



# 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

## TVORBA A ESTIMACE MODELU MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY V PROGRAMU PSCAD

CREATION AND ESTIMATION OF SMALL HYDRO POWER PLANT MODEL IN PSCAD

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Aygul Razyapova

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Kopic̣ka

BRNO 2018

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Studentka:** Bc. Aygul Razyapova

**ID:** 171480

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Tvorba a estimace modelu malé vodní elektrárny v programu PSCAD**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Zpracování podkladů a studium problematiky malých vodních elektráren
2. Tvorba modelu malé vodní elektrárny v programu PSCAD
3. Zpracování dat z reálných měření a jejich využití pro zpřesnění modelu

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 5.2.2018

**Termín odevzdání:** 21.5.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Marek Kopička

**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.

Bibliografická citace práce:

RAZYAPOVA, A. *Tvorba a estimace modelu malé vodní elektrárny v programu PSCAD*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 61 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marek Kapička.

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu diplomové práce Ing. Marku Kapičkovi za spolupráci, cenné rady a připomínky při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěla také poděkovat svým rodičům za jejich podporu a trpělivost během celého mého studia.

Jako autorka uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla 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.

.....



## **ABSTRAKT**

Diplomová práce je zaměřena na vytvoření modelu malé vodní elektrárny (MVE) a části přílehlé elektrizační sítě v simulačním programu PSCAD, na základě reálných podkladových materiálů. Model je upřesněn na základě dat získaných měření, aby se co nejvíce shodoval s reálným zařízením.

V první části jsou popsány základní informace o malých vodních elektrárnách, tj. úvod do jejich problematiky. V druhé části je popsána základní teorie synchronních strojů a jejich matematické modelování.

Poslední část se zabývá návrhem modelu malé vodní elektrárny v prostředí PSCAD a porovnáváním dosažených výsledků s naměřenými hodnotami.

**KLÍČOVÁ SLOVA:** Malá vodní elektrárna, energie vody, turbína, generátor, vyvedení výkonu z MVE, model, estimace a simulace modelu, PSCAD.

## **ABSTRACT**

This thesis focused on creating a model of a small hydropower plant model (SHPP) and a part of the electricity network in the simulation software "PSCAD" (based on real sources). The model will be specified based on the data obtained from the measurements to correspond with the real equipment.

The first part is a description of basic information about small hydropower plant models, covering some of the problems. Second part is a theoretical background and mathematical descriptions.

The last part is about creating a small hydropower plant model using PSCAD and comparing the results with measured merits.

**KEY WORDS:** Small hydro power plant, waterpower, turbine, electrical generator, power output of SHPP, model, estimation and model simulation, PSCAD.

# OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK .....	10
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 ZÁKLADNÍ INFORMACE O MALÝCH VODNÍCH ELEKTRÁRNÁCH .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 VÝHODY A NEVÝHODY VYUŽITÍ MALÉ VODNÍ ELEKTRÁRNY .....</b>	<b>12</b>
<b>1.3 HYDROENERGETICKÝ POTENCIÁL.....</b>	<b>12</b>
<b>1.4 VÝKON A VÝPOČET VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE MVE.....</b>	<b>13</b>
<b>1.5 DOBA ROČNÍHO VYUŽITÍ INSTALOVANÉHO VÝKONU .....</b>	<b>13</b>
<b>2 TEORETICKÝ ZÁKLAD A MATEMATICKÉ POPISY .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1 DEFINICE .....</b>	<b>15</b>
2.1.1 PRINCIP ČINNOSTI SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU .....	15
2.1.2 KLASIFIKACE SYNCHRONNÍCH GENERÁTORŮ.....	16
2.1.3 DQ0 TRANSFORMACE.....	17
2.1.4 GENERÁTOR BEZ ZATÍŽENÍ .....	18
2.1.5 GENERÁTOR PRACUJÍCÍ NA ZATÍŽENÍ .....	20
2.1.6 EKVIVALENTNÍ ODPOROVÉ A ČASOVÉ KONSTANTY .....	21
2.1.7 NÁHRADNÍ SCHÉMA A FÁZOROVÝ DIAGRAM.....	22
2.1.8 TOČIVÝ MOMENT A VÝKON SYNCHRONNÍHO STROJE .....	23
2.1.9 FÁZOVÁNÍ SYNCHRONNÍHO GENERÁTORU NA SÍŤ .....	24
<b>2.2 BUDICÍ SYSTÉM A AUTOMATICKÝ REGULÁTOR NAPĚTÍ (AVR).....</b>	<b>26</b>
2.2.1 BUDICÍ SYSTÉM AC1A IEEE .....	27
<b>2.3 REGULACE TURBÍNY .....</b>	<b>28</b>
<b>3 STABILITA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY .....</b>	<b>30</b>
<b>3.1 ÚHLOVÁ STABILITA .....</b>	<b>30</b>
3.1.1 VLIV REGULACE BUZENÍ NEBO REGULACE TURBÍNY NA STABILITU.....	32
<b>3.2 FREKVENČNÍ STABILITA .....</b>	<b>32</b>
<b>3.3 NAPĚŤOVÁ STABILITA .....</b>	<b>33</b>
3.3.1 REGULÁTORY BUZENÍ GENERÁTORU .....	33
3.3.2 ZÁTĚŽ .....	34
<b>4 SIMULAČNÍ MODEL V PSCAD .....</b>	<b>35</b>
<b>4.1 POPIS MODELU .....</b>	<b>35</b>
4.1.1 SYNCHRONNÍ STROJ.....	35
4.1.2 REGULACE OTÁČEK TURBÍNY A ČINNÉHO VÝKONU .....	37
4.1.3 REGULACE JALOVÉHO VÝKONU.....	37
4.1.4 FÁZOVÁNÍ.....	38
<b>5 ZPRACOVÁNÍ DAT .....</b>	<b>40</b>
<b>5.1 POSTUP ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÝCH DAT .....</b>	<b>40</b>
<b>6 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A NASIMULOVANÝCH DAT .....</b>	<b>43</b>

<b>6.1 PROVÁDĚNÍ JEDNOTLIVÝCH MĚŘENÍ A POROVNÁVÁNÍ VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>43</b>
6.1.1 ROZBĚH GENERÁTORU .....	43
6.1.2 ZMĚNA ZATÍŽENÍ SÍTĚ.....	44
6.1.3 MANIPULACE PŘEPOJENÍ NA KONEC VEDENÍ.....	46
6.1.4 ZMĚNA NASTAVENÍ ČINNÉHO VÝKONU ZE 100 % NA 50%.....	48
6.1.5 ZMĚNA NASTAVENÍ ČINNÉHO VÝKONU Z 50 % NA 100%.....	49
6.1.6 SKOKOVÁ ZMĚNA DO TVRDÉ SÍTĚ.....	50
6.1.7 RÁZOVÉ ODSTAVENÍ GENERÁTORU .....	51
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>53</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA .....</b>	<b>54</b>
<b>1 PŘÍLOHA .....</b>	<b>55</b>
<b>2 PŘÍLOHA .....</b>	<b>57</b>
<b>3 PŘÍLOHA .....</b>	<b>59</b>
<b>4 PŘÍLOHA .....</b>	<b>60</b>



## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1</i> Blokové schéma typické jednotky pro výrobu energie, včetně budicího a řídicího systému [4].....	15
<i>Obr. 2-2</i> Typy synchronních strojů – a) turboalternátor, b) hydroalternátor [6].....	16
<i>Obr. 2-3</i> Idealizovaný synchronní stroj [4].....	17
<i>Obr. 2-4</i> Idealizovaný synchronní stroj [4].....	18
<i>Obr. 2-5</i> Rotující fázory toků a indukovaných napětí [4].....	19
<i>Obr. 2-6</i> Poměry synchronního stroje se zátěží [4].....	20
<i>Obr. 2-7</i> Cesty magnetických toků v různých stádiích poruchy: a) – okamžik poruchy, b) – po odeznění přechodných jevů v tlumícím vinutí, c) – po odeznění přechodných jevů v budicím vinutí [4].	21
<i>Obr. 2-8</i> Rozložení magnetomotorických sil a proudů v osách dq [4].....	22
<i>Obr. 2-9, 2-10</i> Fázorový diagram a náhradní schéma synchronního generátoru [4].....	23
<i>Obr. 2-11</i> Výkonová úhlová charakteristika [12].....	24
<i>Obr. 2-12</i> Náhradní schéma generátoru připojeného na tvrdou síť.....	25
<i>Obr. 2-13</i> Blokové schéma systému řízení buzení [8].....	26
<i>Obr. 2-14</i> Typické budicí systémy: (a) stejnosměrné budicí systémy; B) střídavý budicí systém se statickými usměrňovači; C) střídavý budicí systém s rotačními usměrňovači; D) napěťový zdroj s řízenými usměrňovači; (E) řízený usměrňovač přiváděný ze svorek generátoru; F) řízený usměrňovač napájený napětím a proudem generátoru. SG – synchronní generátor; SR – kroužky; ME – hlavní budič; AE – pomocný budič; RR – rotační usměrňovač; ET – excitační transformátor; CT – proudový transformátor; AVR – automatický regulátor napětí [4].....	27
<i>Obr. 2-15</i> Budicí systém AC1A IEEE [9].....	28
<i>Obr. 2-16</i> Blokové schéma řídicího systému hydraulické turbíny: pilot valve servomotor time constant – časová konstanta servomotoru řídicího ventilu, speed limit open/close – omezení rychlosti otevření/zavření, maximum/minimum gate opening – otevírání brány, gate servomotor - závěrky servomotoru, gate position – pozice brány [9].....	28
<i>Obr. 2-17</i> Provozní diagram [11].....	29
<i>Obr. 3-1</i> Zjednodušené rozdělení stability ES [12].....	30
<i>Obr. 3-2</i> a) Schéma soustavy, b) náhradní schéma soustavy [12].....	31
<i>Obr. 3-3</i> Výkonová charakteristika synchronního generátoru [12].....	31
<i>Obr. 3-4</i> a) Stabilní přechod b) Nestabilní přechod [12].....	32
<i>Obr. 3-5</i> PU charakteristika při různých hodnotách účinníku $\cos\varphi$ [12].....	33
<i>Obr. 3-6</i> PU charakteristika vlivu dosažení limitu regulace napětí buzení generátoru na napěťovou stabilitu [12].....	34
<i>Obr. 4-1</i> Model synchronního stroje s budičem zpracovaný v PSCAD.....	36
<i>Obr. 4-2</i> Automatický regulátor napětí ACA1 [9].....	37

---

<i>Obr. 4-3 Řídící systém turbíny .....</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 4-4 Řídící systém budícího systému .....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 4-5 Logika splnění fázovacích podmínek.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 5-1 Zobrazení CH1 a CH9 při přepnutí na konec vedení.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5-2 Zobrazení CH12, CH13 a CH14 při přepnutí na konec vedení .....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 5-3 Fourierova transformace a získání RMS a referenčních hodnot jedné fáze při přepnutí na konec vedení .....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 6-1 Porovnané naměřené a nasimulované výkony, kde <math>P_I</math> – naměřeny výkon, <math>out_P</math> – nasimulovaný výstupní výkon .....</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 6-2 Porovnané naměřené a nasimulované výstupní napětí, kde <math>V_{PCC}</math> – nasimulované napětí, <math>U_1</math>-naměřené napětí. ....</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 6-3 Naměřené RMS hodnoty proudu a napětí, přepočítané hodnoty činného a jalového výkonu .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6-4 Změna výstupního napětí generátoru během simulace .....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 6-5 Ovládací prvek přepínání sítě .....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 6-6 Naměřené a přepočítané hodnoty při manipulace připojení na konec vedení.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 6-7 Změny simulovaného výkonu v okamžik připojení na konec vedení.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 6-8 Změna výstupního napětí v okamžik připojení na konec vedení.....</i>	<i>48</i>

---

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 2-1 Základní parametry alternátoru při neustáleném stavu [6]:</i> .....	21
<i>Tab. 4-1 Nastavení parametrů generátoru</i> .....	36
<i>Tab. 5-1 Převody pro zpracování dat</i> .....	42

# 1 ÚVOD

V dnešní době se bere elektrická energie jako naprostá samozřejmost a pro většinu lidí je již takřka nemožné, existovat bez ní. Se zvyšující se spotřebou elektrické energie a s faktem, že fosilní paliva využívaná v tepelných elektrárnách nejsou obnovitelná, dále jsou poměrně drahá a z hlediska ekologie si taktéž nestojí dobře, jsou hledány alternativní způsoby získávání elektrické energie.

Vodní elektrárny skýtají poměrně velkou řadu výhod. Protože se jedná o prakticky nevyčerpatelný zdroj energie, pro zajištění provozu odpadají veškeré starosti se získáváním paliva a jeho následnou přepravou, jako u uhelných elektráren. Zároveň je to ekologický zdroj energie, který neprodukuje emise a neznečišťuje tím životní prostředí. Při srovnání s jinými obnovitelnými zdroji, hlavně tedy větrnou a fotovoltaickou elektrárnou, se jedná o poměrně stálý zdroj energie.

V oblastech, kde se vyskytují vodní toky, i menších průtoků, se dají instalovat malé vodní elektrárny, které se většinou používají jako zdroje pro místní spotřebu a umožňují tak nezávislost na elektrizační soustavě. V tomto provedení je v České republice velké množství těchto elektráren, které oproti těm s velkými výkony nepředstavují takový zásah do přírodního ekosystému.

## 1.1 Základní informace o malých vodních elektrárnách

Malými vodními elektrárnami (MVE) rozumíme vodní elektrárny o výkonu menším než 10 MW, které přeměňují hydroenergetický potenciál menších vodních toků nejprve na mechanickou a poté na elektrickou energii. Používají se k výrobě elektřiny pro osobní spotřebu, průmyslové účely i k dodávkám do distribuční sítě.

Na rozdíl od velkých vodních elektráren nepředstavuje jejich vybudování a provoz výrazný zásah do okolní přírody. Celkově je ve vodních elektrárnách v ČR technicky využitelný potenciál v rozsahu 3380 GWh/rok, což je cca 3 % celkové vyrobené elektrické energie. Z toho v malých vodních elektrárnách (MVE) zhruba 1570 GWh/rok. Dnes je v MVE využitý potenciál něco málo přes 50 %, protože zbývající část má menší potenciál a méně vhodné hydrologické podmínky. Přesný počet MVE není nikde zaznamenán. Podle různých statistik lze jen odhadovat přibližný počet, který činí něco přes tři tisíce provozovaných elektráren v České republice [1].

