveny, aby jejich schéma více odpovídalo použití při rozběhu vlastní spotřeby. Doplnkové funkce, které byly vyřazeny z provozu mají pouze slovní popis bez modelu.

### 6.3.1 Model budiče

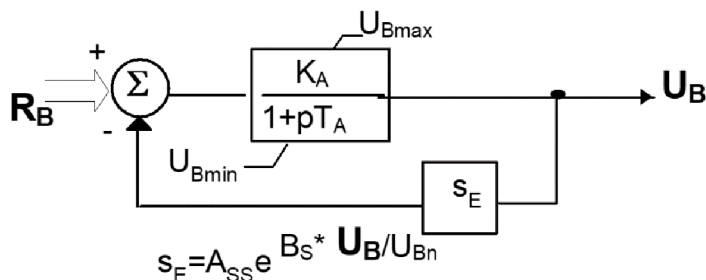
Pro trasu EDS – ECHV byl použit nezávislý tyristorový budič AC\_4. Jako zdroj zde slouží kompaudovaný pomocný synchronní generátor, který napájí tyristorový usměrňovač [24]. Blokové schéma tohoto budiče je na Obr. 6-1 [24].



Obr. 6-1: Budič AC\_4, převzato a upraveno z [24]

Funkční blok vyznačený červenou 1 prezentuje jednoduché zesílení vstupní veličiny. Blok vyznačený červenou 2 je přenos s omezením shora a zdola, přenosová funkce je zde zadána přímo v bloku. Blok vyznačený červenou 3 je nelinearita nebo funkční závislost, zde se jedná o omezení výstupní hodnoty shora a zdola. V dalších modelech jsou popsány již pouze rozdílné funkční bloky.

Pro trasu EOR – ECHV byl použit stejnosměrný budič DC\_1, který se používá u generátorů do 110 MW. Jedná se o model cize buzeného dynama s jedním budičím vinutím [24]. Blokové schéma je na Obr. 6-2 [24].



Obr. 6-2: Budič DC\_1, převzato z programu MODES

Parametr  $s_E$  respektuje sycení, které je zanedbáno.

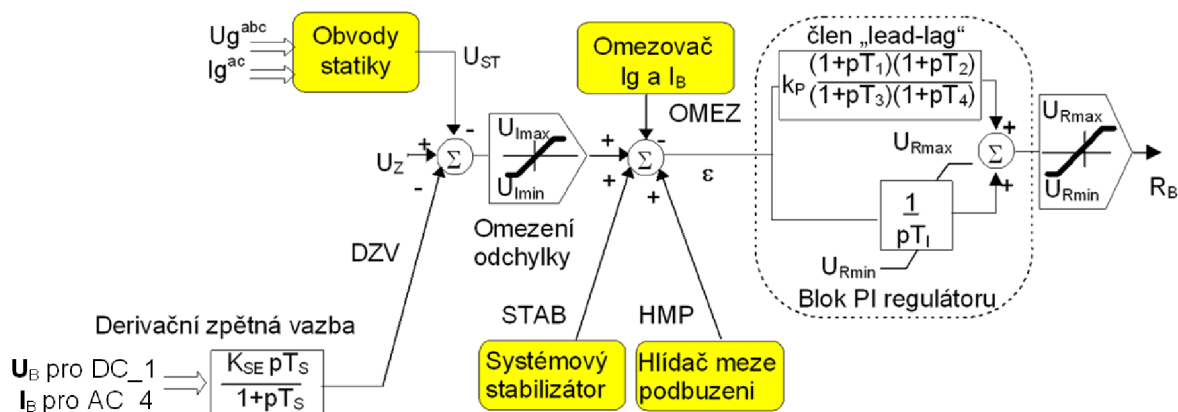
### 6.3.2 Model regulátoru buzení

Dle [24] je funkcí regulátoru buzení udržovat na svorkách generátoru (případně v jiném místě ES) zadané napětí, jedná se o tzv. primární regulaci. Regulátor zpravidla plní i další doplňkové funkce:

- Omezovač statorového a rotorové proudu OMEZ, který chrání generátor před přetížením statorového a rotorového obvodu.
- Hlídač meze podbuzení HMP, který nedovolí odbudit stroj tak, aby byla ohrožena statická stabilita, překročeno dovolené oteplení čelních spojek vinutí statoru a pokles napětí vlastní spotřeby pod dovolenou mez.
- Systémový stabilizátor STAB, který slouží k tlumení přechodných jevů, především elektromechanických kyvů, ke kterým dochází při nerovnováze činných a jalových výkonů a systémových kyvů, ke kterým může docházet v propojených soustavách.
- Sekundární regulátor jalového výkonu, který udržuje jalový výkon na zadané hodnotě, v tomto případě je pak potlačena funkce primárního regulátoru. Používá se v případě, že blok plní funkci regulace napětí v uzlu.

Blokové schéma regulátoru buzení je na Obr. 6-3 [24].



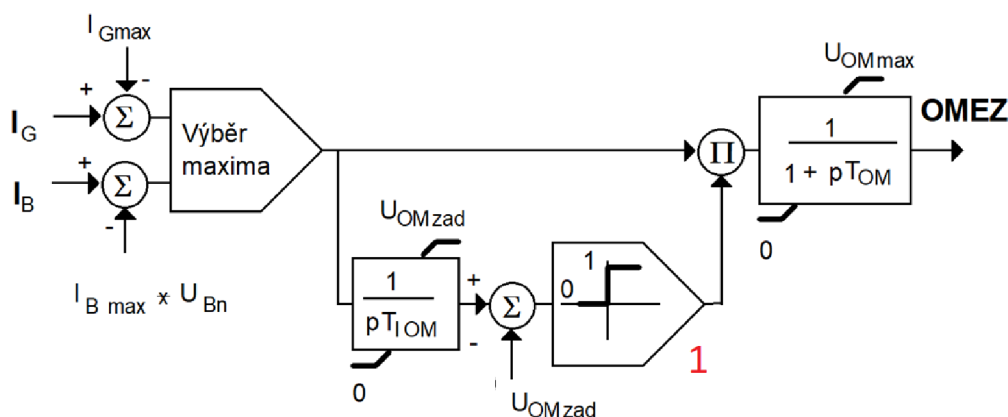


Obr. 6-3: Regulátor buzení, převzato a upraveno z [24]

Hodnota napětí  $U_{ST}$  se vytváří v závislosti na vzniku nesymetrie v síti. Pokud je síť symetrická, je měřená hodnota rozdílem svorkového napětí a jalového proudu násobeného statikou [24].

### 6.3.3 Doplnkové funkce regulátoru

Jak již bylo zmíněno, omezovač satorového a rotorového proudu chrání proti přetížení satorového a rotorového vinutí. Blokové schéma omezovače je na Obr. 6-4[24].

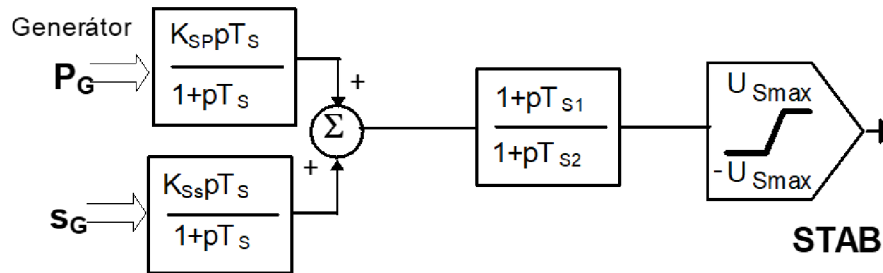


Obr. 6-4: Omezovač satorového a rotorového proudu, převzato a upraveno z [24]

Funkční blok vyznačený červeně 1 představuje nelinearitu, kdy v případě záporného vstupu je na výstupu hodnota 0 a v případě kladného vstupu je na výstupu hodnota 1. Mezní hodnoty  $I_{Gmax}$  a  $I_{Bmax}$  (vztažená k jmenovité hodnotě budící proudu) jsou volitelné [24].

Hlídač meze podbuzení je určen pro provoz generátoru do tvrdé sítě a při poklesu jalového výkonu do nedovolených hodnot stroj přibudí a odběr jalového výkonu klesne. Při rozběhu vlastní spotřeby je jalový výkon generátoru vnučen trasou a přibuzením by se ještě více zvětšil. Z tohoto důvodu je pro obě trasy zadáním parametru  $U_{Hmax} = 0$  vyřazen z činnosti.

Systémový stabilizátor mají moderní regulátory spolupracující s tyristorovými budicími soupravami [24]. Pro stejnosměrný budič DC\_1 je tedy systémový stabilizátor vyřazen z činnosti. Schéma modelu je na Obr. 6-5 [24].

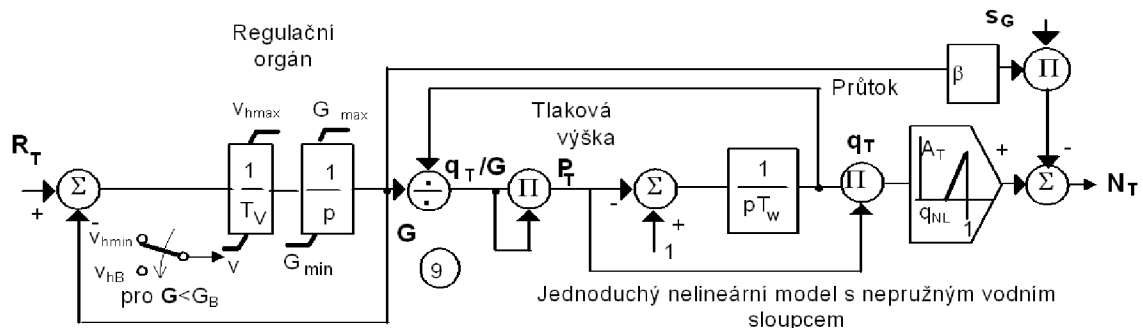


Obr. 6-5: Systémový stabilizátor [24]

Sekundární regulátor tvoří nadřazenou úroveň primárnímu regulátoru. Vzhledem k tomu, že je udržováno napětí na svorkách generátoru a blok tedy neplní funkci regulace napětí v uzlu, je pro obě trasy vyřazen. Žádaná hodnota  $U_s$  je tedy určena počátečním ustáleným stavem a regulátor buzení pracuje v režimu primární regulace [24].

### 6.4 Model turbíny a regulace turbíny

Model vodní turbíny byl dle [24] vytvořen dle metodiky IEEE. Byl uvažován průtok naprázdno a samoregulační efekt – výkonové změny při změnách otáček dané změnou úhlu dopadu vodního proudu na lopatky turbíny. Tento zjednodušený model lze aplikovat pro Francisovu i Kaplanovu turbínu. Model neuvažuje změnu spádu. Platí pro případy, kdy změna hladiny je oproti celkovému spádu zanedbatelná, nebo lze změny spádu zanedbat. Model bere v úvahu dynamický ráz při změnách otevření regulačního orgánu. Schéma turbíny je na Obr. 6-6 [24].

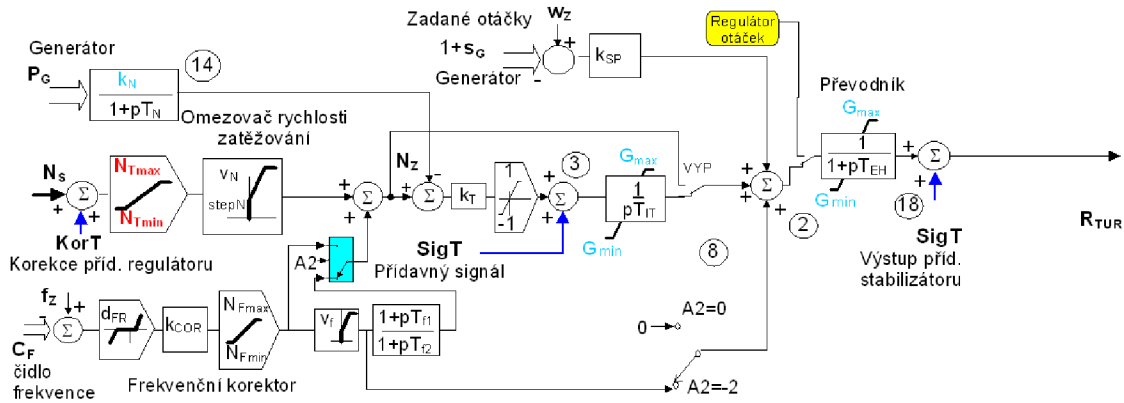


Obr. 6-6: Model turbíny [24]

Moderní elektronické regulátory vodních turbín dle [24] mohou plnit následující funkce:

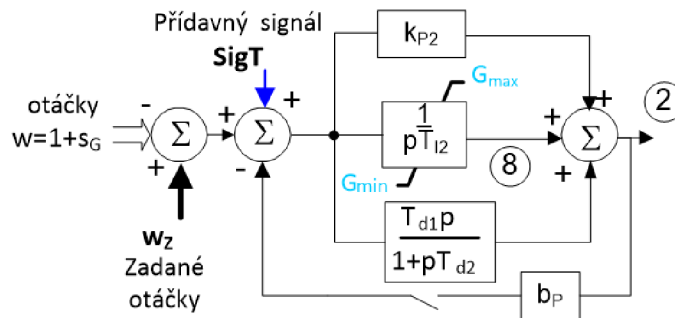
- Regulace výkonu tvoří základní režim regulace
- Regulace otevření se používá u reverzačních vodních turbín v čerpadlovém provozu.
- Regulace otáček se uplatňuje při spouštění bloku nebo když frekvence vybočí ze zadaných mezí.

Blokové schéma regulátoru vodní turbíny je na Obr. 6-7 [24].



Obr. 6-7: Model regulátor vodní turbíny [24]

Vzhledem k vlastnostem modelované trasy je její simulace spouštěna přímo v regulaci otáček. Blokové schéma je na Obr. 6-8 [24]. Trvalou statiku  $b_P$  lze vyřadit a regulátor se stane astatickým PID regulátorem.



Obr. 6-8: Regulátor otáček vodní turbíny [24]

### 6.5 Model transformátoru a vedení

Model transformátoru se stejně jako model vedení v programu MODES označuje Větev. Dle [24] je modelován pomocí náhradního dvojbranu –  $\Pi$  článku. V případě transformátoru se volí uzel strany s přepínatelnými odbočkami jako počáteční, tím odpadá nutnost přepočtu parametrů při změně odbočky. Vstupními parametry vedení jsou odpor  $R$  ( $\Omega$ ), reaktance  $X$  ( $\Omega$ ) a susceptance  $B$  (S). Pro transformátor jsou to stejné parametry, jen určené ze štítkových údajů transformátoru s využitím následujících rovnic.

$$R = \frac{P_K}{S_{Tn}} \cdot Z_{Tn}, \tag{6.10}$$

$$X = \sqrt{(u_K \cdot p_{KON}^2 \cdot Z_{Tn})^2 - R^2}, \tag{6.11}$$

$$B = -\frac{i_0}{Z_{Tn}}, \tag{6.12}$$

$$Z_{Tn} = \frac{U_{TnKON}^2}{S_{Tn}}, \tag{6.13}$$

kde  $P_K$  jsou ztráty nakrátko,  $u_K$  je poměrné napětí nakrátko při jmenovitém stavu,  $p_{KON}$  je podíl aktuálního a jmenovitého počtu závitů na straně koncového uzlu,  $i_0$  je poměrný proud,  $Z_{Tn}$  je jmenovitá impedance,  $S_{Tn}$  je jmenovitý výkon a  $U_{TnKON}$  je napětí na straně koncového uzlu.

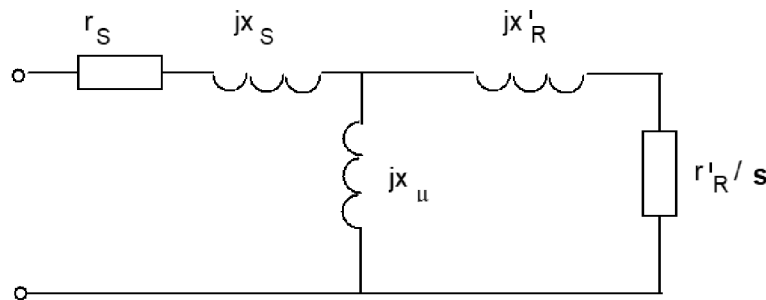
Dalším parametrem je poměrný převodu transformátoru  $p_T$ .

$$p_T = \frac{U_{TnP}}{U_{TnK}} \cdot \frac{U_{VK}}{U_{VP}} \quad (6.14)$$

Kde  $U_{TnP}$  je jmenovité napětí transformátoru pro počáteční uzel ve stavu naprázdno,  $U_{TnK}$  je jmenovité napětí transformátoru pro koncový uzel ve stavu naprázdno. U transformátoru s přepínačem odboček to platí pouze pro střední odbočku.  $U_{VK}$  je vztažné napětí pro koncový uzel a  $U_{VP}$  je vztažné napětí pro počáteční uzel.