Podle normy ČSN 75 0120 rozdělujeme MVE podle [2]:

- využití:
  - průmyslové (od 1 MW).
  - mini elektrárny (do 1 MW).
  - mikro zdroje (do 0,1 MW).
  - domácí (do 35 kW).
- spádu:
  - nízkotlaké (do 20 m).
  - středotlaké (20–100 m).
  - vysokotlaké (nad 100 m).
- nakládání s vodou:
  - průtokové – pracující s přirozeným průtokem a využívající spád vzdutý jezem, nebo jen energii vodního toku.

- akumulační – pracující s odběrem vody akumulované v nádrži.
- přečerpávací – přečerpávající akumulovanou vodu z dolní nádrže do horní.

Z ekologických hledisek je důležité dělení podle technického řešení elektrárny vybudované na vodním toku:

- přehradní a jezové, které využívají vzdouvací zařízení (přehrada, jez).
- derivační, které odvádějí vodu z říčního koryta pomocí přivaděče.

## 1.2 Výhody a nevýhody využití malé vodní elektrárny

### Výhody:

- vodní energie patří mezi obnovitelné nevyčerpatelné zdroje energie.
- při vlastní spotřebě elektrické energie se vyhneme přenosovým ztrátám.
- při výrobě nejsou produkovány žádné škodlivé emise (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, atd.).
- přebytky vyrobené elektrické energie může výrobce prodávat do veřejné rozvodné sítě na základě smluvního vztahu s distribuční společností, a tím může výrazně ovlivnit návratnost vložených finančních prostředků.

### Nevýhody:

- poměrně časově i finančně náročná před realizační fází.
- při stavbě nového vodního díla je nutné vynaložit poměrně vysoké investiční náklady.
- návratnost vložených finančních prostředků je závislá na využití vyrobené elektrické energie.

## 1.3 Hydroenergetický potenciál

Hydroenergetický potenciál vodního toku je celková energie odtékající vody. Udává se zpravidla průměrná hodnota za 1 rok. Hydroenergetický potenciál se dělí na [3]:

- Hrubý hydroenergetický potenciál:

$$P_a = g \int_0^H m_s dH \quad (\text{W}) \quad (1.1)$$

, kde  $P_a$  – součet všech výkonů jednotlivých úseku toku při středním průtoku,  $m_s$  – střední průtok v elementárním úseku trasy jako aritmetický průměr průtoku za delší období,  $H$  – hrubý geodetický spád mezi pramenem a ústím,  $dH$  – hrubý spád elementárního úseku toku při středním průtoku.

- Teoretický hydroenergetický potenciál:

$$P_T = gQH \quad (\text{W}) \quad (1.2)$$

, kde  $\eta=1$  – účinnost přeměny,  $P_T$  – teoretický hydroenergetický potenciál.

Technicky využitelný hydroenergetický potenciál je část celkového potenciálu, který je využitelný k výrobě elektrické energie. Celosvětový technicky využitelný hydroenergetický potenciál je cca 20000 TWh/rok. Technicky využitelný hydroenergetický potenciál České republiky činí přibližně 3,5 TWh za rok [3].

## 1.4 Výkon a výpočet výroby elektrické energie MVE

Mechanický výkon turbíny je určen hodnotou mechanické energie dodávané hřídeli turbíny za jednotku času, určuje se výkonem naměřeným na svorkách generátoru. Jmenovitý výkon turbíny  $P_n$  je mechanický výkon turbíny při jmenovitých otáčkách. Instalovaný výkon turbíny  $P_i$  je maximální výkon turbíny, který lze dosáhnout při nejpříznivějších podmínkách provozu [3].

Teoretický výkon vodní turbíny MVE:

$$P_T = \rho \cdot gQH \quad (\text{kW}) \quad (1.3)$$

, kde  $\rho$  – měrná hmotnost vody ( $1000 \text{ kg/m}^3$ ),  $g$  – gravitační zrychlení ( $9,8 \text{ m/s}^2$ ),  $H$  – výškový rozdíl hladin,  $Q$  – průtok turbínou ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Teoretický výkon vodní turbíny, který je zmenšen o volumetrické, mechanické a hydraulické ztráty nazýváme efektivním výkonem turbíny  $P_{ef}$ .

$$P_{ef} = P_i \eta_t = \rho \cdot gQH \eta_t \quad (\text{kW}) \quad (1.4)$$

, kde  $\eta_t$  – koeficient účinnosti vodní turbíny,  $\eta_t = \eta_v \eta_m \eta_h < 1$ .

Po dosazení vychází:

$$P_{ef} = 9,8 \cdot QH \eta_t \quad (\text{kW}) \quad (1.5)$$

V praxi se vztah zjednodušuje:

$$P_{ef} = kQH \quad (\text{kW}) \quad (1.6)$$

$$k = 9,8 \eta_t \quad (-) \quad (1.7)$$

- $k = 8$  pro malé vodní elektrárny s výkony 5-10 MW s Kaplanovými a Peltonovými turbínami bez převodu a s příslušenstvím vynikající kvality.
- $k = 7$  pro malé vodní elektrárny s Francisovými, Kaplanovými a Peltonovými turbínami a s použitým strojním zařízením dobré kvality, také s Bánkiho turbíny v optimálním vyhotovení.
- $k = (5-6)$  pro malé vodní elektrárny s turbínami bez dvojité regulace, s Bánkiho turbínami s převodem, s Bánkiho turbínami na malé spády nebo vkládanými přímo do potrubí [3].

Výroba elektrické energie elektrárnou o výkonu  $P$  za dobu  $t$  je dána vztahem [3]:

$$E = Pt \quad (\text{kWh}) \quad (1.8)$$

## 1.5 Doba ročního využití instalovaného výkonu

Doba ročního využití instalovaného výkonu  $T_i$  je jednou ze základních technickoekonomických otázek opodstatněnosti výstavby malé vodní elektrárny. Její velikost je určena volbou instalovaného výkonu elektrárny při daných hydrologických poměrech a je dána vztahem [3]:

---

$$T_i = \frac{E}{P_i} \quad (\text{h}) \quad (1.9)$$

, kde  $E$  – hrubá roční výroba elektrické energii,  $P_i$  – instalovaný výkon elektrárny.

Pro jednotlivé typy malých vodních elektráren platí [3]:

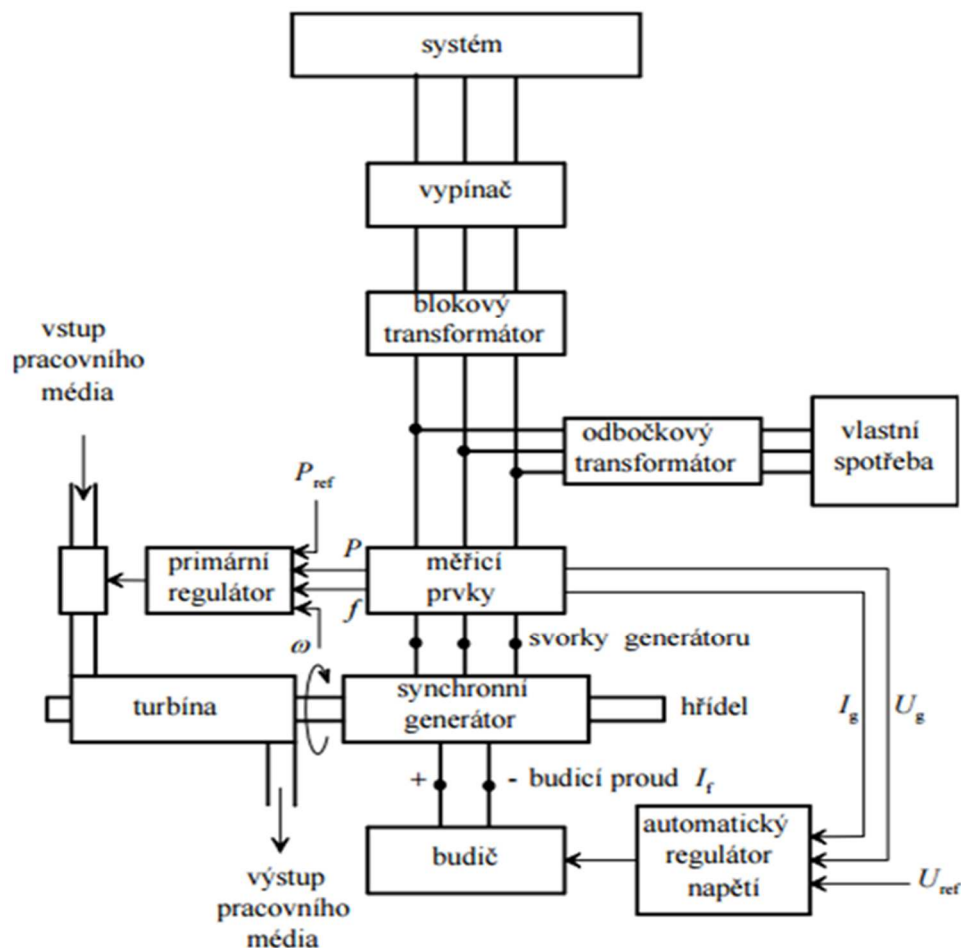
- průtočné  $T_i = (4\ 000-6\ 500)$  h.
- akumulární  $T_i = (1\ 500-3\ 000)$  h.
- přečerpávací  $T_i = (1\ 000-1\ 500)$  h.

## 2 TEORETICKÝ ZÁKLAD A MATEMATICKÉ POPISY

### 2.1 Definice

Na obr. 2-1 je znázorněno principiální blokové schéma výroby elektrické energie v elektrárenském bloku vodní elektrárny. Synchronní generátor je poháněn primárním mechanickým zdrojem, nejčastěji turbínou, která je vybavena regulátorem. Regulátor řídí její rychlost nebo dodávaný výkon v závislosti na nastavené frekvenční charakteristice. Vyrobena elektrická energie se dodává do sítě přes blokový transformátor [4].

Dalšími důležitými prvky elektrárenského bloku je budič, regulátor buzení, a měřicí a ovládací zařízení. Pokud je blok v sekundární regulaci (dálkové ovládání), vstupují do regulátoru také požadované hodnoty činného a jalového výkonu. Důležitým subsystémem je vlastní spotřeba elektrárny, která je napájena z odbočkového transformátoru. Jednotlivé pohony, které jsou poháněné asynchronními motory, slouží technologii bloku, což jsou čerpadla, ventilátory atd. [4].



Obr. 2-1 Blokové schéma typické jednotky pro výrobu energie, včetně budičeho a řídicího systému [4].

#### 2.1.1 Princip činnosti synchronního generátoru

Synchronní generátory jsou točivé elektrické stroje pracující na střídavý třífázový proud, u kterých se rotor otáčí stejnými otáčkami (stejnou rychlostí) jako elektromagnetické pole statoru,



bez ohledu na zatížení. Mechanická rychlost rotoru se vztahuje k elektrické frekvenci statoru pomocí následující rovnice [5].

$$f = \frac{n_m p}{60} \quad (\text{Hz}) \quad (2.1)$$

, kde  $p$  je počet pólových dvojic na rotoru,  $f$  je elektrická frekvence statoru v Hz a  $n_m$  je rychlost otáčení magnetického pole v otáčkách/min.

Synchronní generátory se využívají ve většině elektráren jako nejdůležitější typy strojů pro výrobu elektrické energie. Mají vysokou účinnost (nad 95%), malé provozní náklady a malý moment setrvačnosti rotoru.

Hlavní části synchronního stroje jsou stator a rotor [5].

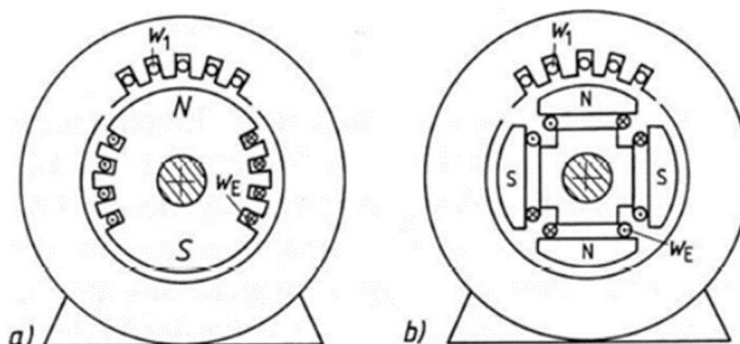
Stator je pevná nepohyblivá část synchronního stroje. Je sestaven z izolovaných statorových plechů, které minimalizují ztráty v železe, a obsahuje trojfázové vinutí umístěné v drážkách uvnitř magnetického obvodu. Vinutí každé fáze je rozděleno na pólové dvojice, které jsou umístěny na protilehlých stranách statoru. Jejich počet na jednu fázi spolu s frekvencí napájecího napětí rozhoduje o počtu otáček synchronního zdroje. Vinutí statoru může být spojené do hvězdy nebo do trojúhelníku. Cívky jsou vzájemně posunuty o  $120^\circ$ , což je dáno fázovým posunem jednotlivých fází v síti.

Rotor je pohyblivá část stroje. Osou rotoru prochází hřídel, která přenáší točivý moment od turbíny. Na rotoru je umístěno budicí vinutí napájené stejnosměrným proudem z budiče. Tento proud se převádí do vinutí rotoru přes sběrací kroužky a uhlíkové kartáče, které jsou umístěny na hřídeli rotoru. K buzení je možné získat stejnosměrný proud usměrněním síťového střídavého proudu [5].

### 2.1.2 Klasifikace synchronních generátorů

Synchronní alternátory se z hlediska provedení a použití dělí na [6]:

- Turboalternátory – vysokorychlostní horizontálně uspořádané stroje, které jsou poháněny plynovými a parními turbínami, většinou se používají na tepelných elektrárnách. Mají hladký rotor s malým průměrem rotující části.
- Hydroalternátory – vertikálně uspořádané stroje poháněné vodní turbínou a pracující na menších otáčkách (do 500 ot./min). Mají větší počet vyniklých pólů a větší průměr rotující části.

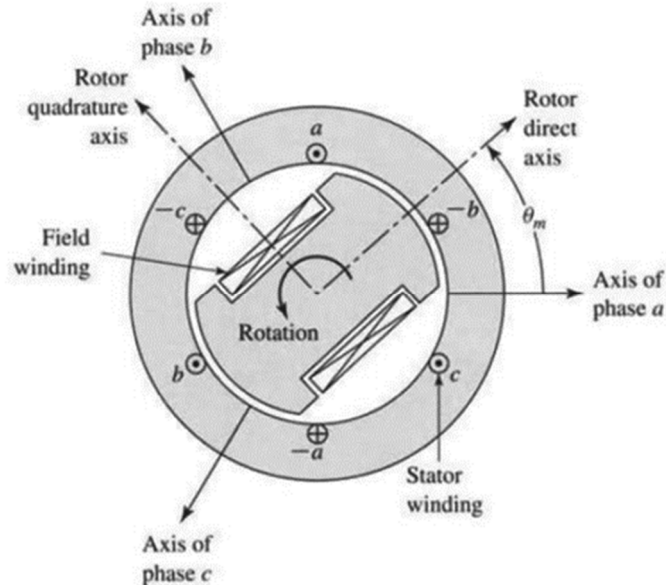


Obr. 2-2 Typy synchronních strojů – a) turboalternátor, b) hydroalternátor [6].

### 2.1.3 Dq0 transformace

Seznámení s problematikou modelování synchronního generátoru bylo provedeno podle literatury [4], [6] a [7].

Pro zjednodušení matematického popisu budou použité dvě transformace. Jedná se o Clarkovu transformaci z třífázového systému  $abc$  do dvoufázového  $\alpha\beta$ . Druhou transformací bude transformace Parkova, která provádí transformaci ze souřadného systému statoru  $\alpha\beta$  do souřadného systému rotoru  $dq$ .



Obr. 2-3 Idealizovaný synchronní stroj [4].

Clarkova transformace vychází z předpokladu, že proudy  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  jsou souměrné s fázovým posunem  $\frac{2\pi}{3}$ . Pro libovolnou veličinu lze transformaci zapsat takto:

$$\begin{cases} x_a = x_\alpha \\ x_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(x_b - x_c) \end{cases} \leftrightarrow \begin{cases} x_a = x_\alpha \\ x_b = -\frac{1}{2}x_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}x_\beta \\ x_c = -\frac{1}{2}x_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}x_\beta \end{cases} \quad (2.2)$$

Parkova transformace provádí transformaci ze statorového souřadného systému  $\alpha\beta$  do rotorového souřadného systému  $dq$ , kde jedna souřadnice je spjata s osou rotoru a druhá je na ní kolmá. Úhel mezi rotorovým a statorovým vinutím je označen  $\theta_m$ . Transformace může být vyjádřena ve formě matrice [4]:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_m) & \cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_m) & -\sin\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

a inverzní transformace:

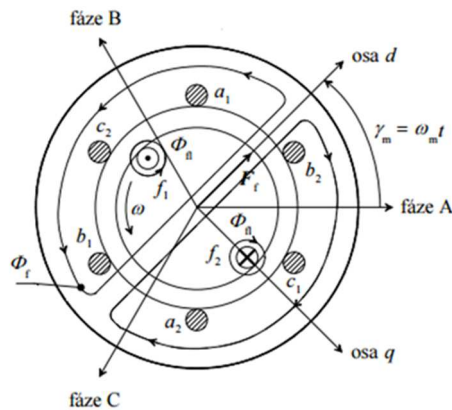
$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_m) & -\sin(\theta_m) & 1 \\ \cos\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_m - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_m + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

### 2.1.4 Generátor bez zatížení

Rotující tok vybuzený proudem ve vinutí rotoru vytváří sinusoidální magnetomotorické napětí (sílu  $F_f$ ) viz obr. 2–4.

$$F_f = N_f \cdot i_f \quad (2.5)$$

, kde  $N_f$  je počet závitů rotorového vinutí.



Obr. 2-4 Idealizovaný synchronní stroj [4].

Magnetomotorická síla  $F_f$  vyvolává magnetický tok  $\Phi_f$ , který protéká magnetickým obvodem.

$$\Phi_f = \frac{F_f}{R_m} = \frac{N_f \cdot i_f}{R_m} \quad (2.6)$$

, kde  $R_m$  – reluktance vzduchové mezery, reluktance železa je zanedbatelná.

Když se rotor otáčí synchronní rychlostí, tok excitace se s ním otáčí a vytváří časově proměnnou vazbu toku s každou fází vinutí kotvy. Přijímá se fáze A jako reference:

$$\psi_{fA}(t) = \psi_{fa} \cos(\omega t) = N_\phi \cdot \Phi_f \cos(\omega t) = N_\phi \cdot \frac{N_f \cdot i_f}{R_m} = M_f \cdot i_f \cos(\omega t) \quad (2.7)$$

$$\psi_{fB}(t) = M_f \cdot i_f \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.8)$$

$$\psi_{fC}(t) = M_f \cdot i_f \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.9)$$

$$\psi_{fa} = N_\phi \cdot \Phi_f \quad (2.10)$$

, kde  $\psi_{fa}$  je amplituda vazby budícího toku z kotvy fázového vinutí,  $M_f$  je vzájemná indukčnost mezi vinutím statoru a rotoru,  $N$  je počet závitů v každém fázovém vinutí a  $k_w$  je součinitel vinutí statoru.

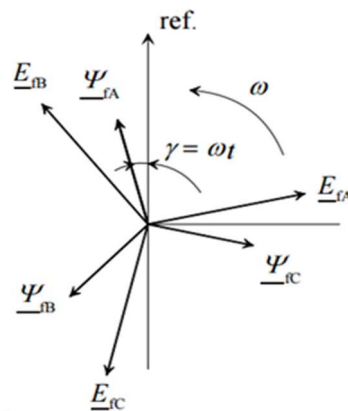
$$M_f = \frac{N_\phi N_f}{R_m}, \quad N_\phi = k_w \cdot N \quad (2.11, 2.12)$$

Uvedené toky indukují vnitřní napětí ve vinutí fáze A podle vztahu, viz fázorový diagram na obr. 2-5:

$$e_{fA} = -\frac{d\psi_{fA}(t)}{dt} = \omega M_f i_f \sin \omega t \quad (2.13)$$

$$e_{fB} = -\frac{d\psi_{fB}(t)}{dt} = \omega M_f i_f \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \quad (2.14)$$

$$e_{fC} = -\frac{d\psi_{fC}(t)}{dt} = \omega M_f i_f \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad (2.15)$$



Obr. 2-5 Rotující fázory toků a indukovaných napětí [4].

Efektivní hodnota elektromotorického napětí je:

$$E_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega \psi_{fa} = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega N_\phi \Phi_f = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega M_f i_f \cong 4,44 f M_f i_f \quad (2.16)$$

### 2.1.5 Generátor pracující na zatížení

V případě symetrické zátěže, satorovým vinutím protékají fázově posunuté proudy stejné amplitudy  $I_m$ . Fázové proudy budou mít vzhledem k referenční vazbě toku  $\psi_{fA}(t)$  úhel  $\lambda$  a mohou být vyjádřeny jako [4]:

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \cos(\omega t - \lambda) \\ i_B &= I_m \cos(\omega t - \lambda - \frac{2\pi}{3}) \\ i_C &= I_m \cos(\omega t - \lambda + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Dále tyto proudy vytvářejí magnetomotorické pulzující síly o velikostech:

$$\begin{aligned} F_A(t) &= N_a I_m \cos(\omega t - \lambda) \\ F_B(t) &= N_a I_m \cos(\omega t - \lambda - \frac{2\pi}{3}) \\ F_C(t) &= N_a I_m \cos(\omega t - \lambda + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

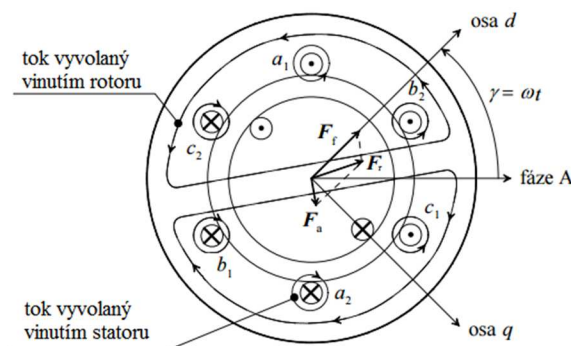
, kde  $N_a = \frac{4N_\phi}{p\pi}$ ,  $N_\phi = k_w N$ . Tyto magnetomotorické síly jsou posunuty prostoročasově, proto se chovají jako prostorové fázory jednotlivých fází. Magnetomotorická síla satoru  $F_a$  se určí jako:

$$\bar{F}_a = \bar{F}_A + \bar{F}_B + \bar{F}_C = N_a (I_A e^{j0} + I_B e^{j\frac{2\pi}{3}} + I_C e^{-j\frac{2\pi}{3}}) \cong 1,5 N_a I_m e^{j(\omega t - \lambda)} \quad (2.19)$$

, kde  $\bar{F}_a$  – rotující fázor s úhlovou rychlostí  $\omega$  při posunu o úhel  $\lambda$ , jehož modul je konstantní.

Fázory rotorové magnetomotorické síly  $F_f$  a satorové magnetomotorické síly  $F_a$  jsou vůči sobě ve stálé prostorové poloze, viz obr. 2-6. Výsledný tok vzduchové mezery  $\Phi_r$  je popsán fázorem magnetomotorické síly:

$$\bar{F}_r = \bar{F}_f + \bar{F}_a \quad (2.20)$$



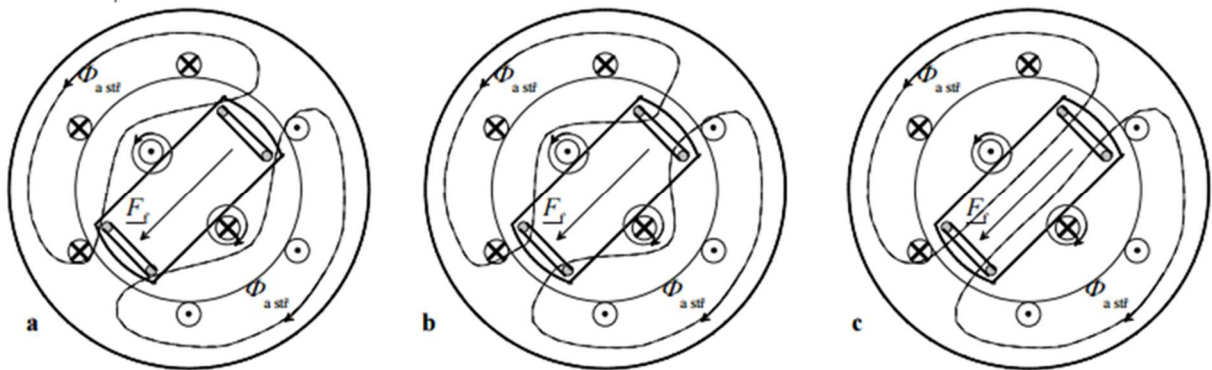
Obr. 2-6 Poměry synchronního stroje se zátěží [4].

## 2.1.6 Ekvivalentní odporové a časové konstanty

Elektromagnetické přechodné jevy jsou spojovány se změnami nebo poruchami v systému a v synchronním generátoru se projevují především prudkými změnami generovaných proudů a momentů. Pokud doba těchto jevů je krátká – několik milisekund, velký moment setrvačnosti rotujících hmot (rotoru a turbíny) nedovolí žádnou významnou změnu jejich rychlosti, kterou během elektromagnetických přechodných jevů považujeme za konstantní. Elektromagnetické přechodné jevy v synchronních generátorech lze kvalitativně posoudit na základě studia chování magneticky spřažených obvodů tlumicího, budicího a statorového vinutí v různých provozních režimech [5][6].

Rozdíl mezi poruchovým a ustáleným stavem synchronního generátoru zaleží na skutečnosti, že během poruchy se v rotoru indukují přídavné proudy. Ty vyvolají dodatečné magnetické toky působící proti toku vyvolanému statorovým vinutím a do značné míry tak rotor magneticky odstiňují.

Na obr. 2-7 jsou ukázány tři typické situace. Část **a)** ukazuje situaci bezprostředně po poruše. V tomto okamžiku musí zůstat tokové spřažení rotoru a statoru stejné jako před poruchou, takže tok vybuzený střídavou složkou proudů ve statorovém vinutí rotorem, konkrétně smyčkami tlumicího a budicího vinutí, nesmí procházet a uzavírá se rozptylovými cestami, protože v tlumicím a budicím vinutí se indukují proudy vyvolávající tok opačný. Generátor se nachází v rázovém stavu. Poté se energie pole začíná kazit na rezistencích vinutí. Nejprve dojde k zatlumení proudů v tlumicím vinutí, které tak přestane budit tok opačného směru. Tomu odpovídá část **b)**. Tok vyvolaný statorovým vinutím již může protékat smyčkami tlumicího vinutí, avšak doposud ne vinutím budicím. Stroj je nyní v přechodném stavu. Teprve až dojde k zatlumení přechodné složky proudu v budicím vinutí rotoru část **c)**, může tok od statorového vinutí začít protékat celým rotorem, to znamená po dráze s minimální reluktancí. Stroj je v ustáleném stavu [4].



Obr. 2-7 Cesty magnetických toků v různých stádiích poruchy: a) – okamžik poruchy, b) – po odeznění přechodných jevů v tlumicím vinutí, c) – po odeznění přechodných jevů v budicím vinutí [4].

Tab. 2-1 Základní parametry alternátoru při neustáleném stavu [6]:

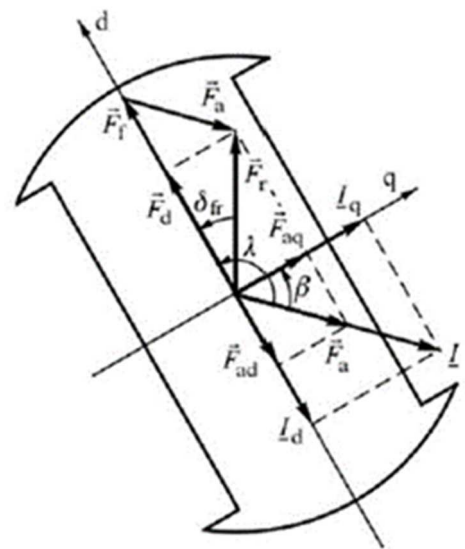
$X_{ad}$	podélná reaktance reakce vinutí statoru synchronního generátoru
$X_{aq}$	příčná reaktance reakce vinutí statoru synchronního generátoru
$X_{l\sigma}$	rozptylová reaktance vinutí statoru synchronního generátoru
$X_d$	podélná synchronní reaktance statorového vinutí synchronního generátoru

$X_d'$	přechodná podélná reaktance statorového vinutí synchronního generátoru
$X_d''$	rázová podélná reaktance statorového vinutí synchronního generátoru
$X_q$	příčná reaktance statorového vinutí synchronního generátoru
$X_q'$	příčná přechodná reaktance statorového vinutí synchronního generátoru
$X_q''$	rázová příčná reaktance statorového vinutí synchronního generátoru
$T_{d0}'$	přechodná časová konstanta (budícího obvodu) v podélné ose při chodu naprázdno
$T_{q0}'$	přechodná časová konstanta (budícího obvodu) v příčné ose při chodu naprázdno
$T_{d0}''$	rázová časová konstanta (tlumícího obvodu) v podélné ose při chodu naprázdno
$T_{q0}''$	rázová časová konstanta (tlumícího obvodu) v příčné ose při chodu naprázdno
$T_d'$	přechodná časová konstanta v podélné ose při chodu nakrátko
$T_d''$	rázová časová konstanta v podélné ose
$T_q''$	rázová časová konstanta v příčné ose
$T_m$	mechanická časová konstanta (podle velikosti generátoru – 7-10 sec)
$T_F$	časová konstanta buzení (do 1 sec)

### 2.1.7 Náhradní schéma a fázorový diagram

V synchronním stroji se vzduchová mezera mění obvodově kolem generátoru, přičemž nejužší mezera je podél osy  $d$  a nejširší podél osy  $q$ . Jak bylo zmíněno v souvislosti s transformací  $dq0$ , indukčnost ve statoru se mění s polohou rotoru vzhledem k odchylce reluktance mezi osami  $d$  a  $q$ , kde platí  $R_d < R_q$ .