## 6.6 Model zátěže

V případě, že nejsou známy jednotlivé parametry motorů, ale je známý podíl motorické zátěže na celkovém odběru, lze dle [24] motorickou zátěž modelovat jedním ekvivalentním asynchronním motorem. Je použit tzv. stacionární model zanedbávající elektromagnetické přechodné děje v obvodech statoru a rotoru. Náhradní schéma je na Obr. 6-9 [24].



Obr. 6-9: Model ekvivalentního asynchronního motoru [24]

Skluz  $s$  představuje poměrnou frekvenci proudů indukovaných do vinutí rotoru:

$$s = \frac{s_R + s_U}{1 + s_U} \quad (6.15)$$

Dynamika je reprezentována pohybovou rovnicí:

$$T_{MECH} \cdot s_R = M_{MECH} - \frac{P_{EL}}{1 + s_U} \quad (6.16)$$

Mechanický výkon zátěže je dán rovnicí:

$$M_{MECH} = k_{ZAT} \cdot \cos\varphi_n \cdot k_A \cdot [1 - A_M - B_M + A_M \cdot (1 - s_R) + B_M \cdot (1 - s_R)^2] \quad (6.17)$$

kde  $T_{MECH}$  je mechanická časová konstanta pohonu,  $s_R$  je skluz rotoru,  $s_U$  je poměrná odchylka frekvence,  $P_{EL}$  je elektrický výkon procházející vzduchovou mezerou,  $k_{ZAT}$  je zatěžovatel,  $\cos\varphi_n$  je

jmenovitý účinek,  $k_A$  je koeficient měřítka,  $A_M$  a  $B_M$  jsou parametry závislosti zatěžovacího momentu na skluzu.

Při zanedbání elektromagnetických přechodných dějů ve statoru je dle [24] možné nahradit asynchronní motor elektromotorickou silou  $E$  za náhradní impedanci skládající se z odporu statoru  $R_l$  a náhradní reaktance  $X$ . V případě jednoklecového modelu se jedná o přechodné modely značené "''" a dvouklecového modelu rázové hodnoty značené "'''".

Při uvažování po dvou ekvivalentních koncentrických vinutích v podélné a příčné ose je dle [24] obdržén dvouklecový model se vztahy:

$$U = E'' + [(R + R_V) + j(X_V - X'')] \cdot I_S \quad (6.18)$$

$$E'' = E' + \Psi \quad (6.19)$$

$$X'' = X_1 + \frac{X'_2 \cdot X'_3 \cdot X_\mu}{X'_2 \cdot X'_3 + X'_2 \cdot X_\mu + X'_3 \cdot X_\mu} \quad (6.20)$$

kde  $U$  značí svorkové napětí,  $E$  je vnitřní elektromotorickou sílu,  $R$  je odpor statoru,  $R_V$  je odpor přívodního vedení,  $X_V$  je reaktance přívodního vedení,  $X$  je náhradní reaktance,  $I_S$  je proud statoru,  $\Psi$  je magnetický spřažený tok,  $X_1$  je rozptylová reaktance statoru,  $X_2$  je rozptylová reaktance rotoru přepočtená na stator,  $X_3$  je rozptylová reaktance druhého ekvivalentního obvodu rotoru přepočtená na stator,  $X_\mu$  je magnetizační reaktance.

Mechanickou pohybovou rovnicí lze napsat ve tvaru:

$$j_{s_R} = M_{MECH} + \Delta M_M - M_{EL} \quad (6.21)$$

Rovnice mechanického protimomentu:

$$M_{MECH} = M_{MECH0} \cdot f(s_R) \quad (6.23)$$

Kde  $s_R$  je skluz rotoru,  $M_{MECH}$  je mechanický moment poháněného zařízení,  $M_{EL}$  je elektrický moment rotoru,  $\Delta M_M$  jsou mechanické ztráty,  $M_{MECH0}$  je mechanický protimoment zátěže při nulovém skluzu (synchronních otáčkách) a  $f(s_R)$  je bezrozměrná funkce skluzu, mající pro nulový skluz hodnotu rovnou 1.

Po převedení do poměrných hodnot a úpravách má výsledná pohybová rovnice tvar:

$$T_M \cdot s_R^0 = \cos \varphi'_n \cdot k_{ZAT} \cdot k_C \cdot f(s_R) + dM_0 + k_{M1}(1 - s_R) - Re\{E'' \cdot I_S^*\} \quad (6.24)$$

Kde  $\cos \varphi'_n$  je redukovaný účinek,  $k_{ZAT}$  je zatěžovatel,  $k_C$  je činitel měřítka,  $s_R$  je skluz rotoru,  $dM_0$  a  $k_{M1}$  jsou parametry sloužící k modelaci ztrát třením a ventilací.

## 7 MODELÝ TRAS V PROSTŘEDÍ PSCAD

Modely tras byly v programu PSCAD vytvořeny za účelem porovnání výsledků s programem MODES. Programy nejsou logicky totožné, pokud to bylo možné, byly použity jednotlivé komponenty z knihovny Master Library, v druhém případě musely být komponenty nově namodelovány. Parametrizace není taktéž totožná, v některých případech má více parametrů k zadání PSCAD, v jiných MODES. V případě, že není parametr komponenty zmíněn, jeho hodnota byla ponechána ve výchozím stavu. Vytváření tras probíhalo způsobem, aby se sobě modely, co se týče parametrů, nejvíce podobaly a výsledek byl co nejvíce relevantní. Zdrojem hodnot parametrů je již vytvořený model v prostředí MODES. V příloze E je na Obr. E-1 výsledné schéma trasy EDS – ECHV a na Obr. E-2 je výsledné schéma trasy EOR – ECHV.

Následující podkapitoly informují o postupu modelování jednotlivých komponent a zadávání parametrů způsobem, aby bylo možné vytvořit totožný model. Způsob popisu je následovný: Jsou dány informace o parametrech komponenty. V případě, že se pro danou komponentu zadává pouze jedna sada parametrů, jsou ihned přiřazeny hodnoty. V opačném případě jsou hodnoty přiřazeny v přehledné tabulce. Pokud byla vytvořena komponenta nová, přibyla navíc informace o sestavení a parametrizaci.

### 7.1 Model generátoru

V knihovně MACHINES je model generátoru v Parkově transformaci dq0 již vytvořený. Matematický popis modelu je dostupný v dokumentaci programu [20], ze které se vycházelo i při parametrizaci modelu.

V příloze A je na Obr. A-1 vyobrazen model se vstupy a výstupy a popsána celková parametrizace generátoru pro obě trasy.

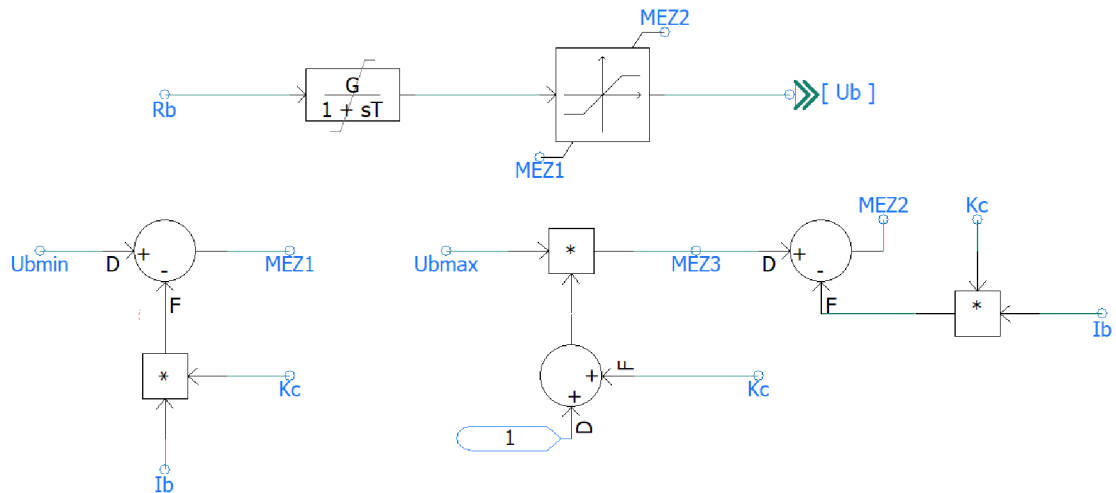
### 7.2 Model buzení a regulátoru buzení

V prostředí PSCAD byl vytvořený nový model budiče, regulátoru buzení, omezovače proudů a systémového stabilizátoru pomocí funkčních bloků z knihovny CSMF. Hlídač meze podbuzení a sekundární regulátor byly zadanými parametry v MODESu uvedeny mimo činnost, nebylo tedy potřeba je modelovat. U všech vytvořených modelů byla využita metodika modelů z programu MODES, které jsou dostupné v kapitole 6. Vstupní a výstupní parametry modelů, pokud není uvedeno jinak, jsou v poměrných hodnotách.

#### 7.2.1 Model Budiče

Pro trasu EDS – ECHV byl namodelován tyristorový nezávislý budič. Vstupními parametry jsou výstupní hodnota z regulátoru budiče  $R_b$  a budicí proud  $I_b$ . Výstupem je budicí napětí  $U_b$ . V příloze A jsou popsány parametry modelu a na Obr. A-2 je vyobrazen model se vstupy a výstupy.

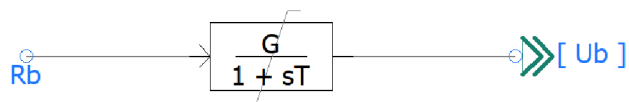
Pro sestavení vnitřní struktury modelu byly využity následující bloky z knihovny CSMF: Multiplier, Summing/Differencing Junctions, Real Pole a Hard Limiter, u kterého jsou limitní hodnoty vyvedeny externě. Na Obr. 7-1 je vyobrazen model vnitřní struktury tyristorového budiče. Parametry vnitřní struktury jsou v Tab. A-4 přílohy A.



Obr. 7-1: Vnitřní struktura AC budiče

Pro trasu EOR – ECHV byl namodelován stejnosměrný budič. Vstupní a výstupní hodnoty jsou stejné jako v případě tyristorového budiče. Sycení  $s_E$  bylo zanedbáno. V příloze A jsou popsány parametry modelu a na Obr. A-3 je vyobrazen model se vstupy a výstupy.

Pro sestavení vnitřní struktury modelu byly využity následující bloky z knihovny CSMF: Real Pole. Na Obr. 7-2 je vyobrazen model vnitřní struktury stejnosměrného budiče. Parametry vnitřní struktury jsou v Tab. A-6 přílohy A.

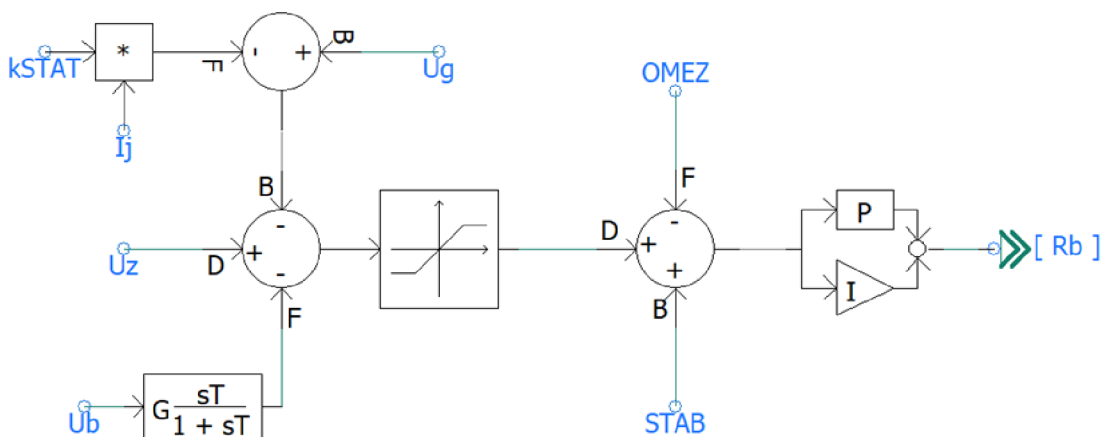


Obr. 7-2: Vnitřní struktura modelu DC budiče

### 7.2.2 Model regulátoru buzení

Vstupními parametry regulátoru buzení jsou odchylky  $OMEZ$  a  $STAB$ , požadované napětí na svorkách generátoru  $U_z$ , budící napětí  $U_b$ , budící proud  $I_b$ , napětí na svorkách generátoru  $U_g$  a jalový proud generátoru  $I_j$ . Výstupem je hodnota  $R_b$  dále vstupující do budiče. Vzhledem k tomu, že je regulováno pouze svorkové napětí, nikoli napětí v některém z uzlů, je zadaná hodnota napětí  $U_z$  konstantou a odpovídá hodnotě pro počáteční chod. V příloze A jsou popsány parametry modelu a na Obr. A-4 je vyobrazen model se vstupy a výstupy.

Pro sestavení vnitřní struktury modelu byly využity následující bloky z knihovny CSMF: Multiplier, Summing/Differencing Junctions, Differential Pole, Hard Limiter, PI Controller. Na Obr. 7-3 je vyobrazen model vnitřní struktury regulátoru buzení. Parametry vnitřní struktury jsou v Tab. A-9 až Tab. A-11 přílohy A.



Obr. 7-3: Vnitřní struktura regulátoru buzení

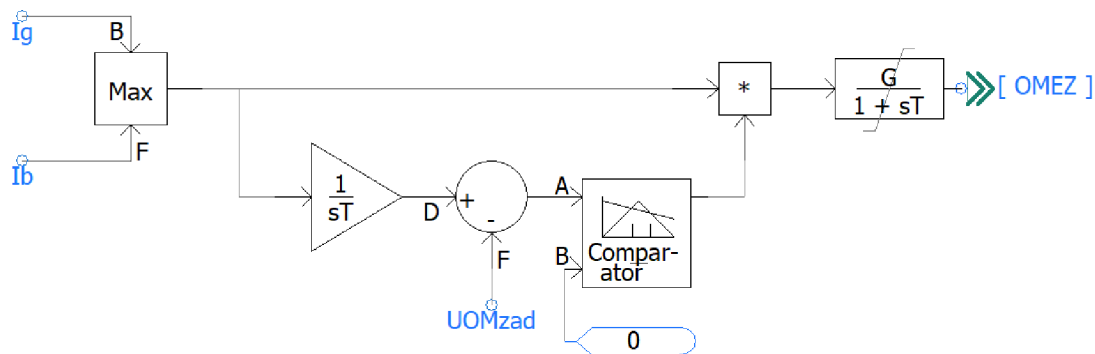
V případě trasy EDS – ECHV je namísto vstupu  $U_b$  vstup  $I_b$ .

### 7.2.3 Model omezovače proudů

Omezovač proudů je doplňkovou funkcí regulátoru buzení. Vstupním parametrem je proud generátoru  $I_g$  a budící proud  $I_b$ . Proud generátoru se vypočítá s využitím vzorce, kde  $I_c$  je činný proud generátoru a  $I_j$  jalový proud. Výstupem je odchylka omezovače  $OMEZ$ . Pro výpočet proudu generátoru byla použita rovnice 7.1. V příloze A jsou popsány parametry modelu a na Obr. A-5 je vyobrazen model se vstupy a výstupy.

$$I_g = \sqrt{I_c^2 + I_j^2} \tag{7.1}$$

Pro sestavení vnitřní struktury modelu byly využity následující bloky z knihovny CSMF: Maximum/Minimum Function, Multiplier, Integrator, Summing/Differencing Junctions, Two Input Comparator, Real Pole. Na Obr. 7-4 je vyobrazen model vnitřní struktury omezovače proudů. Parametry vnitřní struktury jsou v Tab. A-13 až Tab. A-15 přílohy A.



Obr. 7-4: Vnitřní struktura modelu omezovače proudů

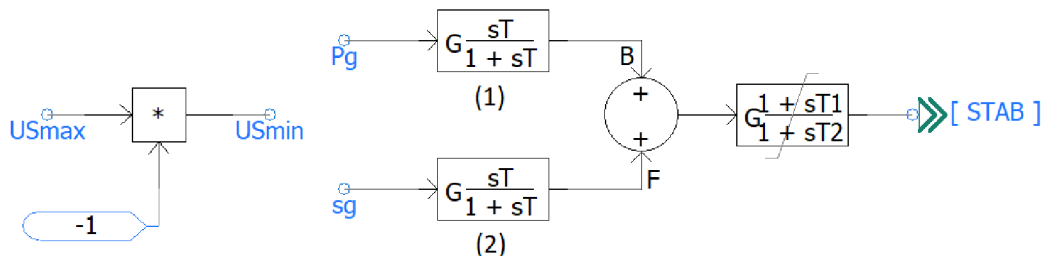


### 7.2.4 Model systémového stabilizátoru

Systémový stabilizátor je doplňkovou funkcí regulátoru buzení. Vstupním parametrem je skluz generátoru  $s_g$  vypočítaný z otáček generátoru  $W$  viz rovnice 7.2. Výstupem je stabilizační odchylka  $STAB$ . V příloze A jsou popsány parametry modelu a na Obr. A-6 je vyobrazen model se vstupy a výstupy.

$$s_g = W - 1 \tag{7.2}$$

Pro sestavení vnitřní struktury modelu byly využity bloky z knihovny CSMF: Multiplier, Summing/Differencing Junctions, Differential Pole (1), Differential Pole (2), Lead-Lag Pole. Na Obr. 7-5 je vyobrazen model vnitřní struktury omezovače proudů. Parametry vnitřní struktury jsou v Tab. A-17 až Tab. A-18 přílohy A.



Obr. 7-5: Vnitřní struktura modelu stabilizátoru

### 7.3 Model turbíny a regulace turbíny

Vzhledem k tomu, že již vytvořený model turbíny i regulace turbíny v knihovně PSCAD odpovídá modelu v programu MODES, nebylo třeba vytvářet nové modely. Byly tedy použity modely z knihovny pouze s upravenými parametry.

Pro turbínu byl vybrán model Hydro Tur 1. Jedná se o model s nepružným vodním sloupcem bez vyrovnávací nádrže. V příloze A jsou popsány parametry modelu a na Obr. A-7 je vyobrazen model se vstupy a výstupy. Vstupními parametry jsou otáčky  $w$ , otevření ventilů  $z$  a referenční otáčky  $W_{ref}$ . Vzhledem k tomu, že se mají udržovat synchronní otáčky, je parametr  $W_{ref}$  roven 1. Výstupními parametry jsou Mechanický moment hřídele  $T_m$  a otevření ventilů pro počáteční chod  $z_i$ .

Pro regulátor turbíny byl vybrán model Hydro Gov 2. Jedná se o otáčkový PID regulátor. V příloze A jsou popsány parametry modelu a na Obr. A-8 je vyobrazen model se vstupy a výstupy. Vstupními parametry jsou otáčky  $w$ , otevření ventilů při počátečním chodu  $z_0$  a referenční otáčky  $W_{ref}$ . Vzhledem k tomu, že se mají udržovat synchronní otáčky, je parametr  $W_{ref}$  také roven 1. Výstupním parametrem je otevření ventilů  $z$ . V obou případech byla vyřazena trvalá statika.

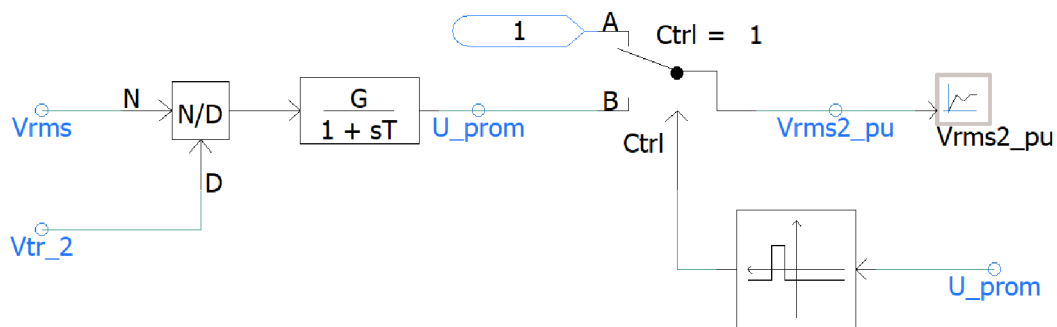
## 7.4 Model transformátoru

Pro modelování transformátorů byl využit již vytvořený model dvojvinutového transformátoru v knihovně PSCAD. Ačkoli jsou v reálné trase použity některé trojvinutové transformátory, jedná se o přijatelné zjednodušení v případě nahrazení dvojvinutovými. Třetí vinutí je v případě zkoušky odpojeno a vzájemná indukce mezi zapojeným a odpojeným vinutím by na simulaci měla mít minimální vliv. Pro obě trasy jsou informace o parametrizaci transformátorů uvedeny v příloze B. Názvy transformátorů korespondují s názvy ve schématech tras v kapitole 5.

### 7.4.1 Přepínač odboček

Přepínání odboček transformátoru není parametrem přímo nastavovaného transformátoru, ale provádí se tak, že se přivede napětí ke vstupu přepínače odboček *Tap pu* v poměrné hodnotě, jak lze vidět na Obr. B-1 přílohy B. Napětí lze zadat buď přímo hodnotou, nebo sestavit mechanismus, který bude napětí měnit v závislosti na požadované úrovni napětí primárního/sekundárního vinutí. Tento mechanismus byl získán z [19] a upraven, aby odpovídal požadavkům. V příloze B jsou popsány jednotlivé parametry přepínače.

Vnitřní struktura bloku přepínače byla mírně pozměněna viz Obr. 7-6. Z knihovny CSMF byla vybrána komponenta Range Comparator a Two Input Selector. V první zmíněné komponentě došlo ke změně parametru **Lower input limit** z hodnoty -1.0 na 0.978 a **Upper input limit** z hodnoty 1.0 na 1.022. Touto změnou se docílila necitlivost přepínače 2,2 %. V případě, že tedy napětí klesne/stoupne maximálně o 2,2 % oproti jmenovité hodnotě, přepínač nevybaví.



Obr. 7-6: Vnitřní struktura přepínače odboček

V konečné fázi nebyl přepínač odboček v simulacích použit.

## 7.5 Model vedení

Vedení se v PSCADu vytváří pomocí konfigurátoru Component Wizard. Byl vybrán frekvenčně nezávislý model vedení s rozloženými parametry, nazývaný Bergeron Model. U tohoto modelu není třeba znát informace o geometrickém uspořádání vodičů, které nemáme k dispozici, a parametry se zadávají přímo ve jmenovitých hodnotách vztažených na délku. Vzhledem k průběhu frekvence, která se v simulacích mění, bude mít frekvenčně nezávislý model pravděpodobně mírně odlišené výsledky než frekvenčně závislý. Na výslednou simulaci by ale toto zjednodušení mělo mít minimální dopad. Druhou možností je použití  $\Pi$  článku se soustředěnými parametry z knihovny PI SECTIONS. Příručka PSCADu [20] doporučuje  $\Pi$  článek používat u vedení s délkou maximálně 15 km. Přesnost modelu  $\Pi$  článku je oproti modelu s rozloženými parametry nižší. Pokud to tedy bylo možné, byl využit model s rozloženými parametry.

V příloze C jsou popsány jednotlivé parametry vedení pro  $\Pi$  článek a pro model s rozloženými parametry.

## 7.6 Model zátěže

Z knihovny MACHINES byl vybrán model Induction Machine reprezentující zátěž v podobě asynchronního motoru. V příloze C je na Obr. C-1 je vyobrazen model asynchronního motoru a celková parametrizace.

Vstup  $W$  představuje otáčkovou regulaci s konstantní rychlostí v poměrných hodnotách. Vstup  $TL$  představuje regulaci otáček na základě výpočtu založeném na mechanickém momentu, elektrickém momentu, setrvačnosti stroje a tlumení. Vstup  $S$  určuje, zda motor pracuje v otáčkové regulaci s konstantní rychlostí, nebo v otáčkové regulaci založené na již zmíněných vstupních parametrech. Všechny zátěže byly namodelovány pro hodnotu  $S=0$ , tedy otáčky jsou určeny na základě výpočtu. Blok Timed breaker Logic Open@t0 slouží k zadání parametru spojeno/rozpojeno vypínače BRK, jednotlivé časy vybavení jsou v tabulce. Blok se vstupní hodnotou  $W$  a výstupní  $T_m$  slouží k zadání koeficientu zatížení (na Obr. C-1 má hodnotu 0,8) v poměrných hodnotách s respektováním vztahu 7.3. Zdrojem hodnot parametrů motorů byly data z programu MODES. Při zadání těchto hodnot do modelů motorů v programu PSCAD neodpovídalo zatížení jmenovitému příkonu. Pomocí koeficientu zatížení se docílilo stavu, kdy motor v ustáleném chodu odebíral plný jmenovitý výkon. Hodnoty koeficientů zatížení pro jednotlivé motory jsou v Tab. C-5 přílohy C.

$$T_m \sim \omega^2 \quad (7.3)$$

Rovnice mechanického pohybu stroje:

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m, \quad (7.4)$$

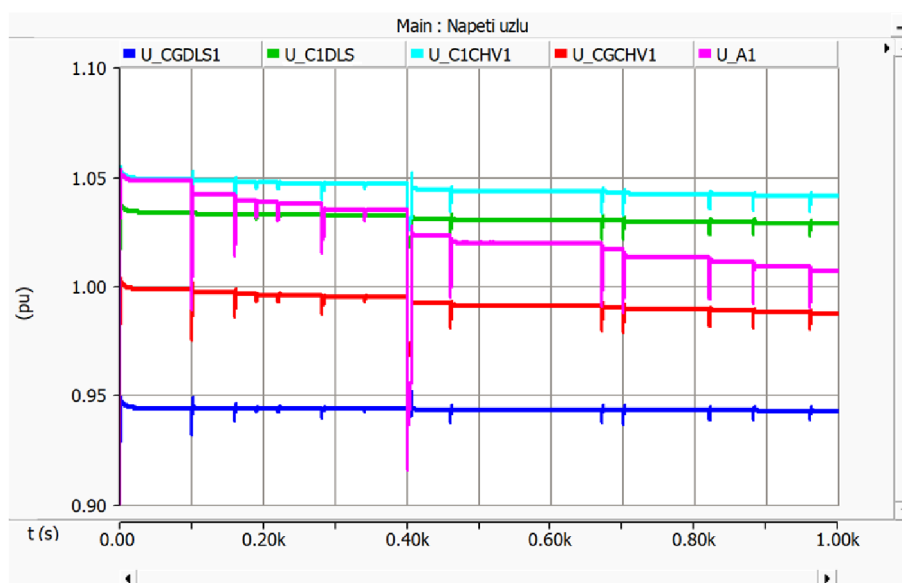
kde elektrický moment  $T_e$  je vypočítán na základě vstupních parametrů napětí a proudu,  $T_m$  je mechanický moment,  $J$  je moment setrvačnosti pohyblivých částí,  $\omega_m$  je frekvence a  $B$  odpovídá mechanickému tlumení.

## 8 VÝSTUP PROGRAMŮ

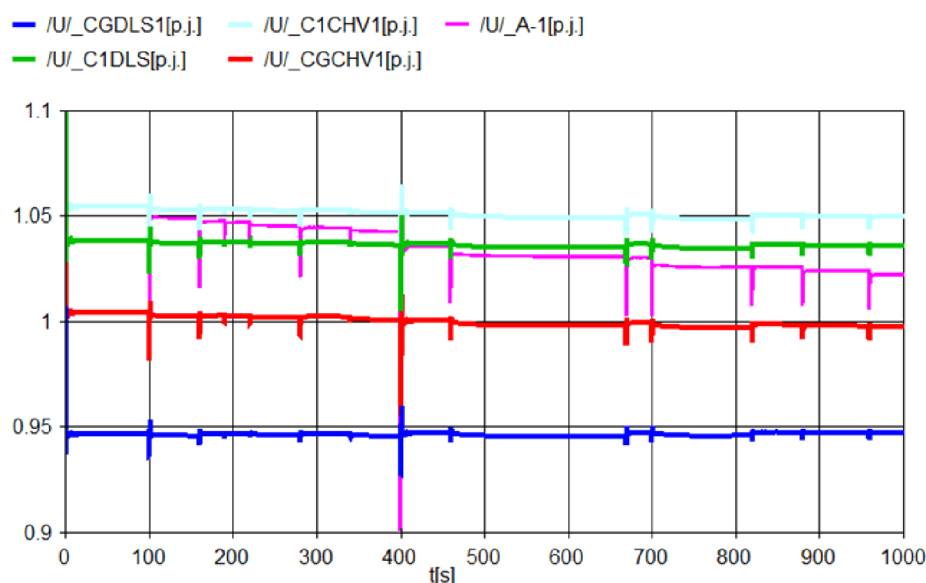
V této kapitole jsou popsány grafické výstupy jednotlivých tras z obou programů, jejich vzájemné porovnání a pokud to bylo možné, tak i porovnání s reálnou zkouškou. Referenčními výstupy jsou simulace z programu MODES. Napětí byla měřena vždy na primární a sekundární straně transformátoru. Frekvence byla měřena z otáček generátoru. Pojmenovaná napětí i vztahné hodnoty uzlů odpovídají schémátům v kapitole 5. Odečet hodnot probíhal z grafických průběhů, jedná se tedy o přibližné hodnoty.

### 8.1 Trasa Dlouhé stráně – Chvaletice

Na následujících grafických výstupech (Obr. 8-1 až Obr. 8-4) jsou vyobrazeny průběhy napětí a frekvence. Simulace proběhla dle scénáře v Tab. 5-2. Čas trvání simulace v programu PSCAD byl 1000 s, krok simulace 30  $\mu$ s a krok vykreslování 210  $\mu$ s.

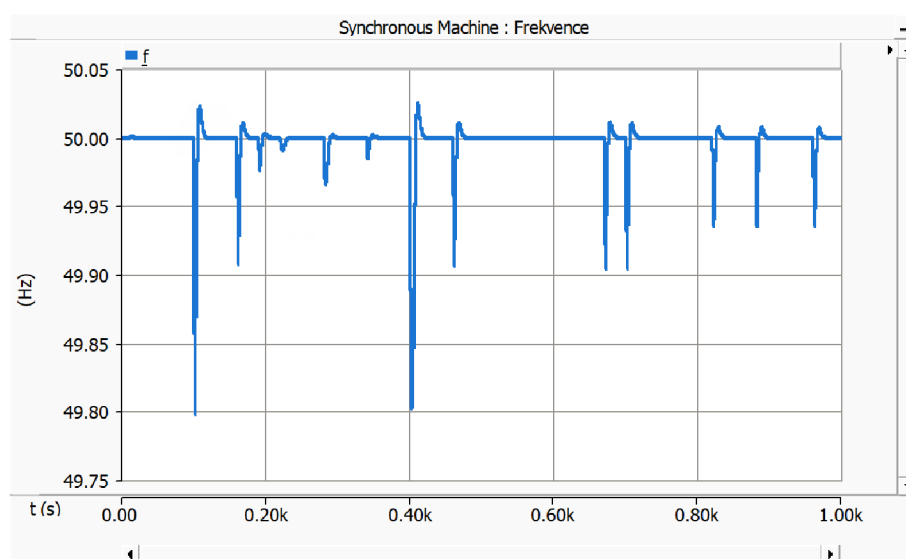


Obr. 8-1: Průběhy napětí uzlů v simulaci programu PSCAD trasy EDS – ECHV

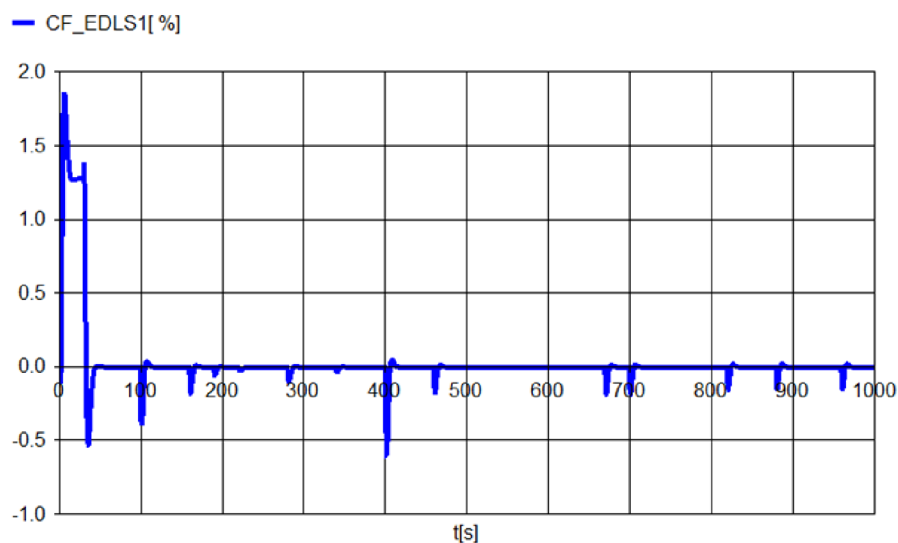


Obr. 8-2: Průběhy napětí uzlů v simulaci programu MODES trasy EDS – ECHV

Jak lze pozorovat z průběhů napětí na Obr. 8-1 a Obr. 8-2, napětí vlastní spotřeby se při rozběhu největšího pohonu v případě simulace PSCAD snížilo na hodnotu 5,5 kV, v případě simulace MODES se napětí snížilo na hodnotu 5,4 kV. Napětí vlastní spotřeby se mimo rozběhy pohonů snížilo na hodnotu 6,08 kV v případě simulace PSCAD a v případě simulace MODES na hodnotu 6,15 kV. Větší pokles napětí simulace PSCAD mohl být způsoben více faktory. Jedním z faktorů mohl být jiný způsob modelování transformátorů, na kterých mohly vzniknout rozdílné úbytky napětí. Dalším faktorem mohly být rozdílné modely asynchronních motorů, které oproti MODESu odebíraly větší (jmenovitý) výkon a zvýšily tak úbytky napětí na vedeních a transformátorech. Podle kritérií úspěšné zkoušky v Tab. 5-1 jsou hodnoty napětí vlastní spotřeby v přijatelných mezích pro obě trasy. Zároveň si lze povšimnout Ferrantiho jevu, kdy napětí  $U_{CIDLS}$  (začátek vedení) má na počátku simulace v případě programu PSCAD hodnotu 413 kV a napětí  $U_{C1CHV1}$  (konec vedení) má hodnotu 420 kV.