Jelikož se tok uzavírá cestou nejmenší indukčnosti, vektor toku  $\psi_{fA}(t)$  není ve fázi s vektorem  $F_f$ . Pro řešení tohoto problému se vektor magnetomotorické síly a statorového proudu rozloží na oddělené veličiny v osách  $dq$  viz obr. 2-8 [4].



Obr. 2-8 Rozložení magnetomotorických sil a proudů v osách  $dq$  [4].

Výsledná magnetomotorická síla se určí jako:

$$\bar{F}_r = \bar{F}_d + \bar{F}_q, \quad (2.21)$$

, kde  $\bar{F}_d = \bar{F}_f + \bar{F}_{ad}$ ,  $\bar{F}_q = \bar{F}_{aq}$ .

Výsledný proud může být vyjádřen podle rovnice (2.22):

$$\bar{I} = \bar{I}_d + \bar{I}_q \quad (2.22)$$

Výsledná elektromotorická síla vzduchové mezery  $E_r$  a svorkové napětí jsou:

$$\bar{E}_r = \bar{E}_f + \bar{E}_{ad} + \bar{E}_{aq} = \bar{E}_f - jX_{ad}\bar{I}_d - jX_{aq}\bar{I}_q \quad (2.23)$$

$$\bar{U}_s = \bar{E}_f - jX_{ad}\bar{I}_d - jX_{aq}\bar{I}_q - jX_\sigma\bar{I} - R\bar{I} \quad (2.24)$$

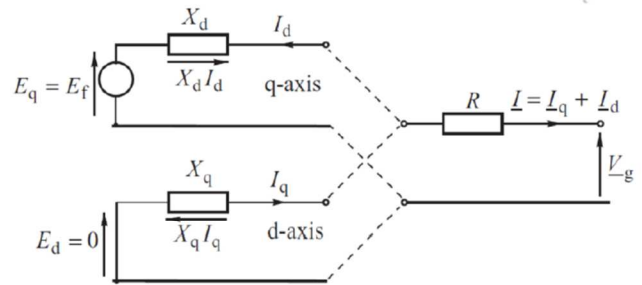
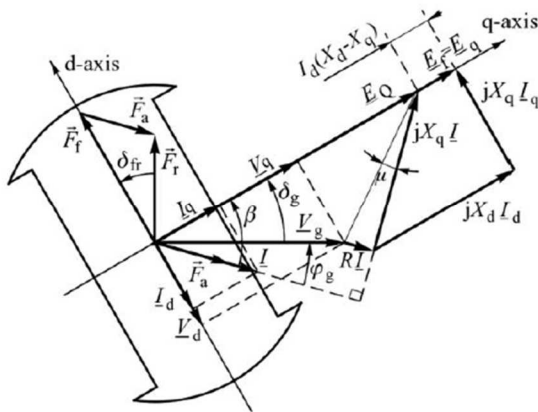
$$\bar{U}_s = \bar{E}_f - jX_d\bar{I}_d - jX_q\bar{I}_q - R\bar{I} \quad (2.25)$$

, kde  $X_d = X_{ad} + X_\sigma$ ,  $X_q = X_{aq} + X_\sigma$  jsou synchronní reaktance v osách  $dq$ , přičemž  $X_d > X_q$ .

Pro sestavení fázorového diagramu používáme upravenou rovnici, včetně napětí a elektromotorických sil:

$$\bar{E}_f = U_s + (R + jX_q)\bar{I} + j(X_d - X_q)\bar{I}_d = \bar{E}_q + j(X_d - X_q)\bar{I}_d \quad (2.26)$$

Na obr. 2-9 a 2-10 jsou znázorněny náhradní schéma a fázorový diagram.



Obr. 2-9, 2-10 Fázorový diagram a náhradní schéma synchronního generátoru [4].

### 2.1.8 Točivý moment a výkon synchronního stroje

Moment vzniku točivého momentu se skládá ze dvou složek. První složka, která je úměrná úhlu zatížení  $\delta_{fr}$ , se nazývá synchronní točivý moment. A druhá je reluktanční točivý moment, daný rozdílem reluktancí v osách  $dq$  a mezifázností magnetomotorické síly a toku ve vzduchové mezeře. Tento druhý moment obecně existuje i při nulovém buzení.



Rovnice momentu pro generátor jednopólového páru je:

$$M_m = \frac{\pi}{2} \Phi_f F_r \sin \delta_{fr} + \frac{\pi}{4} F_r^2 \frac{R_q - R_d}{R_q R_d} \sin 2\delta_{fr} \quad (2.27)$$

, kde  $\delta_{fr}$  je zatěžovací úhel mezi fázorem vstupního napětí  $U$  a indukovaným napětím rotoru  $U_{ib}$  nebo je to úhel mezi magnetickým polem statoru a rotoru. Je svázán s momentem na hřídeli.

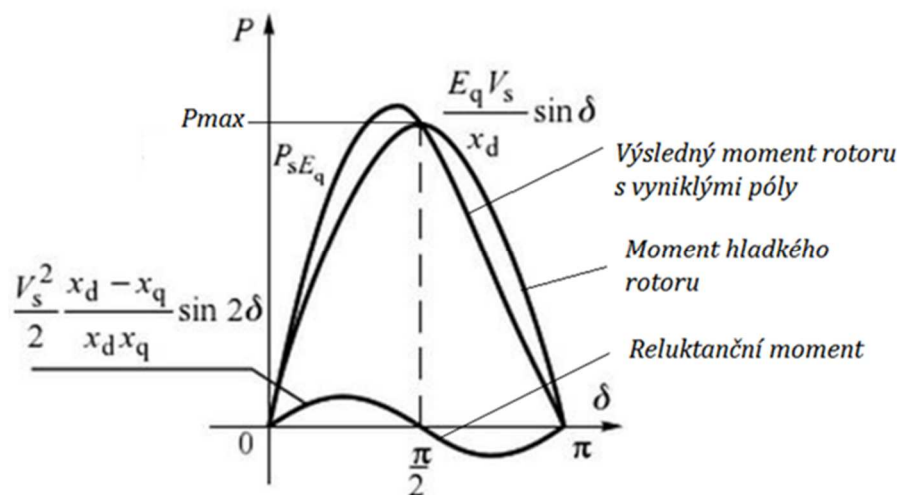
Na obr. 2-11 je znázorněn graf závislosti výkonu na zatěžovacím úhlu. Vzájemná vazba se popisuje následujícím způsobem: na rotoru se postupně zvyšuje moment pomocí poháněcího zařízení, třeba zvětšením průtoku vody, a jelikož magnetické pole statoru se určuje frekvencí sítě, a rotor se otáčí stejnými otáčkami, projeví se změna momentu (výkonu) na zatěžovacím úhlu.

Velikost úhlu bude postupně narůstat, až do té hodnoty, kdy si rotor neudrží synchronní chod a stroj vypadne ze synchronismu. Pro synchronní alternátory s hladkým rotorem tento stav bude při zatěžovacím úhlu  $90^\circ$ . Při této hodnotě bude dosažen maximální možný výkon.

Výkon dodávaný do soustavy:

$$P = \frac{E_q U}{x_d} \sin \delta + \frac{U^2 (x_d - x_q)}{2 x_q x_d} \sin 2\delta \quad (2.28)$$

Tato závislost plyne z obr. 2-11.



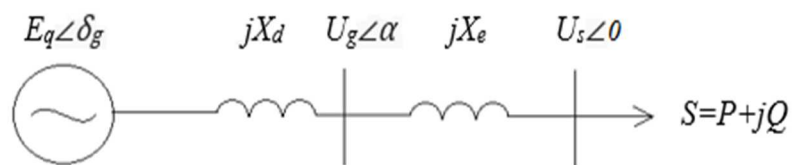
Obr. 2-11 Výkonová úhlová charakteristika [12].

### 2.1.9 Fázování synchronního generátoru na síť

Při spolupráci synchronního generátoru paralelně se sítí musíme zajistit, aby v okamžiku připojení generátoru k síti, nedošlo k proudovému rázu nebo k elektromechanickému vyrovnávacímu pochodu. Toto zajišťují následující podmínky – fázování [12]:

- stejný sled fází generátoru a sítě – systémy mají stejný smysl otáčení. Při nesouhlasu sledu je třeba zaměnit 2 fáze na jedné straně.
- stejný kmitočet – frekvence synchronního stroje se nastavuje otáčkami.
- stejnou velikost napětí a tvar křivky napětí  $E_g$  a  $U_s$  – lze měnit budícím proudem.
- minimální fázový posun mezi stejnojmennými fázemi sítě v okamžiku sepnutí.

Absolutně tvrdou síť rozumíme trojfázový systém s konstantním napětím a frekvencí viz obr. 2-12.



Obr. 2-12 Náhradní schéma generátoru připojeného na tvrdou síť.

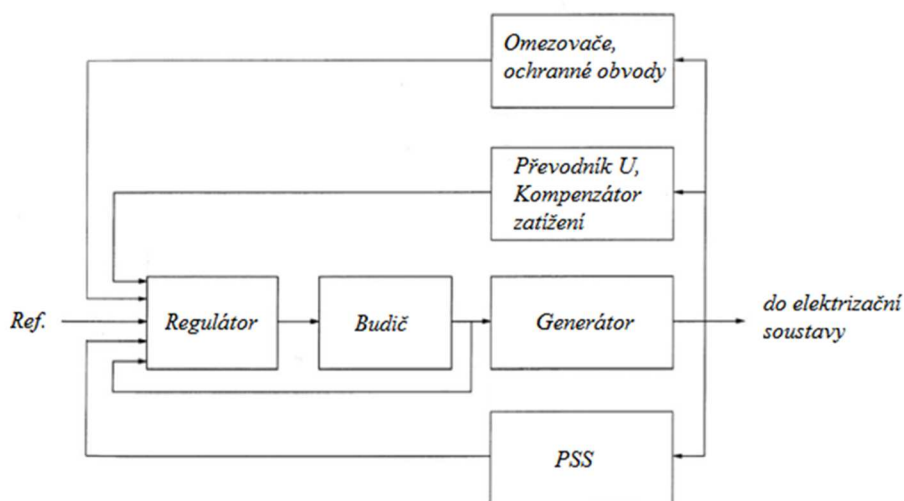
## 2.2 Budicí systém a automatický regulátor napětí (AVR)

Budicí soustava synchronního generátoru sestává z budiče a automatického regulátoru napětí, která napájí budicí vinutí stejnosměrným proudem, čímž vyvolá magnetické pole rotoru.

Podle ČSN 35 0255 a ČSN 35 0000-1-1 jsou kladeny na budicí soustavy vysoké požadavky vyplývající z normálních provozních stavů stroje včetně poruchových a přechodných dějů v elektrizační soustavě:

- Vysoká provozní spolehlivost – musí být vyšší než spolehlivost generátoru, aby vznikající poruchy v budicích soustavách neomezovaly provoz generátoru a celého elektrárenského bloku.
- Plynulá a rozsáhlá regulace budicího proudu a napětí v požadovaných mezích.
- Rychlost změny budicího napětí generátoru – rychlost budicího napětí je charakterizována odezvou budiče naprázdno jako střední rychlost změny poměrného napětí budiče za prvních 0,5 s od začátku nárazového buzení. Rychlost změny budicího napětí se pohybuje v rozsahu od 0,5 do 2 s.
- Dostatečná rychlost odbuzení alternátoru – odbuzení generátoru musí být co nejkratší. Tím se omezuje případný rozsah škod ve stroji při vnitřních zkratech na minimum.
- Udržování žádané velikosti svorkového napětí generátoru a dodávky jalového výkonu pro spolehlivý chod vlastní spotřeby celého bloku.
- Dovolena oteplení – pro dodržení teplotní odolnosti v provozních a poruchových stavech.

Obrázek 2-13 znázorňuje funkční blokové schéma typického systému řízení budicího systému.



Obr. 2-13 Blokové schéma systému řízení buzení [8].

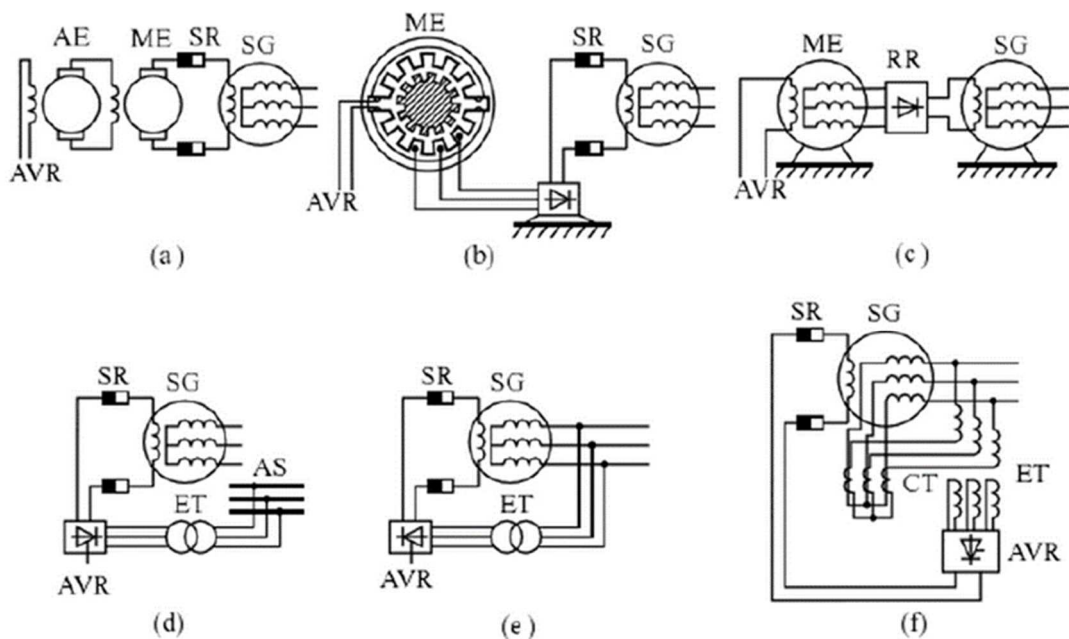
*Regulátor* zesiluje a zpracovává vstupní řídicí signál na úroveň a tvar vhodný pro řízení a stabilizaci budicího systému (pro rychlost zpětné vazby nebo pro derivačně integrační kompenzátor).