Obr. 8-3: Průběh frekvence v simulaci programu MODES trasy EDS – ECHV



Obr. 8-4: Průběh odchylky frekvence v simulaci programu MODES trasy EDS – ECHV

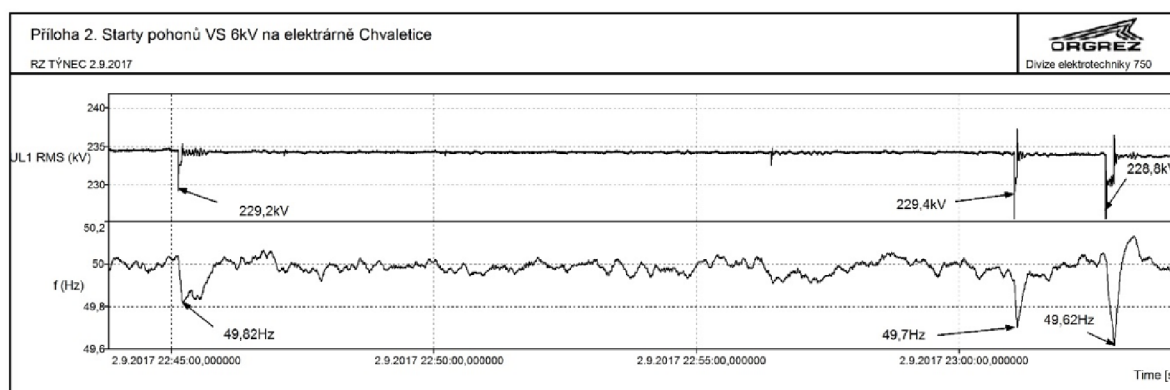
Pokud se v případě frekvence zanedbá počáteční vrchol při nabuzení trasy, klesla frekvence v případě spuštění největšího pohonu na hodnotu 49,8 Hz v simulaci PSCAD a v případě simulace MODES na 49,7 Hz. Rozdílný počáteční průběh frekvence při najíždění trasy obou programů může být způsoben rozdílným modelováním elektrárenského bloku, kdy program PSCAD postupně přechází ze stavu, kdy se generátor chová jako napěťový zdroj s konstantním napětím a frekvencí do stavu, kdy je aktivován budicí systém a následně otáčková regulace turbíny. Odlišnosti frekvence při spuštění pohonů vlastní spotřeby mohly být způsobeny rozdílnými modely generátorů, byť jsou generátory v obou programech modelovány v Parkově transformaci, vnitřní struktury modelů mohou být odlišné. Vzhledem k tomu, že regulátor turbíny pracoval v obou simulacích v astatické regulaci, je udržována frekvence na hodnotě 50 Hz. Podle kritérií úspěšné zkoušky v Tab. 5-1 jsou hodnoty frekvence v přijatelných mezích pro obě trasy.

### 8.1.1 Reálná zkouška

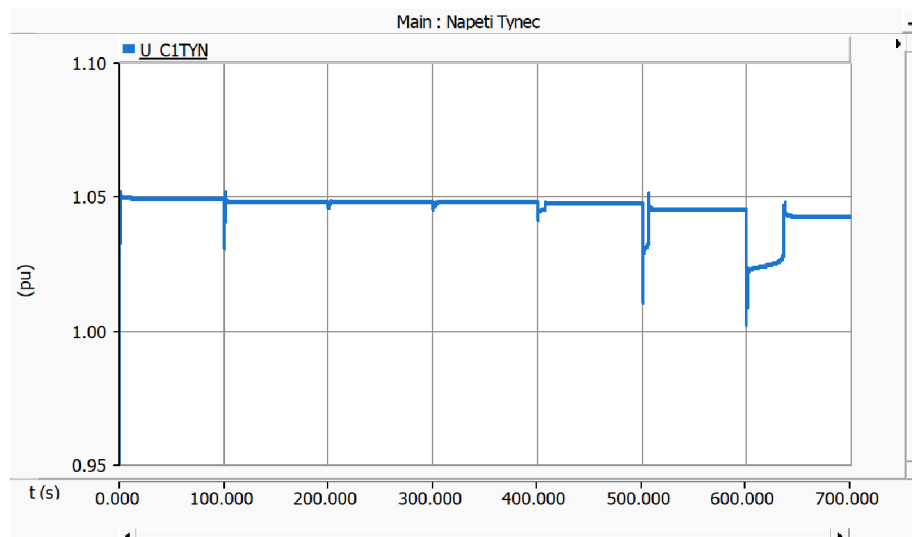
Dle [12] reálná zkouška proběhla 2. září 2017. Na Obr. 8-5 je výstup napětí a frekvence v rozvodně Týnec. Vzhledem k tomu, že při této zkoušce byly rozbíhané pohony odlišné, byl upraven i model v obou programech. Parametry motorů zůstaly zachovány, pouze se změnil scénář dle Tab. 8-1. Vztažné napětí je 220 kV.

Tab. 8-1: Rozběhy motorů reálné zkoušky EDS - ECHV

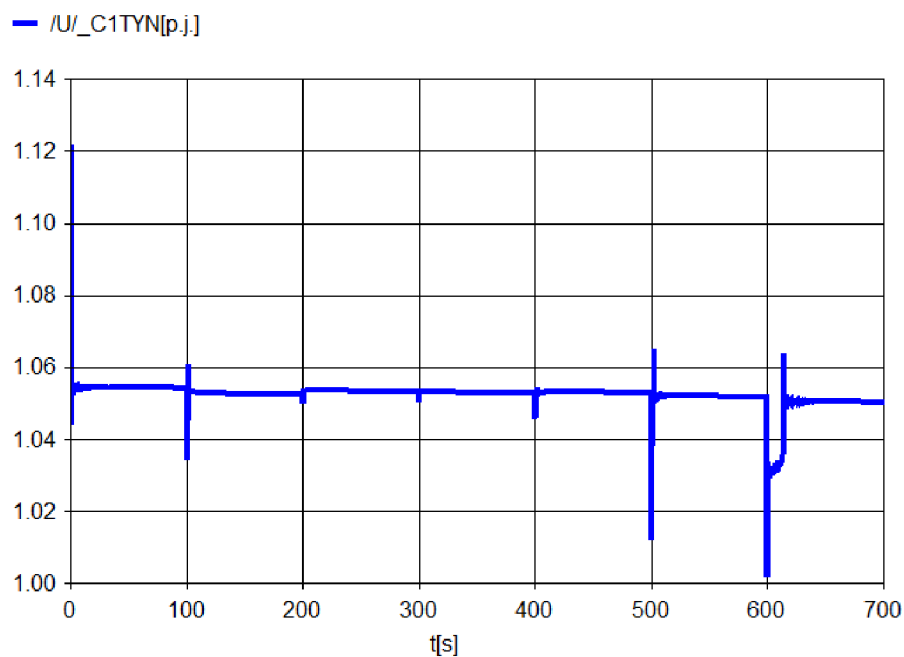
Čas	Číslo motoru	Typ	Koeficient zatížení
100	1	Chladička	0,89
200	3	Čerpadlo vodoproudých vývěv	0,89
300	4	Kondenzátní čerpadlo prvního stupně	0,89
400	5	Kondenzátní čerpadlo druhého stupně	0,95
500	7	Napáječka	0,98
600	2.3	Kouřový ventilátor	0,97



Obr. 8-5: Průběh napětí a frekvence reálné zkoušky. Převzato a upraveno ze [12].

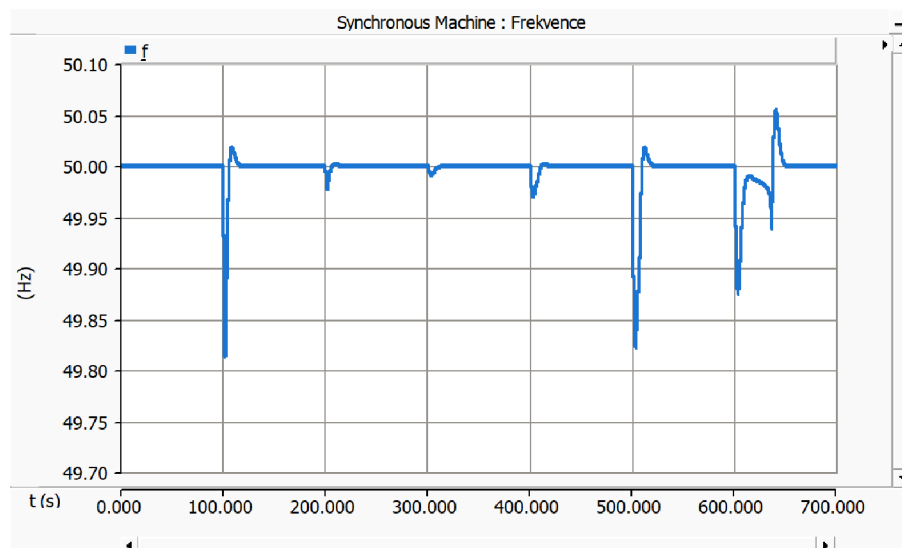


Obr. 8-6: Průběh napětí simulace reálné zkoušky PSCAD.

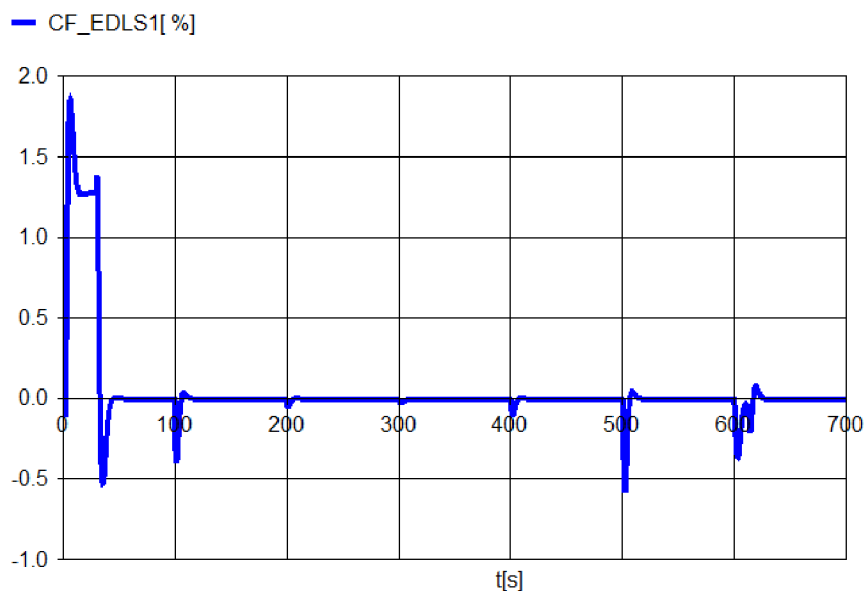


Obr. 8-7: Průběh napětí simulace reálné zkoušky MODES.

Nejnižší hodnota napětí při spuštění největšího motoru v průběhu reálné zkoušky činila 225 kV. V simulaci MODES byla nejnižší hodnota napětí při spuštění největšího motoru 220 kV a v simulaci PSCAD taktéž. Zároveň si lze povšimnout, že motoru v simulaci PSCAD trvá déle dosáhnout ustáleného chodu při rozběhu. To mohlo být způsobeno rozdílným modelováním motoru, především rozdílným způsobem zatížení motoru, kdy v programu MODES je zatížení definováno protimomentem a v programu PSCAD koeficientem zatížení viz podkapitola 6.6 a 7.6.



Obr. 8-8: Průběh frekvence simulace reálné zkoušky PSCAD.



Obr. 8-9: Průběh odchylky frekvence simulace reálné zkoušky MODES.

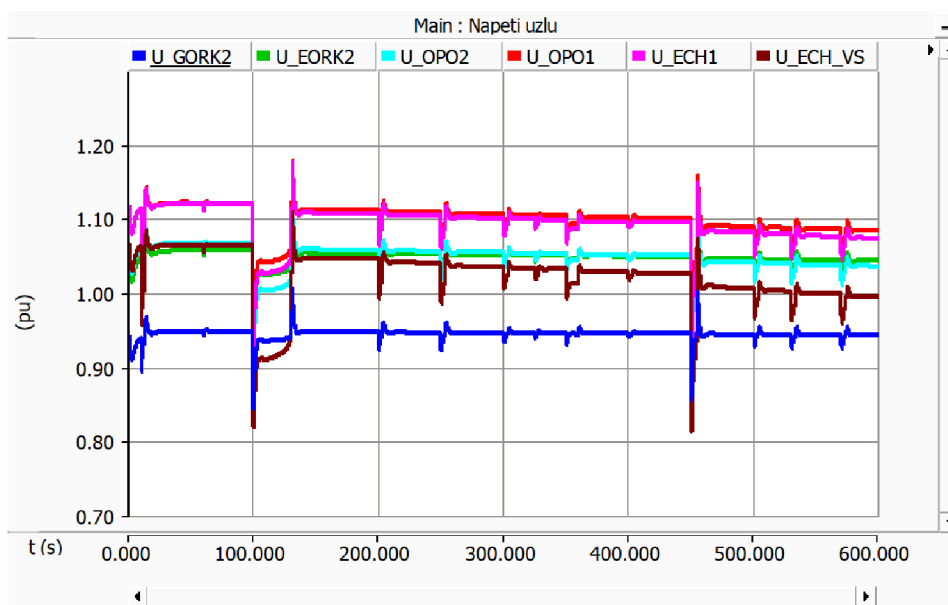
Pokud se v případě frekvence zanedbá počáteční vrchol při nabuzení trasy, tak největší pokles frekvence simulace MODES byl 300 mHz a v simulaci PSCAD 190 mHz. Ani u jednoho tento pokles ovšem nenastal při spuštění největšího pohonu. Při reálné zkoušce byla nejnižší hodnota frekvence při spuštění největšího pohonu 49,62 Hz.

Z dosažených výsledů se nedá jednoznačně potvrdit, že by byl některý z programů výpočetně přesnější.

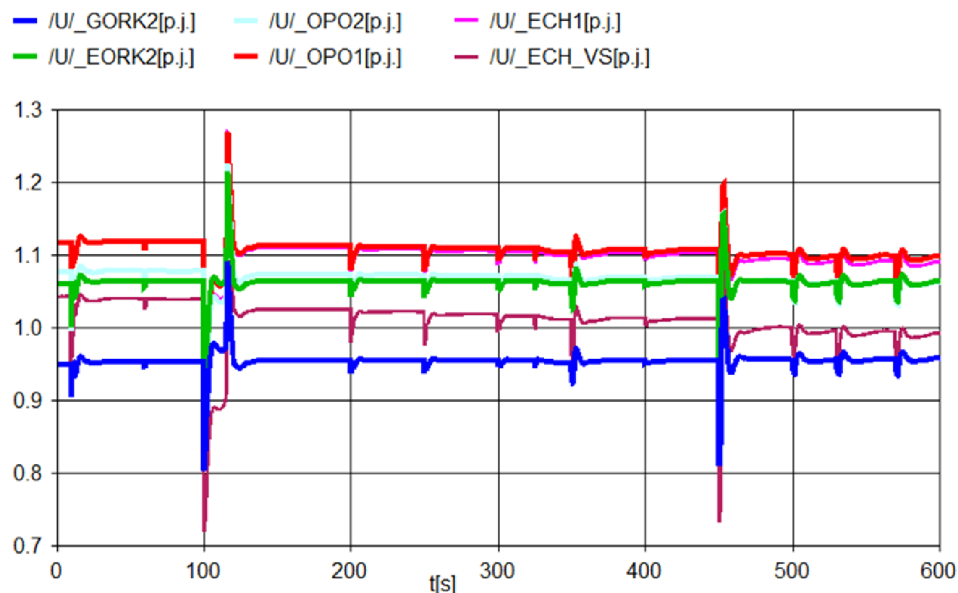


## 8.2 Trasa Orlík – Chvaletice

Na následujících grafických výstupech (Obr. 8-10 až Obr. 8-13) jsou vyobrazeny průběhy napětí a frekvence. Simulace proběhla dle scénáře v Tab. 5-3. Čas trvání simulace v programu PSCAD byl 600 s, krok simulace 30  $\mu$ s a krok vykreslování 210  $\mu$ s. Reálná zkouška se dle [1] uskutečnila v květnu roku 2008. Obr. 8-14 ukazuje naměřené průběhy svorkového napětí  $U_g$  a frekvence  $f$  při rozběhu největšího pohonu – kouřového ventilátoru reálné zkoušky.



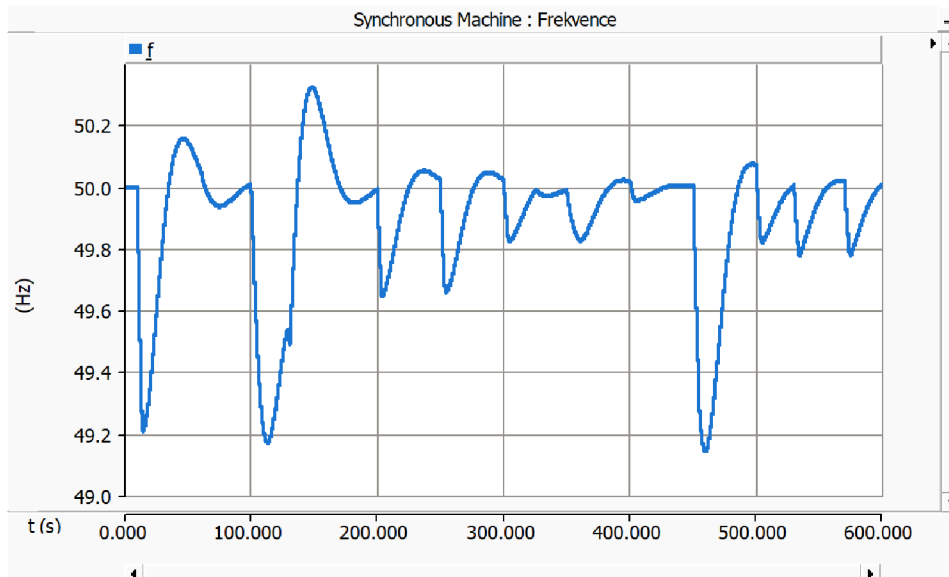
Obr. 8-10: Průběhy napětí uzlů v simulaci programu PSCAD trasy EOR – ECHV



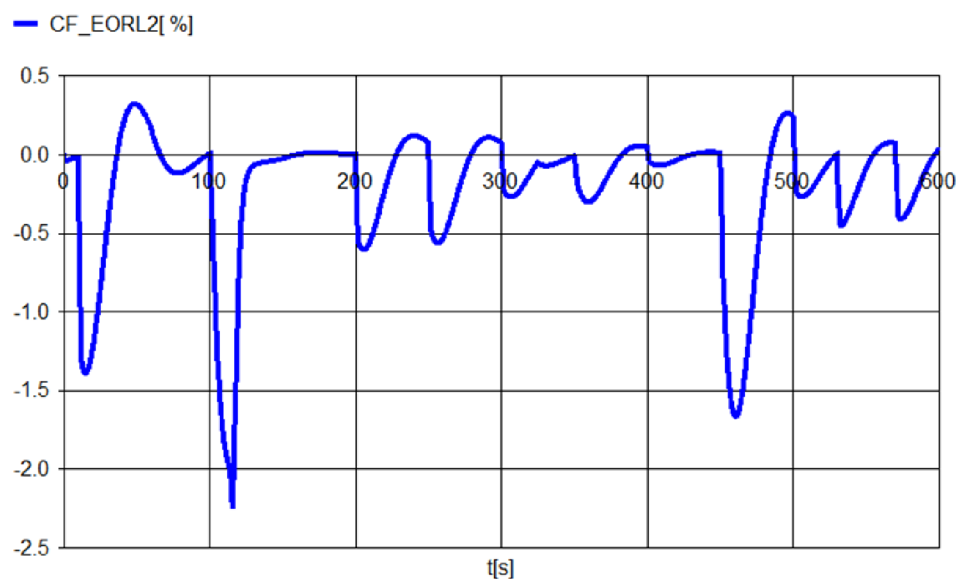
Obr. 8-11: Průběhy napětí uzlů v simulaci programu MODES trasy EOR – ECHV

Jak lze pozorovat z průběhů napětí na Obr. 8-10 a Obr. 8-11, napětí vlastní spotřeby se při rozběhu největšího pohonu v případě simulace PSCAD snížilo na hodnotu 4,9 kV, v případě simulace MODES se napětí snížilo na hodnotu 4,35 kV. Napětí vlastní spotřeby se mimo

rozběhy pohonů snížilo na hodnotu 6 kV v případě simulace PSCAD a v případě simulace MODES na hodnotu 5,95 kV. I zde je větší pokles napětí v průběhu simulace PSCAD, ale zároveň je zvýšené počáteční napětí vlastní spotřeby a na konci simulace je tedy výsledné napětí vyšší než v případě simulace MODES. Fakt, že je napětí vlastní spotřeby na počátku vyšší při stejném napětí na svorkách generátoru mohlo být způsobeno rozdílnými převody transformátorů. Větší pokles napětí v průběhu simulace PSCAD mohl být i zde způsoben již zmíněným rozdílným způsobem modelování transformátorů a asynchronních motorů. Podle kritérií úspěšné zkoušky v Tab. 5-1 jsou v přijatelných mezích hodnoty napětí vlastní spotřeby v simulaci PSCAD. V případě simulace MODES bylo napětí vlastní spotřeby pod hranicí 6 kV a při rozběhu motorů bylo pod hranicí 4,8 kV. Zároveň si lze i zde povšimnout Ferrantiho jevu, kdy napětí U\_EORK2 (začátek vedení) má na počátku simulace v případě programu PSCAD hodnotu 232 kV a napětí U\_OPO (konec vedení) má hodnotu 235,5 kV. Stejný jev s pouze mírně odlišnými hodnotami napětí má i simulace programu MODES.

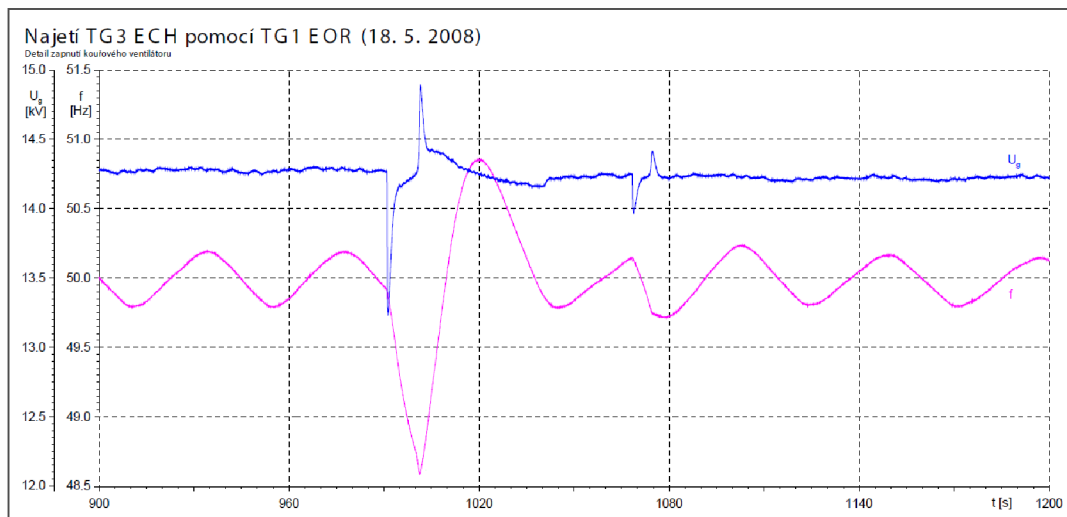


Obr. 8-12: Průběh frekvence v simulaci programu PSCAD trasy EOR – ECHV



Obr. 8-13: Průběh odchylky frekvence v simulaci programu MODES trasy EOR – ECHV

Frekvence klesla v případě spuštění největšího pohonu na hodnotu 49,13 Hz v simulaci PSCAD a v případě simulace MODES na 48,9 Hz. Odlišnosti frekvence při spuštění pohonů vlastní spotřeby, a především odlišný průběh frekvence při spuštění kouřového ventilátoru mohly být způsobeny již zmiňovanými rozdíly v modelech generátorů a asynchronních motorů. Vzhledem k tomu, že regulátor turbíny pracoval v obou programech v astatické regulaci, je udržována frekvence na hodnotě 50 Hz. Podle kritérií úspěšné zkoušky v Tab. 5-1 jsou hodnoty frekvence v přijatelných mezích pro obě trasy.



Obr. 8-14: Detail zapnutí největšího pohonu při reálné zkoušce EOR – ECHV. Převzato a upraveno z [1].

Obr. 8-14 zobrazuje průběh napětí a frekvence při rozběhu největšího pohonu při reálné zkoušce. Svorkové napětí  $U_g$  při rozběhu kouřového ventilátoru kleslo na hodnotu 13,25 kV. V případě simulace PSCAD napětí generátoru kleslo na 12,7 kV a v případě simulace MODES na 12 kV. Frekvence při reálné zkoušce a spuštění největšího pohonu klesla na hodnotu 48,6 Hz. V případě simulace PSCAD klesla frekvence na 49,13 Hz a v případě simulace MODES na 48,9 Hz.

I zde se z dosažených výsledů nedá jednoznačně potvrdit, že by některý z programů byl výpočetně přesnější.

## ZÁVĚR

Účelem této práce bylo řešit problematiku najížděcích tras při startu ze tmy elektrárny Dlouhé Stráně – Chvaletice a Orlík – Chvaletice, respektive jejich porovnání ve dvou simulačních programech MODES a PSCAD. Simulace tras v programu MODES byly již vytvořeny a v programu PSCAD byly vytvořeny trasy nové. Scénář tras byl určen podle času zapínání jednotlivých pohonů vlastní spotřeby elektrárny Chvaletice. Byly měřeny průběhy napětí v jednotlivých uzlech, systémová frekvence a následně porovnány.

Při vytváření elektrárenského bloku v programu PSCAD byly zjištěny následující poznatky. Generátor byl již vytvořen v Parkově transformaci a nebylo tedy nutné jej modelovat. Budicí systém byl namodelován, protože z funkčních bloků nebylo možné s určitostí říct, zdali je již vytvořený model v knihovně totožný s modelem programu MODES. Model turbíny a regulátoru z knihovny má téměř totožné přenosové funkce a taktéž jej nebylo nutné modelovat. Při použití modelů asynchronních motorů z knihovny nastal problém s použitím parametrů jednotlivých motorů z programu MODES. Při plném zatížení motor odebíral větší výkon než jmenovitý. Tento problém byl vyřešen změnou koeficientu zatížení. Při vytváření tras bylo dbáno na to, aby se parametry tras mezi jednotlivými programy, co možno nejvíce shodovaly. Zdrojem parametrů jednotlivých modelů byl program MODES.

Z výsledků simulací pro trasu Dlouhé Stráně – Chvaletice vyplývá, že napětí vlastní spotřeby se při rozběhu největšího pohonu snížilo více v simulaci MODES, a to na hodnotu 5,4 kV. Napětí vlastní spotřeby se mimo rozběhy pohonů více snížilo v simulaci PSCAD na hodnotu 6,08 kV. Frekvence více klesla v případě spuštění největšího pohonu v simulaci MODES na hodnotu 49,7 Hz. Podle kritérií pro úspěšnou zkoušku byly hodnoty napětí vlastní spotřeby i frekvence v přijatelných mezích pro obě trasy. V případě reálné zkoušky klesla hodnota napětí v rozvodně Týnec při spuštění největšího motoru na 225 kV a frekvence klesla na hodnotu 49,62 Hz. V simulacích obou programů byla nejnižší hodnota napětí při spuštění největšího motoru 220 kV. Větší pokles frekvence nastal v simulaci MODES, a to o 300 mHz. Ani u jednoho z programů tento pokles ovšem nenastal při spuštění největšího pohonu.

Z výsledků simulací pro trasu Orlík – Chvaletice vyplývá, že napětí vlastní spotřeby se při rozběhu největšího pohonu snížilo více v simulaci MODES, a to na hodnotu 4,35 kV. Napětí vlastní spotřeby se mimo rozběhy pohonů více snížilo taktéž v simulaci MODES na hodnotu 5,95 kV. Frekvence více klesla v případě spuštění největšího pohonu v simulaci MODES na hodnotu 48,9 Hz. Podle kritérií pro úspěšnou zkoušku byly hodnoty frekvence v přijatelných mezích pro obě trasy, ale hodnoty napětí vlastní spotřeby byly v přijatelných mezích pouze v simulaci PSCAD. V případě simulace MODES bylo napětí vlastní spotřeby pod hranicí 6 kV a při rozběhu motorů bylo pod hranicí 4,8 kV. Při reálné zkoušce svorkové napětí generátoru při rozběhu kouřového ventilátoru kleslo na hodnotu 13,25 kV a frekvence klesla na hodnotu 48,6 Hz. Větší pokles napětí i frekvence nastal v simulaci MODES na hodnotu 12 kV v případě napětí a 48,9 Hz v případě frekvence.

Odečet hodnot probíhal z grafických průběhů, u obou simulací se tedy jedná o přibližné hodnoty. Rozdíly mezi simulacemi mohly být způsobeny více faktory. Jedním z faktorů mohl být jiný způsob modelování transformátorů, na kterých mohly vzniknout rozdílné úbytky napětí. Dalším faktorem mohly být rozdílné modely asynchronních motorů, které oproti MODESu odebíraly větší (jmenovitý) výkon a zvýšily tak úbytky napětí na vedeních a transformátorech. Taktéž způsob zatížení motoru byl odlišný, v programu MODES je zatížení definováno protimomentem

---

a v programu PSCAD koeficientem zatížení. Odlišnosti frekvence mohly být způsobeny rozdílnými modely a zatížením generátorů, byť jsou generátory v obou programech modelovány v Parkově transformaci, vnitřní struktury modelů mohou být odlišné.

Závěrem srovnání je tedy možné usoudit, že výsledky obou programů jsou výpočetně podobné a nedá se s jistotou určit, který je přesnější. Pro přesnější analýzu by bylo vhodné výsledky simulací porovnat s plnohodnotnými výsledky reálné zkoušky obou tras.