*Svorky převodníku U a kompenzátor zatížení* slouží pro usměrnění a filtraci do stejnosměrné úrovně a porovnání se vstupní požadovanou referenční hodnotou napětí. Takže poskytuje kompenzaci zátěže pro udržení konstantního napětí.

PSS je přidáný vstupní signál pro regulátory utlumení systémových oscilací (úhlové zrychlení, odchylka frekvence, odchylka rychlosti rotoru od zadané hodnoty).

Omezovače a ochranné obvody (omezovač budicího proudu, omezovač svorkového napětí, ochranný regulátor –  $U-f$  a omezovač podbuzení) zajišťují řadu kontrolních a ochranných funkcí pro zajištění kapacitních limitů budiče a synchronního generátoru tak, aby nebyly překročeny.

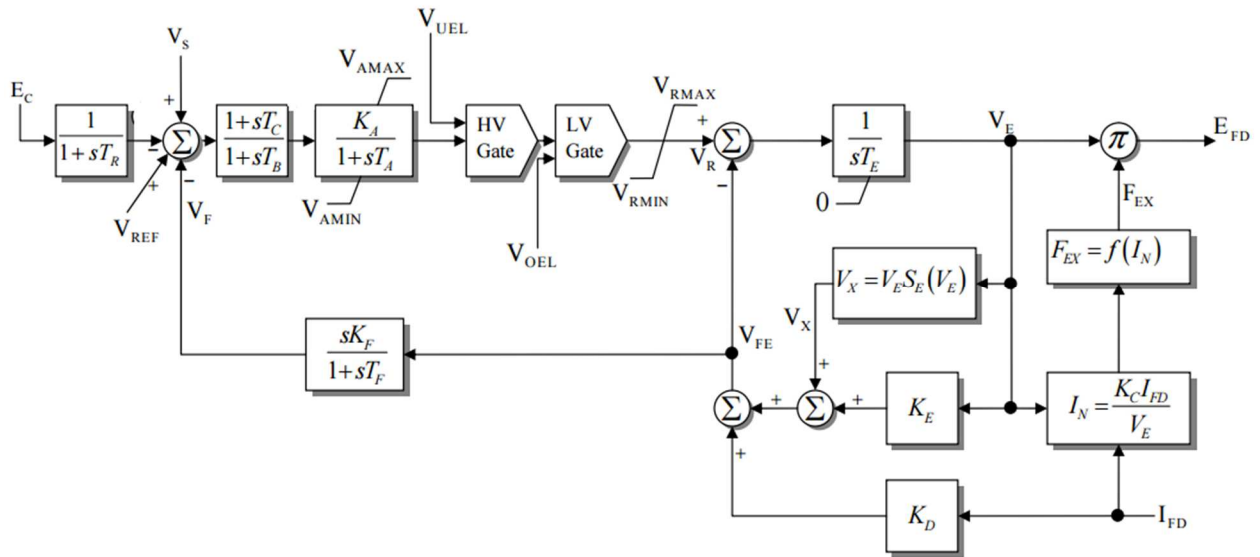
Dle Machowského et al. [4] se budiče klasifikují do dvou kategorií: *rotační a statické* budicí systémy. Obrázek 2-14 zobrazuje některé typické systémy. U rotačních budičů podle obr. 2-14 (a-c) je excitační proud dodáván buď stejnosměrným generátorem, nebo střídavým generátorem s usměrňovači. Některé alternativní budicí systémy používající statické tyristorové měniče jsou zobrazeny na obrázku 2-14 (d-f). U těchto budičů jsou tyristorové usměrňovače řízeny přímo regulátorem napětí. Hlavní rozdíly mezi systémy jsou v typu použitého zdroje [4].



Obr. 2-14 Typické budicí systémy: (a) stejnosměrné budicí systémy; (b) střídavý budicí systém se statickými usměrňovači; (c) střídavý budicí systém s rotačními usměrňovači; (d) napěťový zdroj s řízenými usměrňovači; (e) řízený usměrňovač přiváděný ze svorek generátoru; (f) řízený usměrňovač napájený napětím a proudem generátoru. SG – synchronní generátor; SR – kroužky; ME – hlavní budič; AE – pomocný budič; RR – rotační usměrňovač; ET – excitační transformátor; CT – proudový transformátor; AVR – automatický regulátor napětí [4].

### 2.2.1 Budicí systém AC1A IEEE

Budič v tomto systému tvoří pomocný synchronní generátor napájený neřízeným (diodovým) usměrňovačem. Regulátor buzení ovládá tyristorový můstek, který napájí budicí vinutí pomocného generátoru. Přenos tohoto můstku se modeluje bez zpoždění a zesílení je zahrnuto v zesílení regulátoru buzení. Schéma je na obrázku 2-15.

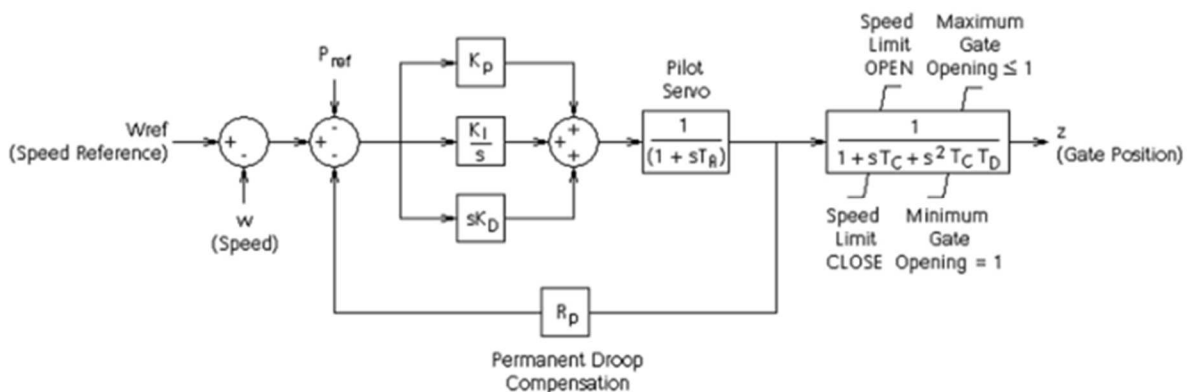


Obr. 2-15 Budící systém ACIA IEEE [9].

## 2.3 Regulace turbíny

Řídicí systém turbíny je součástí systému napájení, který řídí vstup do turbíny, aby bylo možné řídit otáčky generátoru a tím i reakci činného výkonu na změny zatížení. Vodní turbína se reguluje změnou průtoku vody  $Q$  vstupujícího do oběžného kola: regulační jehlou u Peltonových turbín; regulační clonou u Bánkiho turbín, natáčením lopatek rozváděče u Francisových turbín a současným natáčením lopatek rozváděče a oběžného kola u Kaplanových turbín. Součástí regulace vodní turbíny je také zařízení pro omezení poklesu spádu a pro omezení vodního rázu při náhlém uzavření rozváděče [13].

Jestli by turbína pracovala úplně bez regulace, vznikl by při změně zatížení přebytek nebo nedostatek výkonu. Důsledkem toho by bylo zvýšení nebo snížení provozních otáček turbíny až na hodnotu, při které by byla stále rovnováha mezi vstupním a výstupním výkonem turbíny. Při změně zatížení se otáčky turbíny příliš nemění a zůstávají v předepsaných hranicích [13]. Blokové schéma standardního řídicího systému hydraulické turbíny je uvedeno na obrázku 2-16.



Obr. 2-16 Blokové schéma řídicího systému hydraulické turbíny: pilot valve servomotor time constant – časová konstanta servomotoru řídicího ventilu, speed limit open/close – omezení rychlosti otevření/zavření, maximum/minimum gate opening – otevírání brány, gate servomotor – závěrky servomotoru, gate position – pozice brány [9].

Hlavní rozdíl mezi řídicím systémem vodní turbíny a řídicím systémem plynové nebo parní turbíny spočívá v tom, že je nutná vyšší síla k pohybu řídicího kola, protože tlak vody a třecí síly jsou vyšší. K zajištění této síly se používají dva servomotory, jak je znázorněno na obrázku 2-16.

### 2.3.1 Regulace jalového výkonu

Víme, že jalový výkon je ve fyzikální vazbě s napětím a činný výkon s frekvencí. Závislost mezi napětím v daném uzlu soustavy a změnou jalového výkonu v jiném uzlu soustavy, způsobenou např. změnou jalového výkonu synchronního generátoru, lze vyjádřit následujícím vztahem [11]:

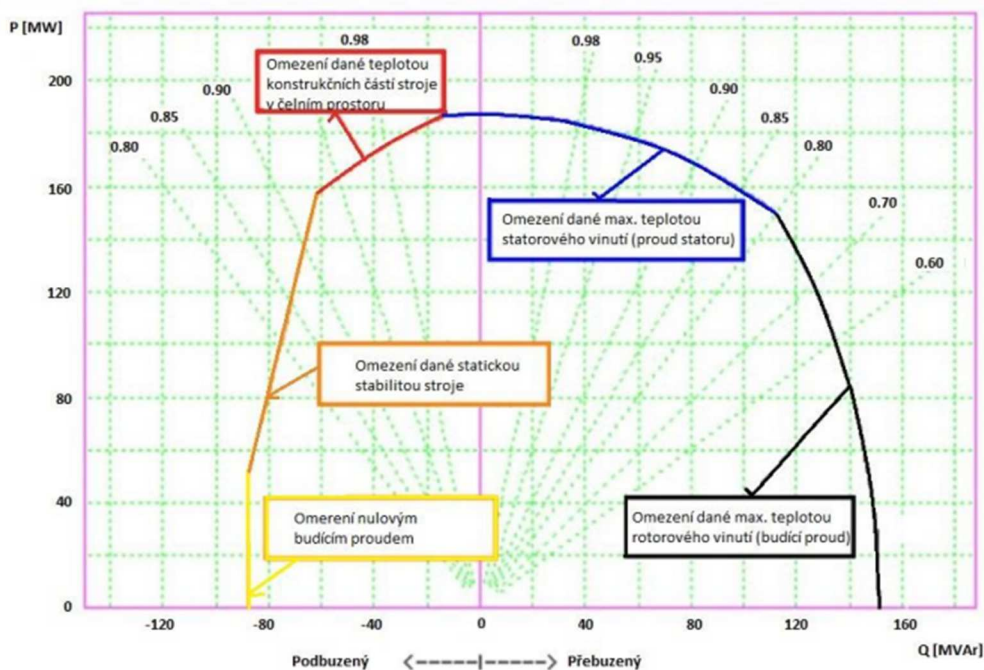
$$\Delta U_i = a_{ij} \Delta Q_j \quad (2.29)$$

, kde  $\Delta U_i$  – změna napětí v uzlu,  $a_{ij}$  – koeficient citlivosti změny napětí v uzlu  $i$  na změnu jalového výkonu v uzlu  $j$ ,  $\Delta Q_j$  – změna jalového výkonu v uzlu  $j$ .

Z rovnice 2.30 vyplývá, že k dosažení požadované změny napětí v jakémkoliv uzlu sledované soustavy, je potřeba provést změnu dodávky jalového výkonu, např. provedením změny prostředků připojenými do tohoto uzlu. Velikosti změny napětí závisí vedle velikosti změny dodávky jalového výkonu také na aktuální hodnotě citlivostní konstanty mezi těmito dvěma uzly soustavy. Tento koeficient je dán topologií soustavy ve sledovaném okamžiku. Zvýšením dodávky jalového výkonu do soustavy se vyvolá zvýšení napětí, a naopak jeho snížení vyvolá snížení napětí. [11]

Velikost rezervy jalového výkonu generátoru je dána provozním diagramem synchronního stroje s akceptováním všech technických a organizačních omezení. Provozní diagram je charakterizován:

- omezením maximálním budícím proudem – černá výseč kružnice při induktivní zátěži,
- omezením maximálním proudem statoru – modrá výseč kružnice při induktivní zátěži,
- omezením magnetickým polem v čelním prostoru – červená křivka při kapacitní zátěži,
- omezením statickou stabilitou stroje – oranžová křivka při kapacitní zátěži [11].



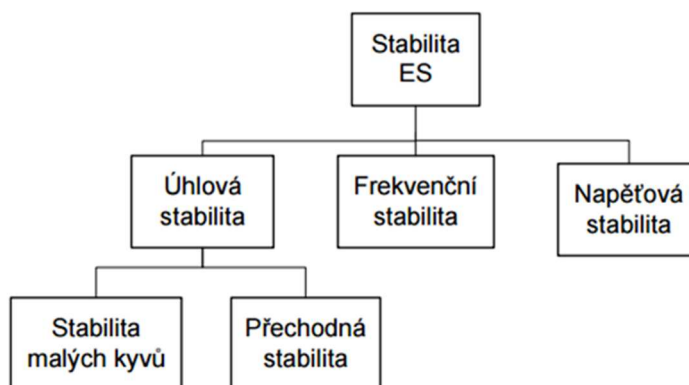
Obr. 2-17 Provozní diagram [11]



### 3 STABILITA ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVY

Stabilita elektrizační soustavy je definována jako schopnost soustavy udržet rovnovážný stav během normálního provozu i po přechodných dějích způsobených vnějšími vlivy, dispečerským řízením i poruchovými výpadky zařízení a jinými rozruchy. Základní otázkou stability je schopnost generátoru udržet se v synchronním provozu s elektrizační soustavou [12].

Jelikož elektrické systémy jsou nelineární, jejich stabilita závisí jak na počátečních podmínkách, tak i na typu poruchy (výpadky vedení, zkrat, výpadky ve výrobě a zátěže). Obrázek 3-1 ukazuje základní členění stability elektrizační soustavy, kde jsou tři hlavní kategorie: úhlová stabilita, frekvenční stabilita a napěťová stabilita [4].



Obr. 3-1 Zjednodušené rozdělení stability ES [12].

Úhlová stabilita souvisí s pohybem rotorů synchronních strojů, které se nejvíce používají jako zdroje pro výrobu elektřiny. Vztahuje se tedy na schopnost synchronních strojů zůstat v synchronním provozu se zbytkem propojené soustavy po nějakém rozruchu. Tato schopnost souvisí se schopností udržet rovnováhu mezi elektrickým momentem generátoru a mechanickým momentem poháněcího stroje, kterým bývá nejčastěji turbína. Úhlová stabilita se tedy týká elektromechanických přechodných dějů. Je ovlivněna zkratovým výkonem soustavy a parametry generátorů. Nalezení ustáleného stavu po poruše ovlivňuje buzení generátorů a regulace turbíny [12].