**POUŽITÁ LITERATURA**

- [1] KASEMBE, Andrew, Karel MÁŠLO a Zdeněk HRUŠKA. Obnova soustavy po poruše typu blackout. *PRO-ENERGY: Elektroenergetika.* , 16 - 19.
- [2] TŮMA, Jiří. *Spolehlivost v elektroenergetice.* Praha: Conte, 2006. ISBN 80-239-6483-6.
- [3] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy.* Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [4] *KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY, část V.*
- [5] *KODEX PŘENOSOVÉ SOUSTAVY, část II.*
- [6] *Řízení frekvence - bilance činných výkonů v ES: Přednáška k předmětu Řízení ES.*
- [7] MORK, Bruce A. *Understanding and Dealing with Ferroresonance: Minnesota Power Systems Conference.* 2006.
- [8] ESCUDERO, Marta Val, Ivan DUDURYCH a Miles REDFERN. *Understanding ferroresonance* [online]. [cit. 2019-01-20]. DOI: 10.1109. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/4164306\\_Understanding\\_ferroresonance](https://www.researchgate.net/publication/4164306_Understanding_ferroresonance)
- [9] ENGDahl, GÖRAN. *FERRORESONANCE IN POWER SYSTEMS: Energiforsk.* 2017. ISBN 978-91-7673-457-5.
- [10] BÁTORA, B. *Analýza ferorezonančního přepětí v elektrických sítích.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 127 s. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [11] HASE, Yoshihide. *Handbook of power system engineering.* Hoboken, NJ: John Wiley, c2007. ISBN 978-0-470-02742-4.
- [12] PISTORA, M., T. LINHART a O. RYCHLÝ. *Zkouška startu ze tmy elektrárny Dlouhé stráně pro najetí bloku elektrárny Chvaletice: ČEPS, EGÚ.*
- [13] ISMAEL, Saman Saber. *TRANSMISSIONOVER HEAD LINE SYSTEM* [online]. 2016, , 28 - 29 [cit. 2019-01-20].
- [14] *Ferranti Effect* [online]. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/profile/Battula\\_Santhosh\\_kumar/publication/322592700\\_Ferranti\\_Effect/data/5a61910c0f7e9b6b8fd3fb92/Ferranti-Effect.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Battula_Santhosh_kumar/publication/322592700_Ferranti_Effect/data/5a61910c0f7e9b6b8fd3fb92/Ferranti-Effect.pdf)
- [15] *Reducing Ferranti Effect in Transmission Line using Dynamic Voltage Restorer* [online]. [cit. 2019-01-20]. ISSN 2454-1311.
- [16] *Ferranti Effect* [online]. [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <http://siphwebillysigudla.yolasite.com/resources/Ferranti+Effect.pdf,%20BOOK2.pdf>
- [17] MÁŠLO, K., K. WITNER, A. KASEMBE, L. KOČIŠ a M. ŠVANCAR. *VÝPOČET PŘECHODNÝCH DĚJŮ PŘI STARTU ZE TMY Z ELEKTRÁRNY ORLÍK: ELECTRIC POWER ENGINEERING.* In: . 2007.
- [18] *Regulace frekvence - bilance činných výkonů v ostrovním provozu (OP): Přednáška k předmětu Řízení ES.*
- [19] On-Load Tap Changer for Transformer. *Hvdc.ca* [online]. 16.2.2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://hvdc.ca/knowledge-base/read.article/498/on-load-tap-changer-for-transformer/v:>
- [20] *PSCAD X4 (v4.6) Online Help* [online]. [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://hvdc.ca/webhelp/ol-help.htm>

- 
- [21] Přenosová soustava elektrické energie. *Energetika.tzb-info.cz* [online]. 11.1.2016 [cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <https://energetika.tzb-info.cz/elektroenergetika/13676-prenosova-soustava-elektricke-energie>
- [22] Přednášky z předmětu Distribuce elektrické energie
- [23] MARTÍNEK, Jakub. *Potenciál systému řízení spotřeby v distribuční síti PRE*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. Pavel Glac.
- [24] Dokument zabývající se popisem matematických modelů v programu MODES. *Popis modelování přechodných dějů v ES programem MODES v2.3/16*.
- [25] Ke stažení: Data do kapsy. *Ceps.cz* [online]. [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://ceps.cz/cs/ke-stazeni>
- [26] BLACKOUT #1: Co je to blackout?. *Elektrika.cz* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/blackout-1-co-je-to-blackout>

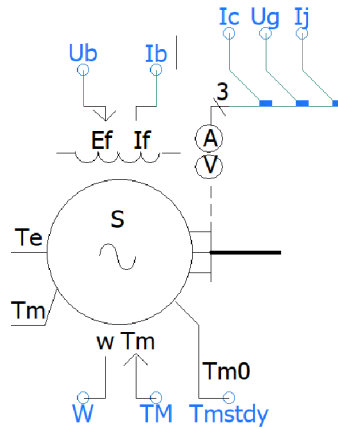
## **SEZNAM PŘÍLOH**

- A. Parametry elektrárenského bloku
- B. Parametry transformátorů a přepínače odboček
- C. Parametry vedení a zátěže
- D. Symbolika mezi programy
- E. Schéma modelů tras PSCAD



# A PARAMETRY ELEKTRÁRENSKÉHO BLOKU

## Generátor



Obr. A-1: Model generátoru

Vstupy:

- $T_m$ : Vstup mechanického momentu z turbíny.
- $E_f$ : Vstup budicího napětí z budiče.
- $w$ : vstup otáček sloužící pro jejich přímé řízení. Jedná se o výstup z řídicího prvku Multimass, který simuluje společnou hřídel s více pohonnými jednotkami. Tento vstup nemusí být využit.

Výstupy:

- $w$ : Výstup otáček
- $AV$ : Informace o napětí na svorkách generátoru a generovaném proudu. Skrze parametr **Supply terminal conditions to exciter** je možné zvolit požadovaný výstup (např. pouze napětí). Na obrázku lze pozorovat výstup v podobě napětí i proudu, kde  $I_c$  je činný proud,  $U_g$  svorkové napětí a  $I_j$  jalový proud.
- $I_f$ : Výstup s informacemi o budicím proudu protékající generátorem.
- $E_f0$ : Výstup požadovaného budicího napětí při inicializaci budicího systému.
- $T_e$ : Výstup elektrického momentu generátoru.
- $T_m$ : Výstup s informacemi o mechanickém momentu na hřídeli turbíny.
- $T_m0$ : Výstup požadovaného momentu na hřídeli při inicializaci regulátoru otáček.

Výstupy  $T_e$  a  $T_m$  stejně jako vstup  $w$  slouží pro připojení prvku Multimass.

Parametrizace:

Níže jsou popsány jednotlivé zadané parametry modelu. Vzhledem k obsáhlosti nejsou všechny parametry zmíněny.

- **CONFIGURATION**  
**No. Of Q-axis Damper Windings:** Parametr s výběrem z možností. One pro rotor s vyniklými póly, Two pro hladký rotor. Obě trasy mají hydroalternátor, tedy rotor s vyniklými póly.

**Multimass interface:** Parametr s výběrem z možností, zda povolit, nebo zakázat společnou hřídel Multimass s řízením otáček. Společná hřídel je u obou tras nepotřebná a byla tedy zakázána.

**Armature resistance as:** Parametr s výběrem z možností. Resistance pro zadání hodnot odporu přímo v pu, Time-cons pro zadání hodnot v časové konstantě. Pro obě trasy byla vybrána možnost Resistance, jelikož je známa hodnota odporu statoru.

**Type of settings for initial condition:** Zadání počátečních podmínek chodu. None pro počáteční podmínky ve formě svorkového napětí a úhlu. Powers pro počáteční podmínky pomocí činného a jalového výkonu při zadaném svorkovém napětí a úhlu. Počáteční podmínky jsou zadány podle výpočtu ustáleného chodu z programu MODES. U obou tras byla vybrána možnost Powers, jelikož napětí a výkony jsou známé hodnoty.

- INTERFACE TO MACHINE CONTROLLERS

**Supply terminal conditions to exciter:** Parametr s výběrem z možností. None pro žádné informace o napětí a proudu generátoru. Vt pro informaci o napětí na svorkách generátoru. It pro informaci o proudu generátoru. Vt&It pro informaci o napětí a proudu. Vzhledem k použitému systému buzení byla vybrána možnost Vt&It.

**Output exciter initialization data?:** Slouží k inicializaci budicího systému a tedy hladšímu přechodu z módu Source do Machine.

**Output exciter initialization data?:** Slouží k inicializaci regulátoru otáček a tedy hladšímu přechodu z módu Lock-rotor do Normal.

- VARIABLE INITIALIZATION DATA

**Source [0] to Machine [1] transition:** Parametr se zadáním hodnoty. Při zadání hodnoty 0 se generátor chová jako napěťový zdroj s konstantním napětím a frekvencí. Při zadání hodnoty 1 dochází k aktivaci budicího systému, který řídí napětí a generátor se otáčí konstantními otáčkami.

**Lock-rotor [0] <-> Normal Mode [1] transition:** Parametr se zadáním hodnoty. Při zadání hodnoty 0 se generátor otáčí konstantními otáčkami a napětí je řízeno budicím systémem. Při zadání hodnoty 1 dochází k aktivaci regulátoru turbíny, otáčky jsou nyní závislé na mechanickém výkonu turbíny.

Pro správnou funkčnost celého bloku je doporučeno, aby se **Source [0] to Machine [1] transition** přepnul do polohy 1 po určitém časovém úseku (1 s) a následně po dalším časovém úseku (5 s) došlo k přepnutí **Lock-rotor [0] <-> Normal Mode [1] transition** do polohy 1.

- BASIC DATA

**Rated RMS Line-to-Neutral Voltage:** Efektivní hodnota jmenovitého fázového napětí  $V_{base}$ .

**Rated RMS Line Current:** Efektivní hodnota jmenovitého proudu generátoru vypočteného z jmenovitého výkonu a napětí generátoru dle vzorce:

$$I_{base} = \frac{S_{ng}}{3 \cdot V_{base}} \quad (A.1)$$

Jmenovitý výkon  $S_{ng}$  se do modelu generátoru v PSCADu nezadá, poměrné hodnoty jsou vztaheny k jmenovitému napětí a proudu. Nicméně hodnota jmenovitého výkonu obou generátorů je dohledatelná v Tab. A-2.

**Base Angular Frequency:** Úhlová rychlost otáčení rotoru  $\omega$ .

**Inertia Constant:** Mechanická časová konstanta  $H$ . Přepočet z časové konstanty  $T_m$ :

$$H = \frac{T_m}{2} \quad (\text{A.2})$$

Hodnoty časové konstanty  $T_m$  pro jednotlivé trasy jsou uvedené v Tab. A-2.

- GENERATOR DATA FORMAT

Parametry i s popisy jsou uvedeny v Tab. A-1.

- INITIAL CONDITIONS

**Terminal Voltage Magnitude/Phase at Time = 0-:** Udává svorkové napětí a úhel pro počáteční chod vypočtený z ustáleného chodu.

- INITIAL CONDITIONS IF STARTING AS A MACHINE

**Terminal Real/Reactive Power at Time = 0-; Out +:** Dodávaný činný a jalový výkon pro počáteční chod vypočtený z ustáleného chodu.

V Tab. A-1 jsou shrnuty hodnoty parametrů generátoru pro obě trasy.

Tab. A-1: Parametry generátoru

Parametr	Symbol	Jednotka	Trasa	
			EDS - ECHV	EOR - ECHV
Output exciter initialization data?			No	No
Output governor initialization data?			Yes	Yes
Rated RMS Line-to-Neutral Vol.	$V_{base}$	kV	12,7	8,66
Rated RMS Line Current	$I_{base}$	kA	9,32	3,85
Base Angular Frequency	$\omega$	$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	314,14	314,14
Inertia Constant	$H$	s	3,63	6,4
Armature Resistance	$R_a$	pu	0	0
Potier Reactance Rozptylová reaktance	$X_p$	pu	0	0
Unsaturated Reactance d Nenasycená synchronní reaktance v ose d	$X_d$	pu	1,5	1,14
Unsaturated Transient Reactance d Nenasycená přechodná reaktance v ose d	$X_{d'}$	pu	0,35	0,43
Unsaturated Transient Time q Přechodná časová konst. naprázdno v ose q	$T_{d0'}$	s	12,6	5,4
Unsaturated Sub-Transient Reactance d Nenasycená rázová reaktance v ose d	$X_{d''}$	pu	0,2	0,22
Unsaturated Sub-Transient Time d Rázová časová konstanta naprázdno v ose d	$T_{d0''}$	s	0,038	0,038
Unsaturated Reactance q Nenasycená synchronní reaktance v ose q	$X_q$	pu	0,88	0,7

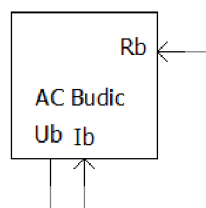
Unsaturated Sub-Transient Reactance q Nenasycená rázová reaktance v ose q	$X_{q\_}$	pu	0,2	0,2
Unsaturated Sub-Transient Time q Rázová časová konstanta naprázdno v ose q	$T_{qo\_}$	s	0,43	0,43
Terminal Voltage Magnitude at Time = 0- Svorkové napětí pro počáteční chod	$V_T$	pu	0,93	0,94
Terminal Voltage Phase at Time = 0- Úhel svork. napětí pro počáteční chod	$Pheta$	rad	0	0
Terminal Real Power at Time = 0-; Out + Dodávaný činný výkon pro počáteční chod	$P_0$	MW	2,23	2,02
Terminal Reactive Power at Time = 0-; Out + Dodávaný jalový výkon pro počáteční chod	$Q_0$	MVAr	-103,11	-22,18

Rozptylová reaktance generátoru  $X_p$  byla zanedbána. Pro nenasycenou rázovou reaktanci v ose q  $X_{q\_}$  není známa hodnota z MODESu. Byla tedy určena předpokladem na základě znalostí parametrů jiných generátorů, kdy  $X_{q''}$  nabývá hodnot 20 % - 40 %  $X_q$ .

Tab. A-2: Výpočtové parametry generátoru

Symbol	Parametr	Jednotka	EDS - ECHV	EOR - ECHV
$S_{ng}$	Jmenovitý výkon generátoru	MVA	355	100
$T_m$	Mechanická časová konstanta	s	7,6	12,8

## AC budič



Obr. A-2: Model AC budiče

Zadané parametry bloku AC Budič (hodnoty parametrů jsou v Tab. A-3):

- CONFIGURATION
  - Maximální budicí napětí  $Ub_{max}$ .
  - Minimální budicí napětí  $Ub_{min}$ .
  - Zesílení budiče  $Ka$ .
  - Časová konstanta budiče  $Ta$ .
  - Koeficient úbytku napětí usměrňovače způsobený komutací  $Kc$ .

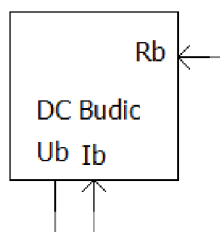
Tab. A-3: Hodnoty parametrů modelu AC Budic

Parametr Trasa	$U_{bmax}$ (pu)	$U_{bmin}$ (pu)	$K_a$ (pu)	$T_a$ (s)	$K_c$ (pu)
EDST-ECHV + EOR-ECHV	7,41	-7,41	1	0,1	0,05

Tab. A-4: Hodnoty parametrů vnitřní struktury AC Budic

Parametr Blok	Limit output?	Gain	Time Constant	Maximum	Minimum
Real Pole	Yes	kA	$T_a$	MEZ3	$U_{bmin}$

## DC budič



Obr. A-3: Model DC budiče

Zadané parametry bloku DC Budic (hodnoty parametrů jsou v Tab. A-5):

- CONFIGURATION  
Maximální budičí napětí  $U_{bmax}$ .  
Minimální budičí napětí  $U_{bmin}$ .  
Zesílení budiče  $K_a$ .  
Časová konstanta budiče  $T_a$ .

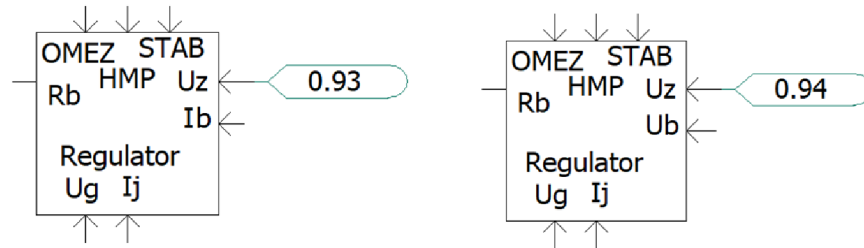
Tab. A-5: Hodnoty parametrů modelu DC Budic

Parametr Trasa	$U_{bmax}$ (pu)	$U_{bmin}$ (pu)	$K_a$ (pu)	$T_a$ (s)
EDST-ECHV + EOR-ECHV	6	-6	1	1

Tab. A-6: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu DC Budic

Parametr Blok	Limit output?	Gain	Time Constant	Maximum	Minimum
Real Pole	Yes	kA	$T_a$	$U_{bmax}$	$U_{bmin}$

## Regulátor buzení



Obr. A-4: Model regulátoru buzení trasy EDS – ECHV vpravo a EOR – ECHV vlevo

Zadané parametry bloku Regulator (hodnoty parametrů jsou v Tab. A-7 a Tab. A-8):

- CONFIGURATION
  - Zesílení derivační zpětné vazby regulátoru *KSE*.
  - Časová konstanta derivační zpětné vazby *TS*.
  - Maximální hodnota výstupu odchytky *UIMAX*.
  - Minimální hodnota výstupu odchytky *UIMIN*.
  - Časová konstanta integrační části regulátoru *TI*.
  - Maximální výstupní napětí regulátoru *URMAX*.
  - Minimální výstupní napětí regulátoru *URMIN*.
  - Proporcionální zesílení regulátoru *KP*.
  - Statika kompenzace jalovým proudem *kSTAT*.