Úhlová stabilita se dělí na:

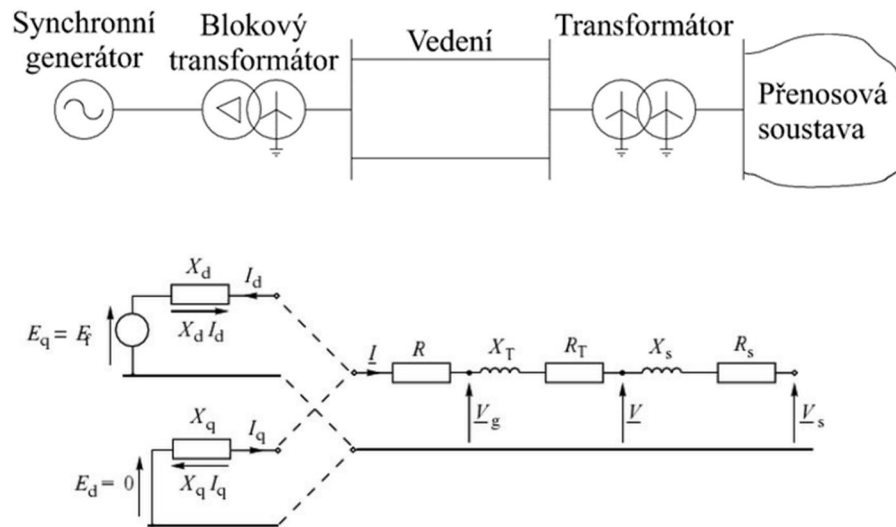
- stabilitu malých kyvů – řešením je soustava lineárních diferenciálních rovnic.
- přechodnou stabilitu (transient stability) – nelineární soustava nemá analytické řešení.

V obou případech se jedná o krátkodobé děje, které se za normálních podmínek stačí vyřešit do 10 sekund [12].

Napěťová a frekvenční stabilita souvisí se schopností soustavy udržet rovnováhu činných a jalových výkonů, a tudíž i stabilní frekvenci a napětí po rozruchu z daného výchozího stavu [12].

#### 3.1 Úhlová stabilita

Rozdíl mezi dynamickou a statickou stabilitou úhlu rotoru synchronního generátoru spočívá ve velikosti změn, které nastávají v soustavě, do které synchronní generátor pracuje. Pokud se jedná o menší změny s pozvolným průběhem, vyhodnocování stability je založeno na statické stabilitě. Naopak při velkých a náhlých změnách, jako jsou například zkrat, spínací procesy atd., se bude vyhodnocovat dynamická stabilita zdroje [12].

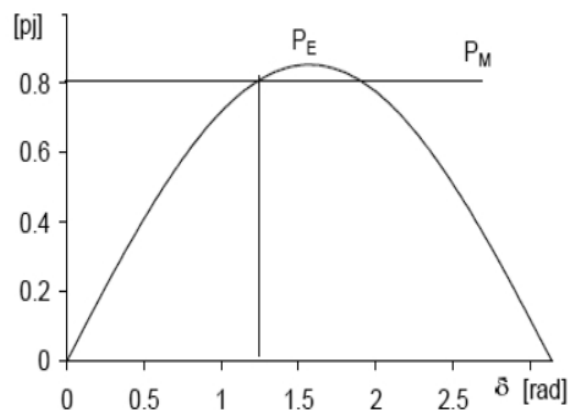


Obr. 3-2 a) Schéma soustavy, b) náhradní schéma soustavy [12].

Synchronní generátor poháněný vodní turbínou dodává elektrický výkon  $P_E$  přes dvojité vedení o reaktanci  $X$  (součet synchronní reaktance generátoru, reaktance transformátoru, reaktance vedení) do tvrdé sítě charakterizované konstantním napětím  $U_S$ . Ve výchozím stavu je elektrický výkon  $P_E$  roven mechanickému výkonu turbíny  $P_M$  (při zanedbávání mechanických a elektrických ztrát). Pro přenášený činný výkon vyráběný synchronním generátorem do sítě platí vztah z kapitoly 2.1.8:

$$P = \frac{E_q U}{X} \sin \delta \quad (3.1)$$

Z výkonové charakteristiky vyplývá (kapitola 2.1.8), že pokud je vedení mezi alternátorem a soustavou dlouhé, tak je amplituda v porovnání s velikostí  $P_M$  malá. Na obr. 3.3 je pak znázorněn průsečík, který určuje pracovní stabilní bod.



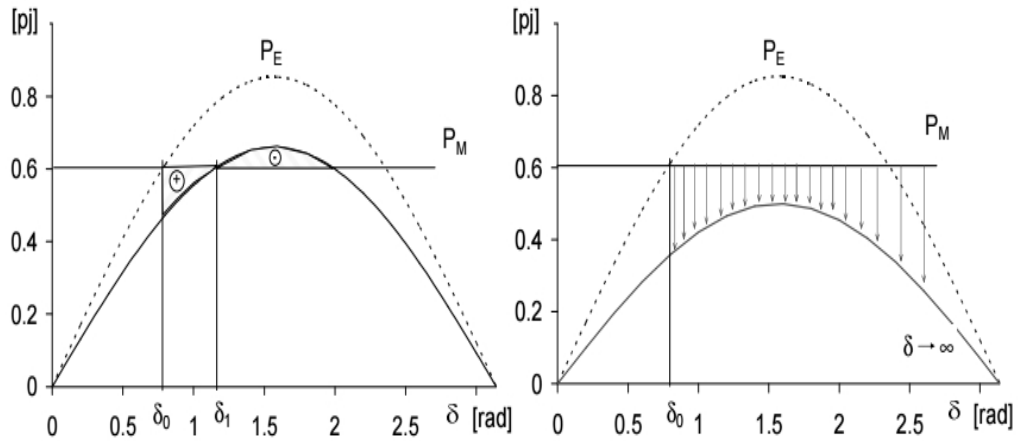
Obr. 3-3 Výkonová charakteristika synchronního generátoru [12].

V případě změny zatížení nebo výpadku jednoho z paralelních vedení, bude poměr reaktancí vedení k synchronní reaktanci dostatečně malý a nastane stabilní přechodný děj (obr. 3-4). Původní charakteristika se skokem změní na novou, která je zde znázorněna plnou čarou. Zátěžný úhel  $\delta$  se začne měnit podle diferenciální pohybové rovnice:



$$\frac{T_M}{\omega_{MS}} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_M - M_E \approx P_M - P_E \quad (3.2)$$

, kde  $T_M$  – mechanická časová konstanta, která je vypočtená z momentu setrvačnosti soustrojí a  $\omega_{MS}$  – synchronní úhlová rychlost.



Obr. 3-4 a) Stabilní přechod b) Nestabilní přechod [12].

Akcelerační výkon na pravé straně rovnice je určen rozdílem přímky mechanického výkonu a sinusového průběhu elektrického výkonu. Po vypnutí jednoho z vedení bude elektrický výkon  $P_E$  menší než mechanický výkon  $P_M$ , což znamená, že zátěžný úhel  $\delta$  se začne zvětšovat (rotor stroje se bude urychlovat). V bodě  $\delta_1$  se výkony srovnají, ale rotor se stále točí. Plocha označená znaménkem plus odpovídá kinetické energii, kterou rotor získal pohybem z polohy  $\delta_0$  do polohy  $\delta_1$ . Pokud je brzdící plocha, označená znaménkem minus, větší nebo rovna akcelerační ploše, rotor se zpomalí, a nakonec se ustálí v nové rovnovážné poloze  $\delta_1$ . V opačném případě, kdy je brzdící plocha menší než akcelerační, se rotor zrychluje a zátěžný úhel  $\delta$  se bude dále zvětšovat a stroj ztratí stabilitu.

### 3.1.1 Vliv regulace buzení nebo regulace turbíny na stabilitu

Činitelem ovlivňujícím průběhy elektromechanických přechodných dějů je například regulátor buzení synchronních strojů nebo regulátor turbíny. V případě dějů kratších než 1 sekunda se působení regulátoru turbíny zpravidla zanedbává [4]. Přenosová soustava je kompaktní celek vykazující vysoký stupeň statické stability. K narušení meze statické stability dojde až v případě přenosu výkonů, které překračují přenosové schopnosti jednotlivých přenosových profilů nebo ve výjimečných poruchových stavech. Proti ztrátě synchronismu chrání vypínací funkce distančních ochranných na vedeních a transformátorech, které rozpoznají nebezpečí narušení statické stability. Generátory o výkonu větším než 200 MVA jsou vybaveny ochranou proti ztrátě stability [12].

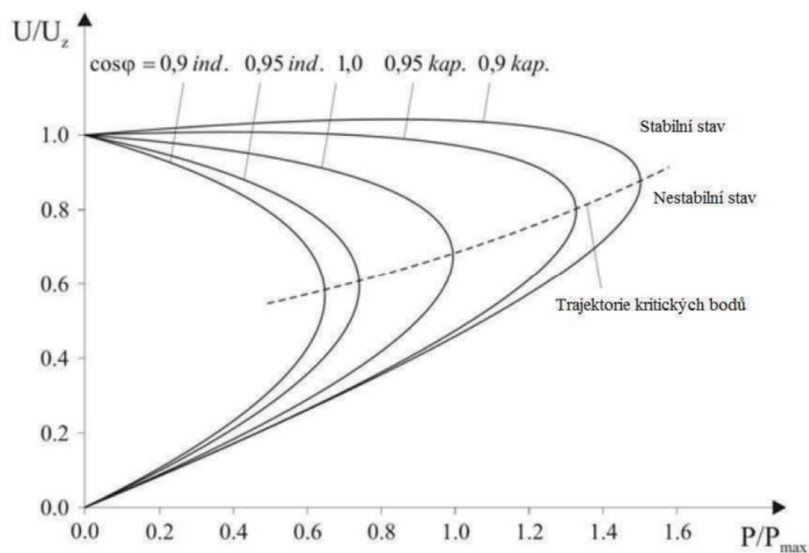
### 3.2 Frekvenční stabilita

Frekvenční stabilita závisí na schopnosti udržení rovnováhy mezi činnými výkony zdrojů a spotřebičů. K této nerovnováze dojde při změně spotřeby nebo při změně dodávaného výkonu, např. výpadek zdroje. Frekvenční stabilita je schopnost zdroje udržet otáčky nebo frekvenci blízké k jmenovité hodnotě. Porucha se projeví na generátorech rozdělením rázu činného výkonu [6]. Frekvenční stabilita je ovlivněna regulačním rozsahem stroje a setrvačností. Nalezení ustáleného bodu po poruše ovlivňuje regulace turbíny a odezva zátěže na odchylky frekvence [7].

### 3.3 Napěťová stabilita

Napěťová stabilita se soustřeďuje na udržení stabilní hodnoty napětí, kterou je potřeba udržet v soustavě během běžného provozu a po odeznění přechodného děje. Vznik tohoto druhu nestability je důsledkem převážně změny konfigurace v elektrizační soustavě, zvýšení zatížení nebo výskytu poruchy.

Pro zajištění napěťové stability je potřeba znát její závislost na parametrech soustavy. Při zjednodušujícím předpokladu, který zanedbává činný odpor přenosové soustavy, je tato stabilita určena napětím zdroje, reaktancí přenosové soustavy a přenášeným činným a jalovým výkonem. Pokud velikost přenášené jalové složky výkonu sítě je zanedbatelná (kompenzace na účinník  $\cos\varphi = 0,95$ ), můžeme pro danou reaktanci vedení určit maximální možný přenášený výkon, bez narušení napěťové stability. Respektive pro daný výkon existuje maximální reaktance (délka) vedení. Pokud ze strany zátěže není dodržen účinník na hodnotě 0,95, musíme uvažovat i jalovou složkou výkonu. Na obr. 3-5 je ukázáno, jaký vliv má účinník zátěže na polohu kritického bodu v  $PU$  charakteristice. Tedy bodu, který vymezuje mez napěťové stability pro danou zátěž.  $PU$  charakteristika zobrazuje závislost napětí v uzlu zátěže na odebíraném činném výkonu zatížení [12][4].

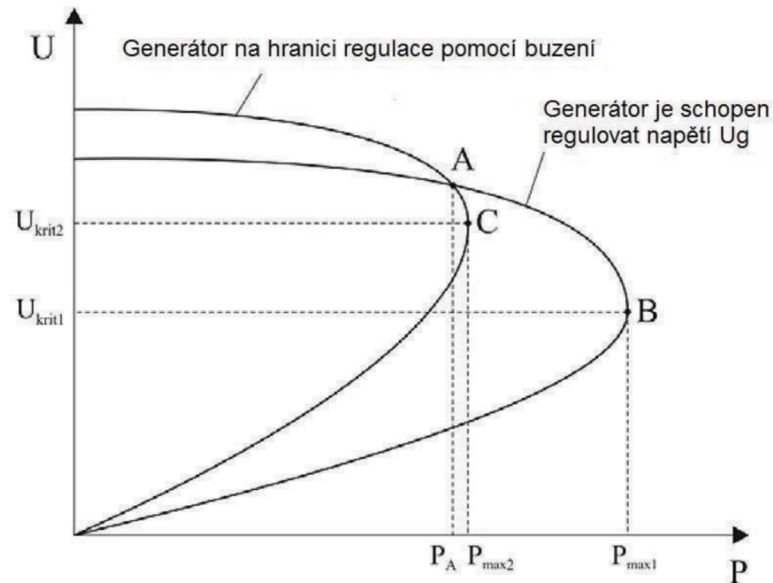


Obr. 3-5  $PU$  charakteristika při různých hodnotách účinníku  $\cos\varphi$  [12].

#### 3.3.1 Regulátory buzení generátoru

Regulátory buzení generátoru reagují na změny napětí v soustavě. Řízení napětí na svorkách generátoru buzením má své limity. Ohrožení napěťové stability v elektrizační soustavě nastává tehdy, kdy se regulace buzením dostane do svého hraničního bodu.

Na obr. 3-6 je zobrazena  $PU$  charakteristika vlivu dosažení limitu regulace napětí buzení generátoru na napěťovou stabilitu. Mezi pracovním bodem A a bodem hranice nestability B je dostatečná rezerva, takže se dá usoudit, že daný stav z hlediska napěťové stability je stabilní. V jiném případě se rezerva mezi pracovním bodem A a hraničním bodem C se zmenšila. Oba stavy jsou napěťově stabilní, ale v druhém případě by mohlo dojít k nestabilitě při další změně v elektrizační soustavě. Proto je důležité při posuzování stability brát ohled na aktuální hodnotu napětí a na rozsah rezervy, v které se dá regulovat napětí [8][12].