Tab. A-7: Hodnoty parametrů modelu Regulator 1/2

Parametr	<i>KSE</i>	<i>TS</i>	<i>UIMAX</i>	<i>UIMIN</i>
Trasa	(pu)	(s)	(pu)	(s)
EDST-ECHV	0	1,96	9,9	-9,9
EOR-ECHV	0,2	1,8	9,9	-9,9

Tab. A-8: Hodnoty parametrů modelu Regulator 2/2

Parametr	<i>TI</i>	<i>URMAX</i>	<i>URMIN</i>	<i>KP</i>	<i>kSTAT</i>
Trasa	(pu)	(s)	(pu)	(s)	(s)
EDST-ECHV	0,14	9,9	-9,9	50	0,05
EOR-ECHV	0,14	9,9	-9,9	60	0,05

Tab. A-9 :Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Regulator 1/3

Parametr	<i>Limit output?</i>	<i>Gain</i>	<i>Time Constant</i>
Blok			
Differential Pole	No	KSE	TS

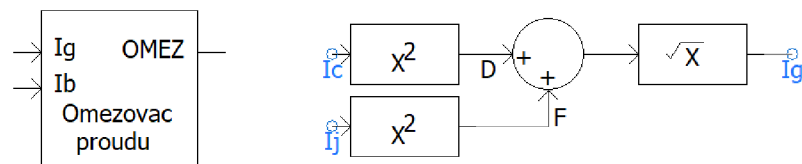
Tab. A-10: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Regulator 2/3

Parametr Blok	Limits	Upper limits	Lower limit
Hard Limiter (1)	internal	UIMAX	UIMIN

Tab. A-11: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Regulator 3/3

Parametr Blok	Proportional Gain	Integral Time Constant	Maximum Limit	Lower Limit
PI Controller	KP	TI	URMAX	URMIN

### Omezovač proudů



Obr. A-5: Model omezovače proudů

Zadané parametry bloku Omezovac (hodnoty parametrů jsou v Tab. A-12):

- CONFIGURATION  
 Nastavení omezovače  $UOM_{zad}$ .  
 Integrovaná časová konstanta omezovače  $TIOM$ .  
 Maximální hodnota výstupu  $UOM_{max}$ .  
 Časová konstanta zpoždění působení omezovače  $TOM$ .

Tab. A-12: Hodnoty parametrů modelu Omezovac

Parametr Trasa	$UOM_{zad}$ (pu)	$TIOM$ (s)	$UOM_{max}$ (pu)	$TOM$ (s)
EDST-ECHV + EOR-ECHV	40	1	0,3	0,3

Tab. A-13: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Omezovac 1/3

Parametr Blok	Limits:	Time Constant	Upper Limit	Lower Limit
Integrator	Internal	TIOM	UOMzad	0

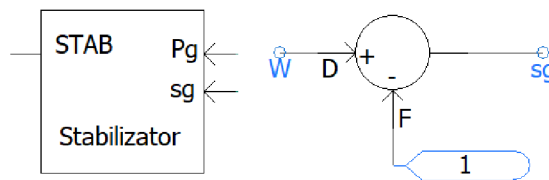
Tab. A-14: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Omezovac 2/3

Parametr Blok	Output Type	Output when A .GT. B	Output when A .LE. B
Two Input Comparator	Level	1	0

Tab. A-15: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Omezovac 3/3

Parametr Blok	Limit output?	Gain	Time Con- stant	Maximum	Minimum
Real Pole	Yes	1.0	TOM	UOMmax	0

### Systémový stabilizátor



Obr. A-6: Model stabilizátoru

Zadané parametry bloku Stabilizator (hodnoty parametrů jsou v Tab. A-16):

- CONFIGURATION

Zesílení čidla měření činného výkonu  $KSP$ .

Časová konstanta stabilizátoru „Washout“  $TS$ .

Zesílení čidla měření skluzu generátoru  $KSS$ .

Časová konstanta předstihu článku „lead/lag“  $TS1$ .

Časová konstanta zpoždění článku „lead/lag“  $TS2$ .

Omezení výstupu stabilizátoru  $USmax$ .

Tab. A-16: Hodnoty parametrů modelu Stabilizator

Parametr Trasa	$KSP$ (pu)	$TS$ (s)	$KSS$ (pu)	$TS1$ (s)	$TS2$ (s)	$USmax$ (pu)
EDST-ECHV	-0,2	0,3	0	0	0	0,3
EOR-ECHV	0,0	1,0	0	0	0	0,3



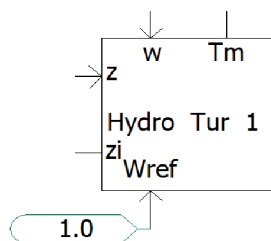
Tab. A-17: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Stabilizator 1/2

Parametr Blok	Limit output?	Gain	Time Constant
Differential Pole (1)	No	KSP	TS
Differential Pole (2)	No	KSS	TS

Tab. A-18: Hodnoty parametrů vnitřní struktury modelu Stabilizator 2/2

Parametr Blok	Limit output?	Gain	Lead Time Constant	Lag Time Constant	Maximum	Minimum
Lead-Lag Pole	Yes	1,0	TS1	TS2	USmax	USmin

## Turbína



Obr. A-7: Model turbíny

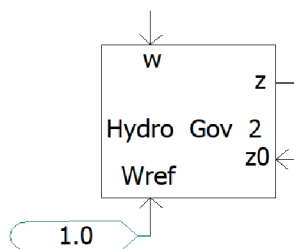
Parametry vodní turbíny (hodnoty parametrů jsou v Tab. A-19):

- **RATED CONDITIONS**  
**Rated No-Load Flow:** Průtok naprázdno  $Q_{NL}$ .
- **NON-ELASTIC WATER COLUMN AND NO SURGE TANK**  
**Water Starting Time:** Časová konstanta náběhu vodního sloupce  $TW$ .  
**Penstock Head Loss Coefficient:** Frikční ztráty  $FP_1$ .  
**Turbine Damping Constant:** Samoregulační koeficient  $D_1$ .

Tab. A-19: Hodnoty parametrů modelu Hydro Tur 1

Parametr Trasa	$Q_{NL}$ (pu)	$TW$ (s)	$FP_1$ (pu)	$D_1$ (pu)
EDST-ECHV	0,25	2,30	0	0,5
EORK-ECHV	0,14	0,76	0	0,4

## Regulátor otáček turbíny



Obr. A-8: Model regulátoru otáček turbíny

Parametry regulátoru otáček vodní turbíny (hodnoty parametrů jsou v Tab. A-20):

- COMMON
  - Permanent Droop:** Trvalá statika  $R_p = 0$  pu.
  - Max. Gate Opening Rate:** Maximální rychlost otevírání ventilů  $MGOR$ .
  - Max. Gate Closing Rate:** Maximální rychlost zavírání ventilů  $MGCR$ .
- ELECTRO-HYDRAULIC (Pid) GOVERNOR
  - Proportional Gain:** Zesílení proporcionální části regulátoru otáček  $KP\_2$ .
  - Integral Gain:** Zesílení integrační části regulátoru otáček  $KI\_2$ .
  - Derivate Gain:** Zesílení derivační části regulátoru otáček  $KD\_2 = 0$  pu.
  - Pilot Servomotor Time Constant:** Časová konstanta elektrohydraulického převodníku  $TA\_2 = 0,2$  s.
  - Gate Servo Time Constant:** Časová konstanta servomechanismu ventilů  $TC\_2 = 0,2$  s.
  - Gate Servomotor Time Constant:** Časová konstanta regulačního orgánu  $TD\_2 = 0$  s.

Tab. A-20: Hodnoty parametrů modelu Hydro Gov 2

Parametr Trasa	$MGOR$ (pu·s <sup>-1</sup> )	$MGCR$ (pu·s <sup>-1</sup> )	$KP\_2$ (pu)	$KI\_2$ (pu)
EDST-ECHV	0,050	0,050	2,5	0,500
EORK-ECHV	0,066	0,066	1,0	0,125

Při výpočtu parametru  $KI\_2$  se vycházelo z hodnot v Tab. A-21 s použitím vzorců:

$$KI\_2 = \frac{1}{TI2} \quad (A.3)$$

Tab. A-21: Výpočtové parametry regulátoru otáček

Symbol	Parametr	Jednotka	EDS - ECHV	EOR - ECHV
$TI2$	Ekvivalentní časová konstanta zesílení regulátoru otáček	s	2	8

## B PARAMETRY TRANSFORMÁTORŮ A PŘEPÍNAČE ODBOČEK

### Transformátor

- CONFIGURATION

**3 Phase Transformer MVA:** Jmenovitý výkon transformátoru  $Tmva$ .

**Base operating frequency:** Frekvence systému 50 Hz.

**Winding #1 Type:** Způsob zapojení primárního vinutí ( $\Delta$  nebo Y).

**Winding #2 Type:** Způsob zapojení sekundárního vinutí ( $\Delta$  nebo Y).

**Delta Lags or Leads Y:** Parametr, zdali se zapojení do trojúhelníku opožďuje (*Lags*) za zapojením do hvězdy, nebo jej předbíhá (*Leads*) o  $30^\circ$ . Tato možnost je dostupná pouze v případě, že zapojení vinutí jsou rozdílná. Vzhledem k zapojení transformátorů Yd1 je nastaveno vždy *Leads*.

**Positive sequence leakage reaktance:** Reaktance transformátoru  $Xl$  v poměrných hodnotách vztažených na jmenovitý výkon a primární napětí transformátoru.

**Eddy current losses:** Ztráty v železe  $NLL$ , měřené při chodu naprázdno. Pro každý transformátor zadána hodnota 10 % ztrát v mědi  $CuL$ .

**Copper losses:** Ztráty v mědi  $CuL$ , měřené při chodu nakrátko.

**Tap changer on winding:** Přepínač odboček transformátoru. Na výběr ze tří možností (žádné/přepínač odboček na primární straně/přepínač odboček na sekundární straně).

- WINDING VOLTAGES

**Winding 1 Line to Line voltage (RMS):** Efektivní hodnota mezifázového napětí primární strany transformátoru  $V1$ .

**Winding 2 Line to Line voltage (RMS):** Efektivní hodnota mezifázového napětí sekundární strany transformátoru  $V2$ .

V Tab. B-1 jsou shrnuty hodnoty parametrů transformátorů.

Tab. B-1: Parametry transformátorů

Parametr Transformátor	$Tmva$ (MVA)	Zapojení vinutí prim./sek.	$Xl$ (pu)	$CuL$ (pu)	$V1$ (kV)	$V2$ (kV)
TDLS	360	$\Delta/Y$	0,14	0,00074	22	420
T1	250	Y/ $\Delta$	0,094	0	420	15,75
T11	32	$\Delta/\Delta$	0,104	0,00480	15,75	6,3
TORK	200	$\Delta/Y$	0,127	0,00089	15	242
T201	200	Y/Y	0,107	0,00160	230	121
TVS	40	Y/ $\Delta$	0,11	0,00224	121	6,3

Při výpočtu parametrů se vycházelo z hodnot v Tab. B-2 s použitím vzorců:

$$Z_v = \frac{V1^2}{Tmva} \quad (B.1)$$

$$Xl = \frac{X}{Z_v} \cdot p_t \quad (B.2)$$

$$CuL = \frac{3 \cdot R \cdot p_t \cdot \frac{Tmva^2}{\sqrt{3} \cdot V1}}{Z_v} \quad (B.3)$$

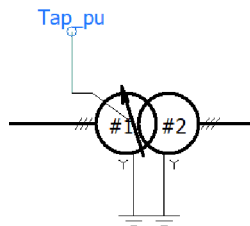
Parametry transformátoru jsou v programu MODES vztaženy na koncový uzel, pokud je koncový uzel na sekundární straně transformátoru, je nutné vynásobit parametr převodem transformátoru  $p_t$  viz rovnice 7.8. Takový transformátor je v Tabulce B-1 podtrhnut.

$$p_t = \frac{V1}{V2} \quad (B.4)$$

Tab. B-2: Výpočtové parametry transformátorů

Symbol	Parametr	Jednotka	TDLS	T1	T11	TORK	T201	TVS
<i>X</i>	Reaktance	$\Omega$	0,188	0,065	0,129	0,143	28,299	0,109
<i>R</i>	Odpor	$\Omega$	0,001	0	0,006	0,001	0,426	0,006

## Přepínač odboček



Obr. B-1: Transformátor se vstupem pro změnu napětí

Parametry přepínače odboček:

- CONFIGURATION

**Which winding is controlled – is it tapped winding?:** Informace o tom, zdali je kontrolováno vinutí, na kterém je vyvedeno přepínání odboček. Vzhledem ke skutečnosti, že požadavkem je udržení napětí na sekundární straně transformátoru a přepínání odboček je umístěno na primární straně, byla zvolena možnost No.

**Nominal voltage of controlled winding (kV):** Jmenovitá hodnota napětí na kontrolované straně transformátoru. Zadáno napětí 6,11 kV.

**Per unit step of one Tap:** Změna napětí při přepnutí odbočky vyjádřena v poměrných hodnotách. Požadavkem jsou 2 %, tedy 0.02 pu.

**Number of Taps increasing/decreasing from nominal:** Počet odboček zvyšujících/snižujících, zvoleno 8/8.

**Initial Tap position:** Počáteční pozice přepínače. Aby přepínač vybavil pouze v případě odchylky od jmenovité hodnoty, byla zvolena hodnota 9.

**Time delay of one Tap (s):** Čas zpoždění vybavení přepínače. V případě, že napětí klesne/stoupne o více než v tomto případě 2,2 %, začne se odpočítávat zadaný čas. Nastaveno 10 s.

## C PARAMETRY VEDENÍ A ZÁTĚŽE

### Vedení

Parametry pro  $\Pi$  článek:

- MAIN CONFIGURATION

**Enter Impedance, Admittance Data in:** Zde je na výběr z možností, zdali parametry vedení zadat přímo v hodnotách vztažených na délku, nebo v poměrných jednotkách. Byla vybrána možnost přímého zadání v hodnotách R, Xl, Xc [ohm/m].

**Line Rated Frequency:** Frekvence systému, zvolena hodnota 50.0 [Hz].

**Line Length:** Délka vedení  $l$ .

**Enter 0 Sequence Data, or Estimate:** Zde se volí možnost, jestli zadat hodnoty netočivé složky ručně, nebo je nechat určit programem. Byla zvolena možnost určení programem Estimate.

- R, Xl, Xc Data [ohm]

Parametry i s hodnotami jsou popsány v Tab. C-1.

Při výpočtu parametrů se vycházelo z hodnot Tab. C-3 a Tab. C-4 s použitím vzorců:

$$R_p = \frac{R}{l} \quad (\text{C.1})$$

$$X_p = \frac{X}{l} \quad (\text{C.2})$$

$$B_p = \frac{1}{B} \cdot l \quad (\text{C.3})$$

Tab. C-1: Parametry vedení  $\Pi$  článku

Vedení	Délka $l$	Parametr	Symbol	Český ekvivalent	Hodnota
V11	10 km	+ve Sequence Resistance	$R_p$	Odpor vedení	8.00E-5 ohm·m <sup>-1</sup>
		+ve Seq. Inductive Reactance	$X_p$	Induktivní reaktance	3.42E-4 ohm·m <sup>-1</sup>
		+ve Seq. Capacitive Reactance	$B_p$	Kapacitní reaktance	454,5 ohm·m

Zadávané parametry modelu s rozloženými parametry nejsou příliš odlišné od modelu  $\Pi$  článku:

- CONFIGURATION

**Steady-state frequency:** Frekvence v ustáleném stavu, zvolena hodnota 50.0 [Hz].

**Segment length:** Délka vedení  $l$ .

Další parametry vedení se zadávají v oblasti skrze možnost **Edit Definiton**. Zde byla podobně jako v předchozím případě v parametrizaci vedení, kartě **Manual YZ Data Configuration/Data Entry Method** vybrána možnost přímého zadání hodnot R, Xl, Xc (ohm/m) a v parametru **0 Sequence Data Representation** byl taktéž vybrán možnost Estimate 0 Sequence Data výpočet nulové

složky pomocí programu. V kartě **R, XI, X, Data Entry [ohm/m]** jsou zadávány informace odporu a reaktanci vedení, tyto informace jsou pro všechna vedení zadány v Tab. C-2. Pro výpočet byly využity stejné vzorce jako v případě  $\Pi$  článku.

Tab. C-2: Parametry vedení s rozloženými parametry

Parametr Vedení	Délka $l$ (km)	+ve Seq. Resistance ( $\text{ohm} \cdot \text{m}^{-1}$ )	+ve Seq. Inductive Reactance ( $\text{ohm} \cdot \text{m}^{-1}$ )	+ve Seq. Capacitive Reactance ( $\text{ohm} \cdot \text{m}$ )
V01	60	2,01E-5	2,70E-4	289,9
V02	100	3,18E-5	3,16E-4	266,6
V03	10	2,56E-5	2,58E-4	277,8
V12	90	7,69E-5	3,81E-4	422,5
V13	70	8,71E-5	4,03E-4	397,7
V14	20	1,39E-4	3,73E-4	408,1

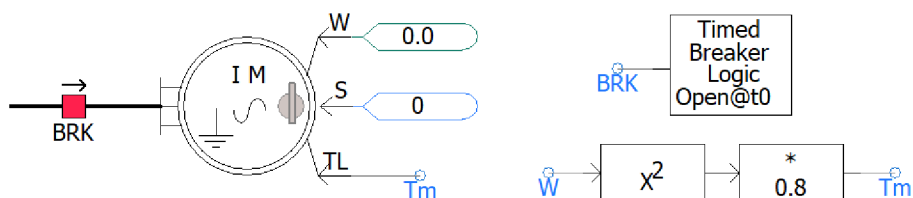
Tab. C-3: Výpočtové parametry vedení EDS – ECHV

Symbol	Parametr	Jednotka	V01	V02	V03
$X$	Reaktance	$\Omega$	16,21	31,58	2,576
$R$	Odpor	$\Omega$	1,216	3,184	0,256
$B$	Susceptance	$\mu\text{S}$	207	375	36

Tab. C-4: Výpočtové parametry vedení EOR – ECHV

Symbol	Parametr	Jednotka	V11	V12	V13	V14
$X$	Reaktance	$\Omega$	3,422	31,30	28,23	7,460
$R$	Odpor	$\Omega$	0,779	6,921	6,098	2,779
$B$	Susceptance	$\mu\text{S}$	22	213	176	49

## Zátěž



Obr. C-1: Model asynchronního motoru

Tab. C-5: Koefficienty zatížení motorů

Číslo motoru	Koefficient zatížení
1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 11, 12, 13	0,89
2.4, 2.5, 2.7, 2.11, 2.12, 2.13	0,91
2.6, 2.9	0,92
2.1, 2.2	0,93
2.3	0,94
5	0,95
2.8	0,96
2.10	0,97
7	0,98

Parametry modelu asynchronního motoru:

- **GENERAL**

**Rated Power:** Jmenovitý výkon motoru  $P_{base}$ . Nejsou známy hodnoty účinností jednotlivých motorů, výkony byly tedy spočítány s použitím vztahu C.4 ze známých hodnot příkonů  $P_0$  a účinnost  $\eta$  motorů byla stanovena odhadem na hodnotu 0,9. Hodnoty výkonů a příkonů pro obě trasy jsou dostupné v Tab. 5-2 a Tab. 5-3.

$$P_{base} = \eta \cdot P_0 \quad (C.4)$$

**Rated Voltage:** Jmenovité napětí  $V_{base}$ . Pro všechny zátěže stejné = 6 kV.

**Base Angular Frequency:** Jmenovitá kruhová frekvence  $OMEG$ . Pro všechny zátěže stejná =  $314.16 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**Stator/Rotor Turns Ratio:** Poměr otáček statoru ku rotoru při chodu naprázdno. Tato hodnota se určuje z testu naprázdno a pro jednotlivé motory není známá. Vzhledem ke skutečnosti, že jakákoliv zadaná hodnota neměla na výsledek simulace vliv, byla ponechána výchozí hodnota 2,6377.

**Angular Moment of Inertia:** Časová mechanická konstanta  $J$ .

**Mechanical Damping:** Tlumení  $D$ . Pro všechny zátěže byla ponechána výchozí hodnota 0.01 pu.

- **OPTIONS**

**Rotor Squirrel Cages Exists:** Tímto parametrem se určuje, zda se jedná o rotor s kotvou nakrátko (squirrel cage rotor), nebo o rotor s kroužkovou kotvou (wound rotor). V případě, že se jedná o klecový rotor, zvolí se hodnota YES.

**Number of Rotor Squirrel Cages:** V tomto parametru se volí typ klecového rotoru. Pro dvouklecový se vybere hodnota 1. Pro všechny zátěže byl vybrán dvouklecový model.

- **STATOR AND ROTOR RESISTANCES/INDUCTANCES**

Popis parametrů je v Tab. C-6.

Hodnoty parametrů jednotlivých motorů jsou v Tab. C-7 a Tab. C-8.

Tab. C-6: Parametry motorů

Popis v PSCADu	Český ekvivalent	Symbol
Stator Resistance	Odpor statoru	$R1$
Wound Rotor Resistance	Odpor první klece	$R2$
First Squirrel Cage Resistance	Odpor druhé klece	$R3$
Magnetizing Inductance	Magnetizační indukce	$Xmd$
Stator Leakage Inductance	Indukčnost statoru	$Xa$
Wound Rotor Leakage Inductance	Indukčnost první klece	$Xkd1$
First Cage Leakage Inductance	Indukčnost druhé klece	$Xkd2$

Tab. C-7: Hodnoty parametrů motorů trasy Dlouhé Stráně – Chvaletice

Parametr Číslo motoru	$J$ (s)	$R1$ (pu)	$R2$ (pu)	$R3$ (pu)	$Xmd$ (pu)	$Xa$ (pu)	$Xkd1$ (pu)	$Xkd2$ (pu)
1	1,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,050	0,130	0,090
2	1,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,020	0,140	0,090
3	1,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,020	0,140	0,090
4	0,70	0,001	0,010	0,129	2,46	0,126	0,110	0,027
5	1,41	0,026	0,008	0,100	4,82	0,130	0,157	0,095
6	1,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,020	0,140	0,090
7	2,00	0,018	0,009	0,109	4,60	0,106	0,112	0,057
8	1,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,020	0,140	0,090
9=10	1,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,020	0,140	0,090
11=12=13	1,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,020	0,140	0,090



Tab. C-8: Hodnoty parametrů motorů trasy Orlik – Chvaletice

Parametr Číslo motoru	$J$ (s)	$R1$ (pu)	$R2$ (pu)	$R3$ (pu)	$Xmd$ (pu)	$Xa$ (pu)	$Xkd1$ (pu)	$Xkd2$ (pu)
2.1	2,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,050	0,130	0,090
2.2	1,00	0,200	0,010	0,168	2,93	0,086	0,126	0,049
2.3	7,40	0,009	0,007	0,022	3,29	0,100	0,111	0,055
2.4=2.5	2,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,050	0,130	0,090
2.6	2,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,050	0,130	0,090
2.7	0,70	0,001	0,010	0,129	2,46	0,126	0,110	0,027
2.8	1,41	0,026	0,008	0,100	4,82	0,130	0,157	0,095
2.9	2,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,050	0,130	0,090
2.10	1,07	0,018	0,009	0,109	4,60	0,106	0,112	0,057
2.11=2.12=2.13	2,00	0,100	0,010	0,100	3,00	0,020	0,140	0,090

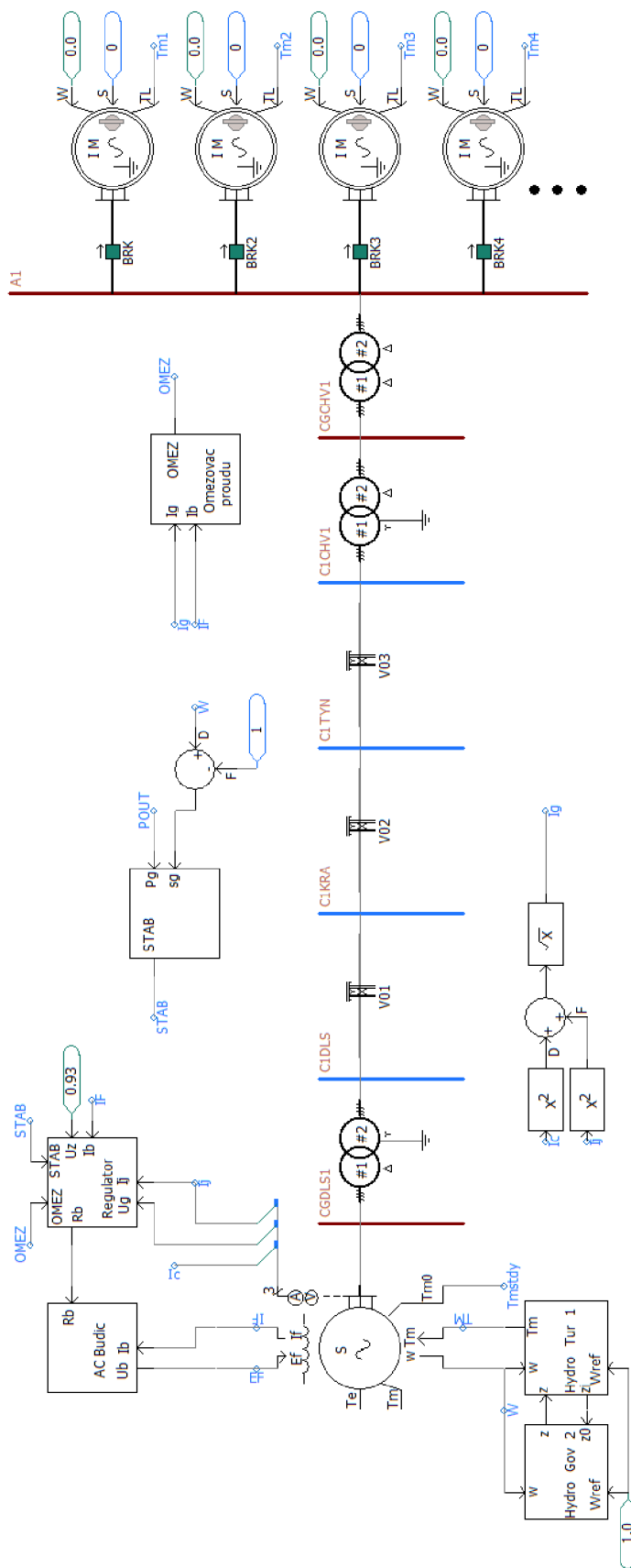
## D SYMBOLIKA MEZI PROGRAMY

Pro úplnost jsou zde uvedeny i symboly, které mají stejné značení pro oba programy. Parametry, které nejsou společné, nejsou uvedeny.

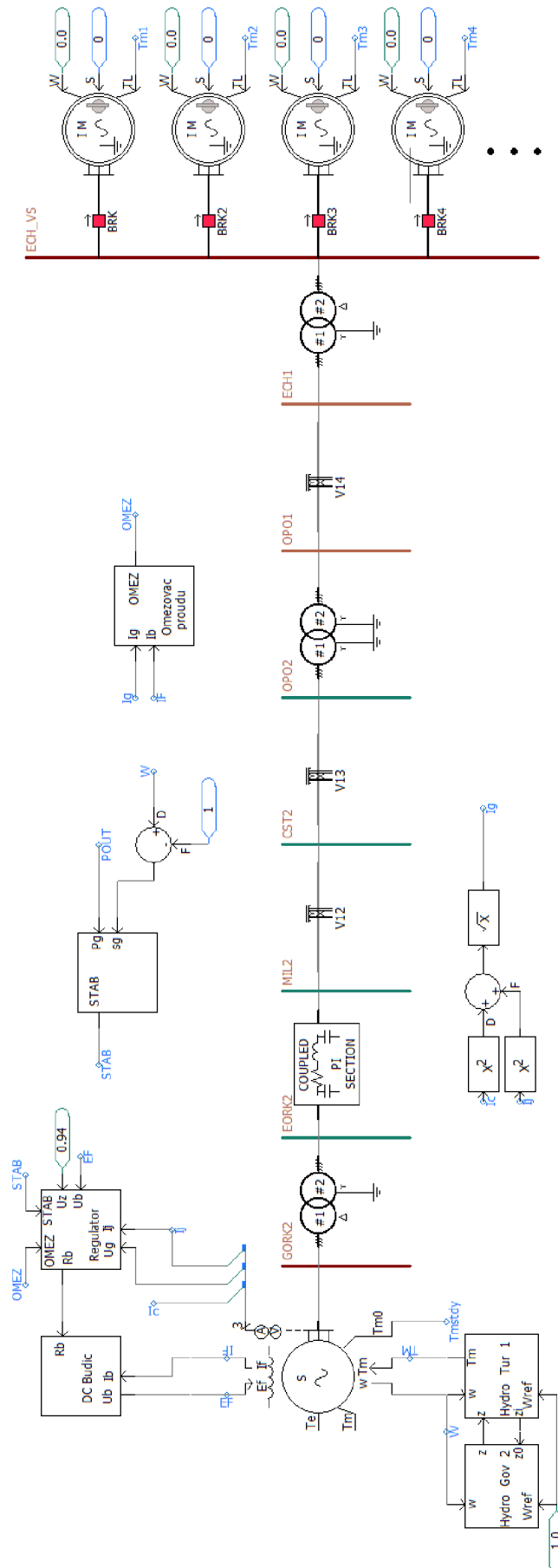
Tab. D-1: Symbolika mezi programy

Symbol PSCAD	Symbol MODES	Symbol PSCAD	Symbol MODES
Generátor		Systémový stabilizátor	
$S_{ng}$	$Sng$	$KSP$	$KSP$
$Tm$	$Tm$	$TS$	$TS$
$Ra$	$Rstat$	$KSs$	$KSs$
$Xd$	$Xd$	$TS1$	$TS1$
$Xd_{-}$	$Xd1$	$TS2$	$TS2$
$Tdo_{-}$	$Td01$	$USmax$	$USmax$
$Xd_{-}$	$Xd2$	Turbína	
$Tdo_{-}$	$Td02$	$QNL$	$qNL$
$Xq$	$Xq$	$TW$	$Tw$
$Xq_{-}$	$Xq1$	$D_{-1}$	$beta$
$Tqo_{-}$	$Tq01$	Regulátor turbíny	
$Xq_{-}$	$Xq2$	$Rp$	$bp$
$Tqo_{-}$	$Tq02$	$MGOR$	$Vhmax$
AC Budič		$MGCR$	$Vhmax$
$Ubmax$	$Ubmax$	$KP_{-2}$	$kp2$
$Ubmin$	$Ubmin$	$TI_{-2}$	$TI2$
$Ka$	$Ka$	$TA_{-2}$	$TEHP$
$Ta$	$Ta$	$TC_{-2}$	$TV$
$Kc$	$Kc$	Transformátor	
DC Budič		$R$	$R$
$Ubmax$	$Ubmax$	$X$	$X$
$Ubmin$	$Ubmin$	Vedení	
$Ka$	$Ka$	$R$	$R$
$Ta$	$Ta$	$X$	$X$
Regulátor buzení		$B$	$B$
$KSE$	$Kse$	Motor	
$TS$	$Ts$	$Pbase$	$Sn$
$UIMAX$	$UImax$	$J$	$Tmech$
$UIMIN$	$UImin$	$R1$	$R1$
$TI$	$TI$	$R2$	$R2$
$URMAX$	$URmax$	$R3$	$R3$
$URMIN$	$URmin$	$Xmd$	$Xmi$
$KP$	$Kp$	$Xa$	$X1$
$kSTAT$	$Kstat$	$Xkd1$	$X2$
Omezovač proudů		$Xkd2$	$X3$
$UOMzad$	$UOMzad$		
$TIOM$	$TiOM$		
$UOMmax$	$UOMmax$		
$TOM$	$TOM$		

# E SCHÉMA MODELŮ TRAS PSCAD



Obr. E-1: Model trasy EDS – ECHV



Obr. E-2: Model trasy EOR – ECHV