Obr. 3-6 PU charakteristika vlivu dosažení limitu regulace napětí buzení generátoru na napěťovou stabilitu [12].

### 3.3.2 Zátěž

Charakter zatížení je klíčovým prvkem soustavy, který má velký vliv na napěťovou stabilitu celé soustavy. Pokud známe typ zátěže v soustavě, můžeme přesně vytvořit model celé sítě. Problém nastává v momentě, kdy se charakter zatížení se mění se změnou napětí v soustavě. V tomto případě musíme zohlednit i prvky, které regulují velikost napětí v síti, jako například transformátory s automatickým přepínáním odboček pro regulace napětí. U transformátoru to je přepnutí na poslední odbočku. V tomto okamžiku, už není zajištěna regulace a napětí na distribuční straně může dále klesat. Proto v modelu elektrizační soustavy musíme i tyto prvky zohledňovat [12].

## 4 SIMULAČNÍ MODEL V PSCAD

PSCAD (Power System Computer Aided Design) na osnově simulačního jádra EMTDC (Electromagnetic Transients including DC) je jedním z nejrychlejších a nejpřesnějších simulátorů elektrizačních soustav od Kanadské firmy Manitoba HVDC Research Centre. Integrovaný program slouží pro návrhy kompletních modelů, spuštění simulace, analýzy a zpracovávání dat a výsledků. Velkou výhodou tohoto softwaru je možnost nastavení parametrů během simulace, což umožňuje pozorovat, jaké změny probíhají v daném modelu.

### 4.1 Popis modelu

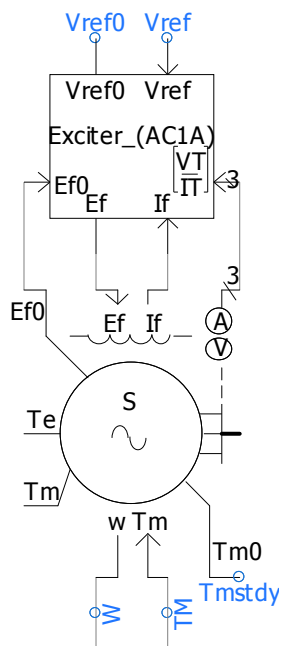
Simulační testovací systém je zjednodušený model synchronního generátoru paralelně pracující se sítí, viz příloha 1. Celý model je navržen podle naměřených údajů malé vodní elektrárny Soběnov a pak následně porovnán s výsledky měření.

Celkový prototyp vodní elektrárny se skládá ze synchronního generátoru se jmenovitým výkonem  $770 \text{ kVA}$ , turbínou s nominálními otáčkami  $1000 \text{ min}^{-1}$ , budičem a automatickým regulátorem napětí, sloužícím pro fázování generátoru. Topologie celkové sítě, na kterou je připojena elektrárna, je uvedena v příloze 1 této diplomové práce. Všechny základní charakteristiky nastavení simulovaných zdrojů, např. převodového transformátoru  $6,3 \text{ kV} / 22 \text{ kV}$  sloužící k transformaci napětí generátoru a přenosu výkonu stroji do rozvodného systému  $22 \text{ kV} / 110 \text{ kV}$  jsou v příloze 4.

#### 4.1.1 Synchronní stroj

Technický referenční dokument synchronních strojů [9] poskytuje podrobný popis zatěžovací a přechodové analýzy v prostředí PSCAD a popisuje všechny rovnice implementované z knihovny pro synchronní stroje.

Simulační schéma modelu synchronního stroje, který se používá v síťovém modelu, je uvedena na obr. 4-1. Údaje generátoru v síťovém modelu lze nalézt v tab. 4-1. Jednou ze součástí synchronního generátoru v tomto modelu je řízení budícího systému dvěma časovači LRR a S2M sloužícími pro rozběh motoru. První spouští rotor a druhý přepíná stroj z režimu tvrdého zdroje do dynamického stavu.



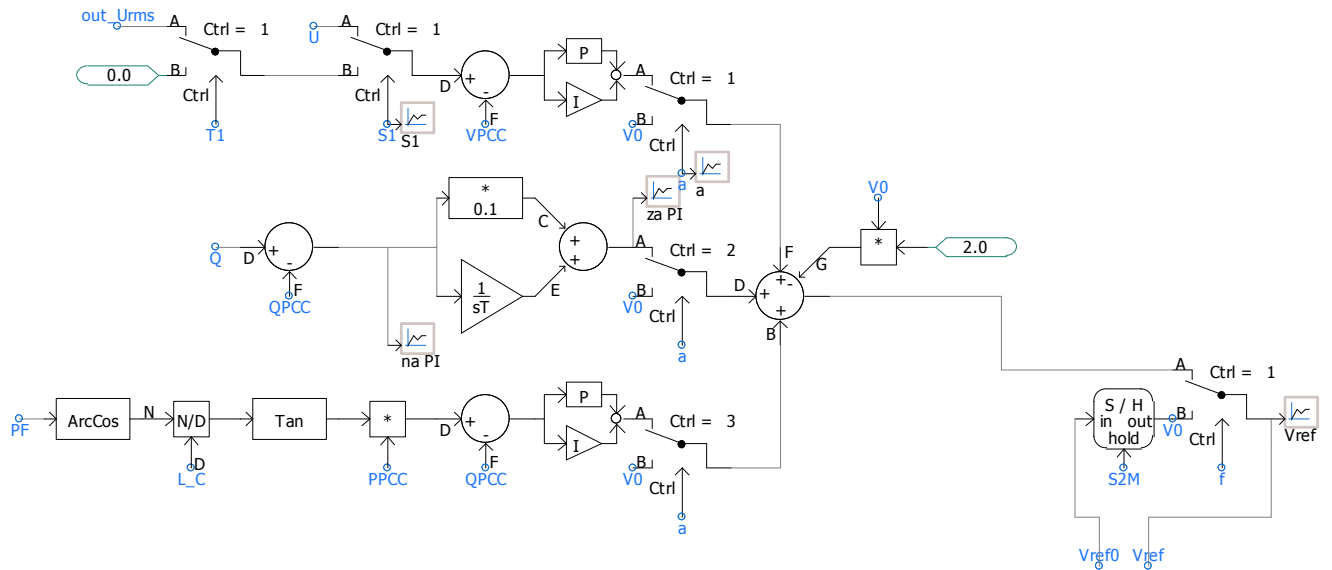
Obr. 4-1 Model synchronního stroje s budičem zpracovaný v PSCAD

Tab. 4-1 Nastavení parametrů generátoru

<i>Armature Resistance [Ra]</i>	<i>0.0051716 p.u.</i>
<i>Portier Reactance [Xp]</i>	<i>0.158 p.u.</i>
<i>Unsaturated Reactance [Xd]</i>	<i>1.53 p.u.</i>
<i>Unsaturated Transient Reactance [Xd']</i>	<i>0.280 p.u.</i>
<i>Unsaturated Transient Time (Open) [Tdo']</i>	<i>7.18 sec</i>
<i>Unsaturated Sub-Transient Reactance [Xd'']</i>	<i>0.187 p.u.</i>
<i>Unsaturated Sub-Transient Time (Open) [Tdo'']</i>	<i>2.7 sec</i>
<i>Unsaturated Reactance [Xq]</i>	<i>0.85 p.u.</i>
<i>Unsaturated Sub-Transient Reactance [Xq'']</i>	<i>0.187 p.u.</i>
<i>Unsaturated Sub-Transient Time (Open) [Tqo'']</i>	<i>0.3 sec</i>
<i>Air Gap Factor</i>	<i>1</i>

Model generátoru obsahuje automatický regulátor napětí ACA1 (budicí systém – usměrňovač s alternátorem) dle normy IEEE 421.5 pro buzení, viz obr. 4-2.



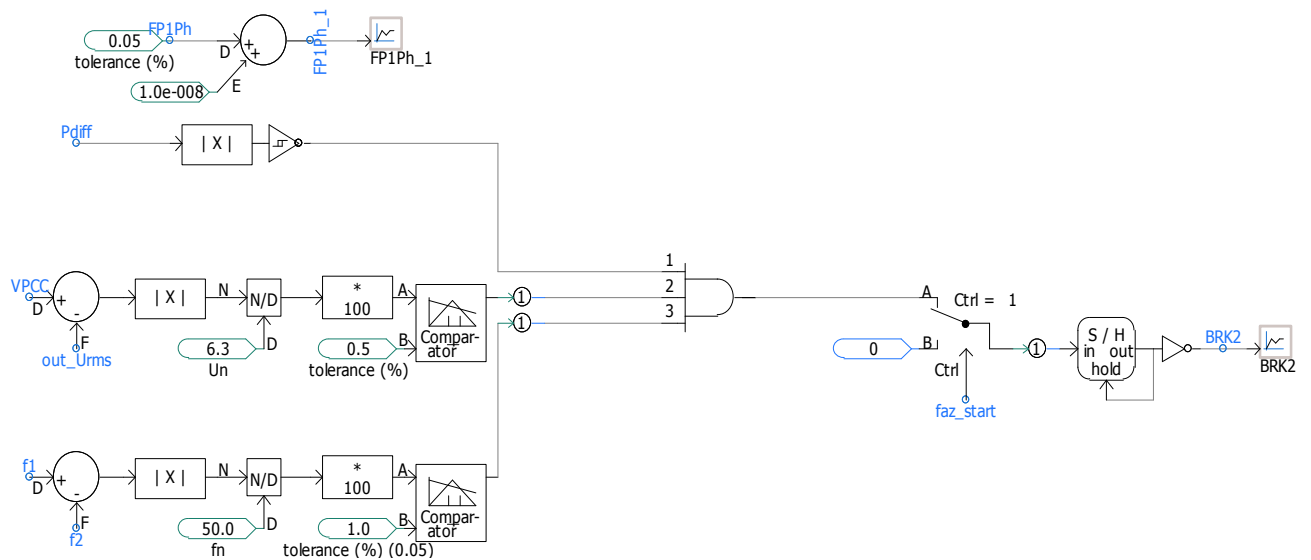


Obr. 4-4 Řídicí systém budícího systému

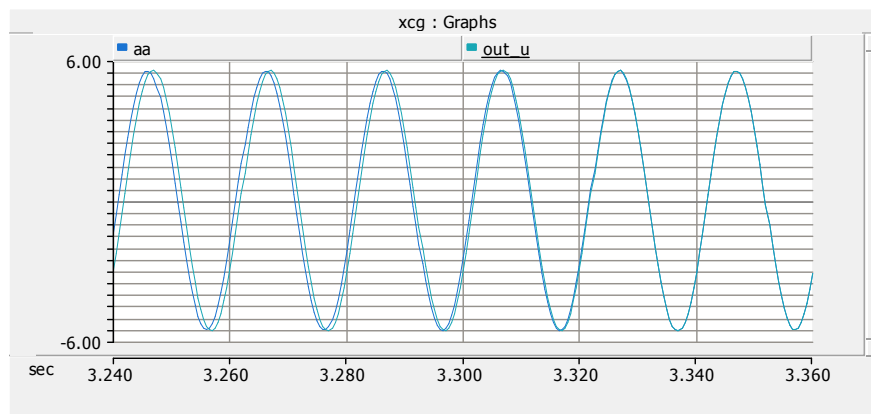
#### 4.1.4 Fázování

Pro zapojení synchronního generátoru do tvrdé sítě musíme zajistit a dodržet určité fázovací podmínky, aby v okamžiku připojení nebo přepojení nedošlo k proudovému rázu a k jinému elektromechanickému vyrovnávacímu pochodu, jak bylo popsáno v 2.1.9.

Navržená regulace těchto podmínek je zobrazena na obr. 4-5. Okamžik přifázování k síti je znázorněn na obr. 4-6.



Obr. 4-5 Logika splnění fázovacích podmínek



Obr. 4-6 Okamžik přifázování k síti (aa – RMS hodnota napětí generátoru, out-u – RMS hodnota napětí ze strany sítě).



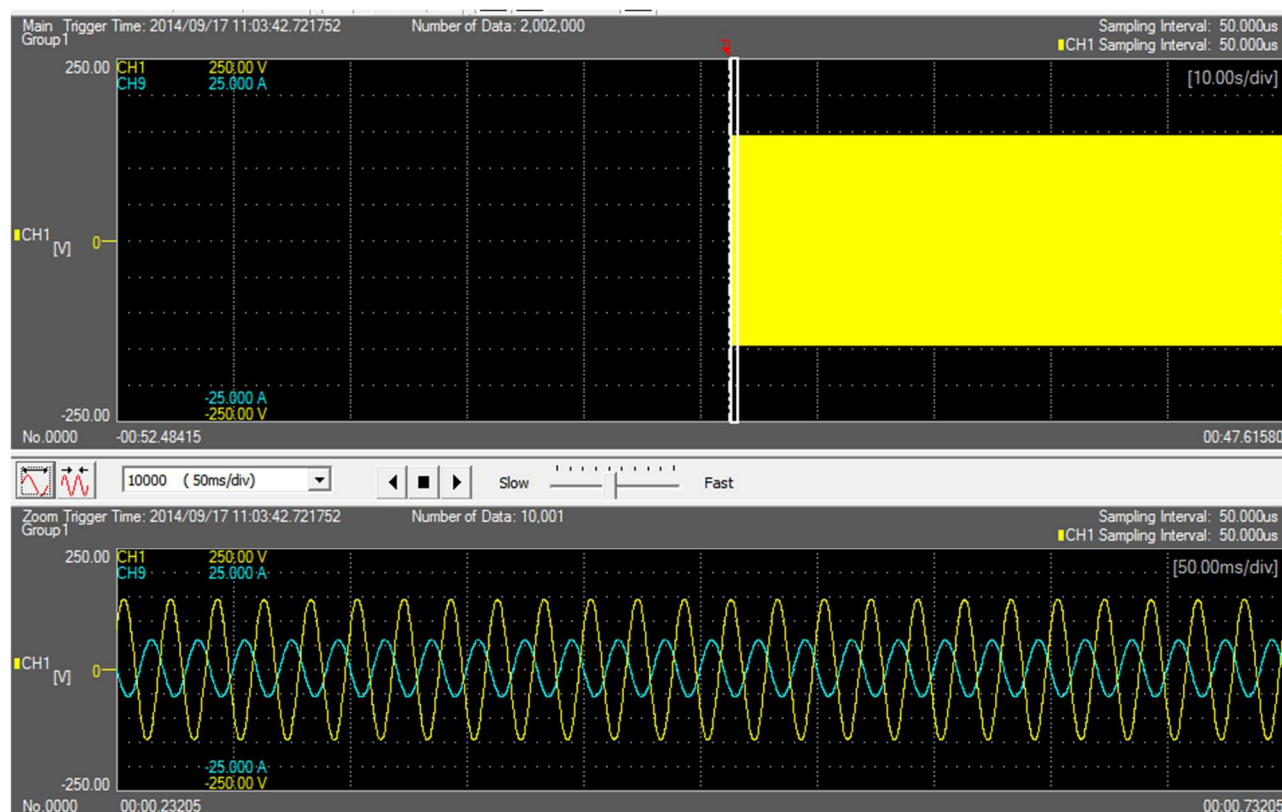
## 5 ZPRACOVÁNÍ DAT

### 5.1 Postup zpracování naměřených dat

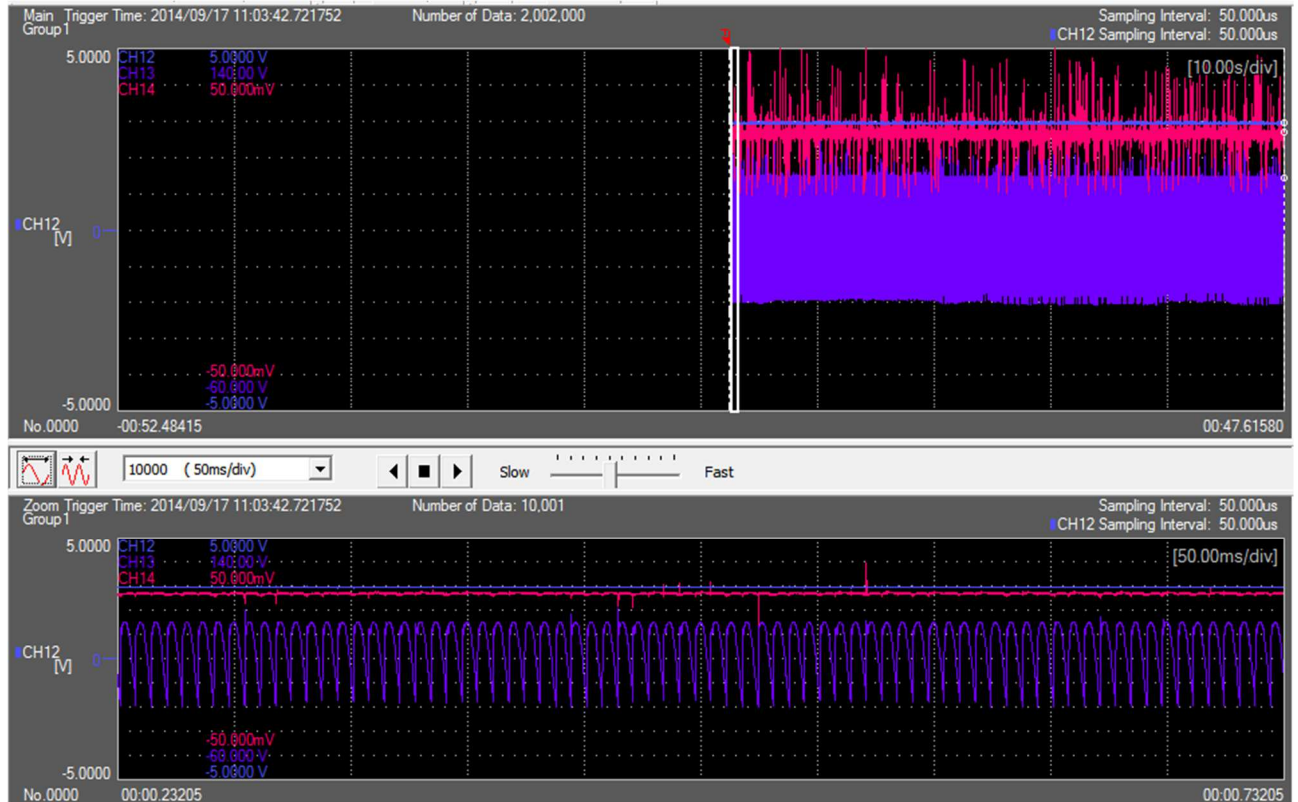
Měření různých stavů malé vodní elektrárny se provádělo osciloskopem firmy Yokogawa. Pro zpracování naměřených dat byly použity software Xviewer (701992) a Matlab R2016b pro přepočet, export a převod dat do formátu ASCII *file.csv*. Každé měření bylo zpracované stejným způsobem a stejnou logikou.

Jako příklad měření vybereme „Manipulace přepojení generátoru na konec vedení“, kde *CH1* a *CH9* odpovídají naměřeným hodnotám napětí a proudu jedné fáze (ostatní fáze jsou *CH2*, *CH10*, *CH3*, *CH11*). Kanály *CH12*, *CH13* a *CH14* odpovídají naměřeným hodnotám budicího napětí, budicího proudu a regulovaným otáčkám turbíny.

Na obr. 5-1 a obr. 5-2 jsou zobrazeny výsledky měření v prostředí Xviewer při manipulaci přepojení generátoru na konec vedení.



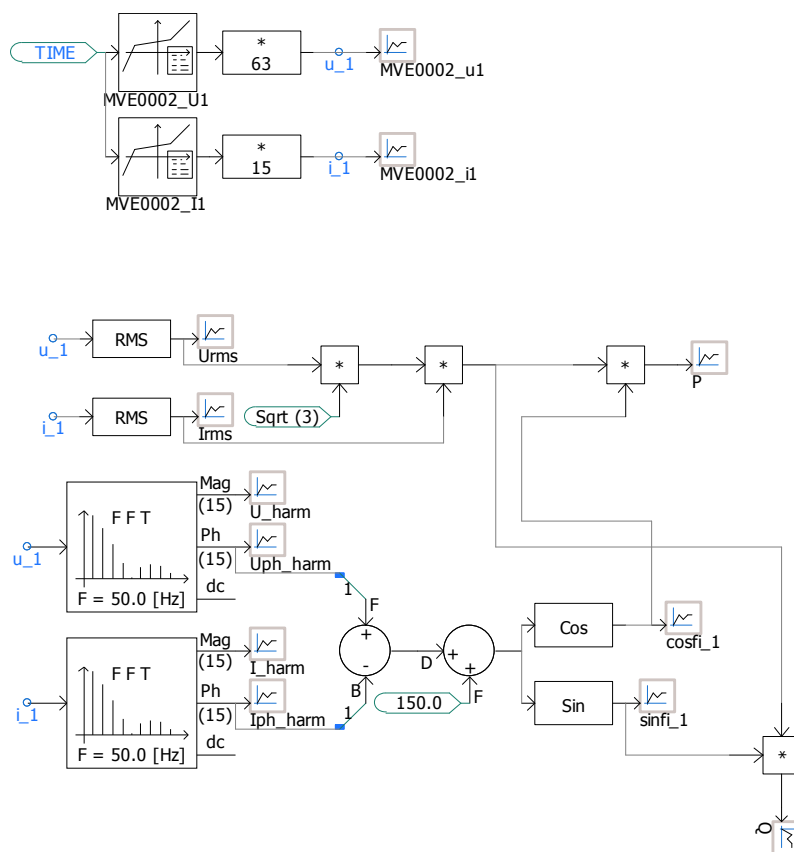
Obr. 5-1 Zobrazení *CH1* a *CH9* při přepnutí na konec vedení



Obr. 5-2 Zobrazení CH12, CH13 a CH14 při přepnutí na konec vedení

Dle importu naměřených dat z osciloskopu do pracovního prostředí PSCAD, bylo nutné převést a ohodnotit naměřená data v Matlabu. Kvůli tomuto pro každý vytvořeny *file.csv* byl napsán vlastní skript, viz. přílohu 2. Z hlediska velkého počtu hodnot pro každé měření, pomocí skriptu byla vybrána každá 10 hodnota odpovídající rozdílu času v 0.005 sec.

Po naimportování dat z měření do PSCADu se pro další použití dala tato data zpracovávat převedením přes Fourierovu transformaci. Tím se získaly určité naměřené RMS hodnoty a časy změn v simulaci. Příklad modelování Fourierovy transformace je uveden na obr. 5-3. Pro zpracování byly uvažovány převody výpočtu dle tab. 5-1.



Obr. 5-3 Fourierova transformace a získání RMS a referenčních hodnot jedné fáze při přepnutí na konec vedení

Celé zpracování pro každou fázi a každou z manipulací lze nalézt v .zip příloze této diplomové práce.

Tab. 5-1 Převody pro zpracování dat

<i>Napětí</i>	<i>6,3kV/0,1kV</i>
<i>Proud</i>	<i>75A/5A</i>
<i>Buzení</i>	<i>20mA/5V</i>
<i>Otáčky nominální</i>	<i>2,95V</i>

## 6 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A NASIMULOVANÝCH DAT

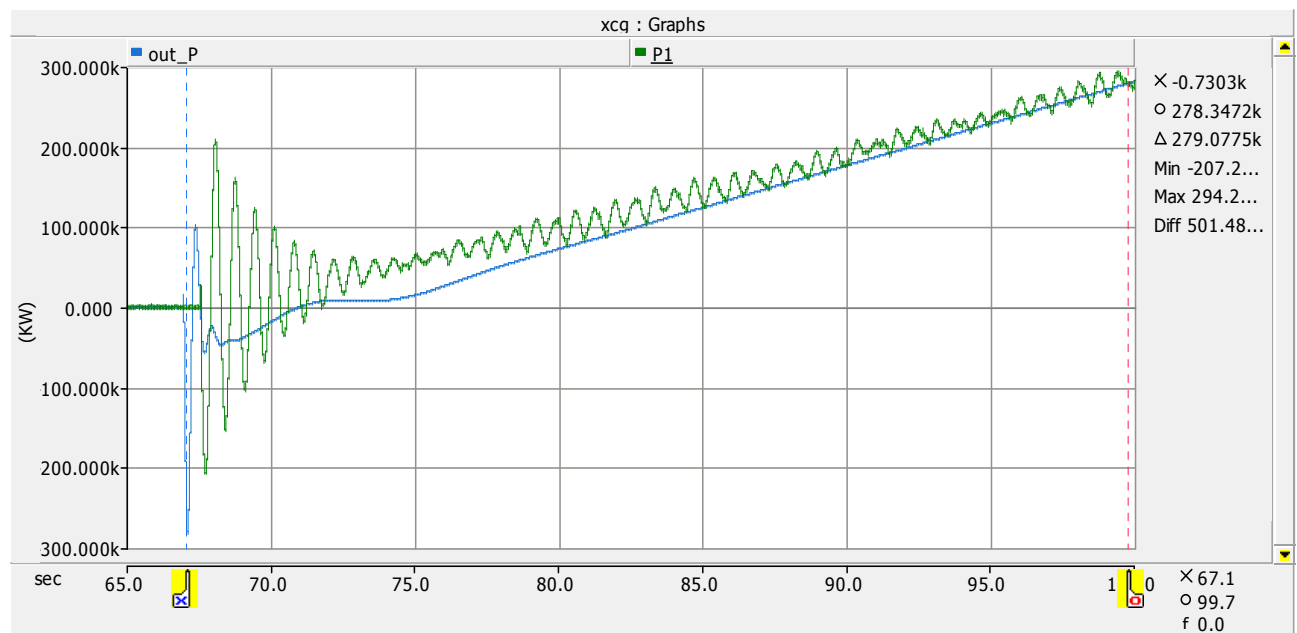
### 6.1 Provádění jednotlivých měření a porovnávání výsledků

Každý z experimentů této diplomové práce, popisuje různé stavy stability paralelního povelu zdroje se sítí. V této kapitole jsou uvedena jednotlivá měření, které tvoří základní podmínky stability elektrizační soustavy. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce v příloze 3 této práce.

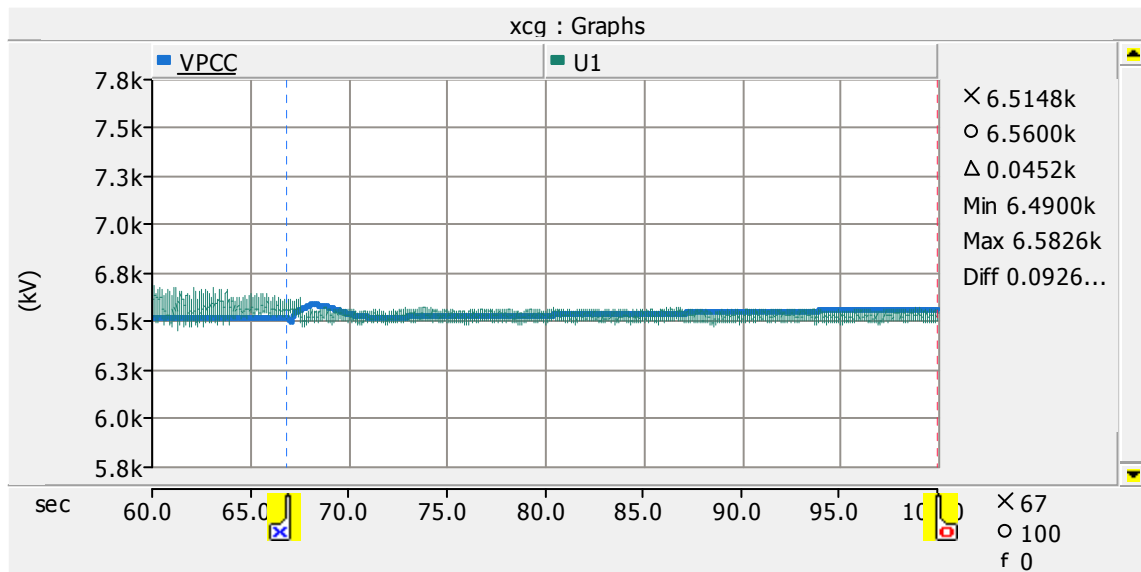
#### 6.1.1 Rozběh generátoru

Pro provádění simulace byla naladěna doporučená nastavení simulace: *duration of run – 100 sec*, *solution time step – 500uS*, *channel plot step – 500uS*. Za dodržení fázovacích podmínek, které jsou popsány v kapitole 2.1.9.

Během simulace rozběhu synchronního generátoru nastal ustálený stav v čase 67 sekund, což téměř odpovídá osciloskopem naměřenému času 66-68 sekund. Z grafů měření na obr. 6.1 a 6.2. jsou vidět poklesy napětí, což odpovídá skutečnému stavu přifázování generátoru na síť, která činí cca 6,5 kV. Dosazený výkon během simulace je cca 280 MW, které odpovídá času měření 100 sekund. Přepočítané a porovnané hodnoty jsou uvedeny v tabulce v příloze 3.



Obr. 6-1 Porovnané naměřené a nasimulované výkony, kde  $P1$  – naměřeny výkon,  $out\_P$  – nasimulovaný výstupní výkon



Obr. 6-2 Porovnané naměřené a nasimulované výstupní napětí, kde VPCC – nasimulované napětí, U1-naměřené napětí.

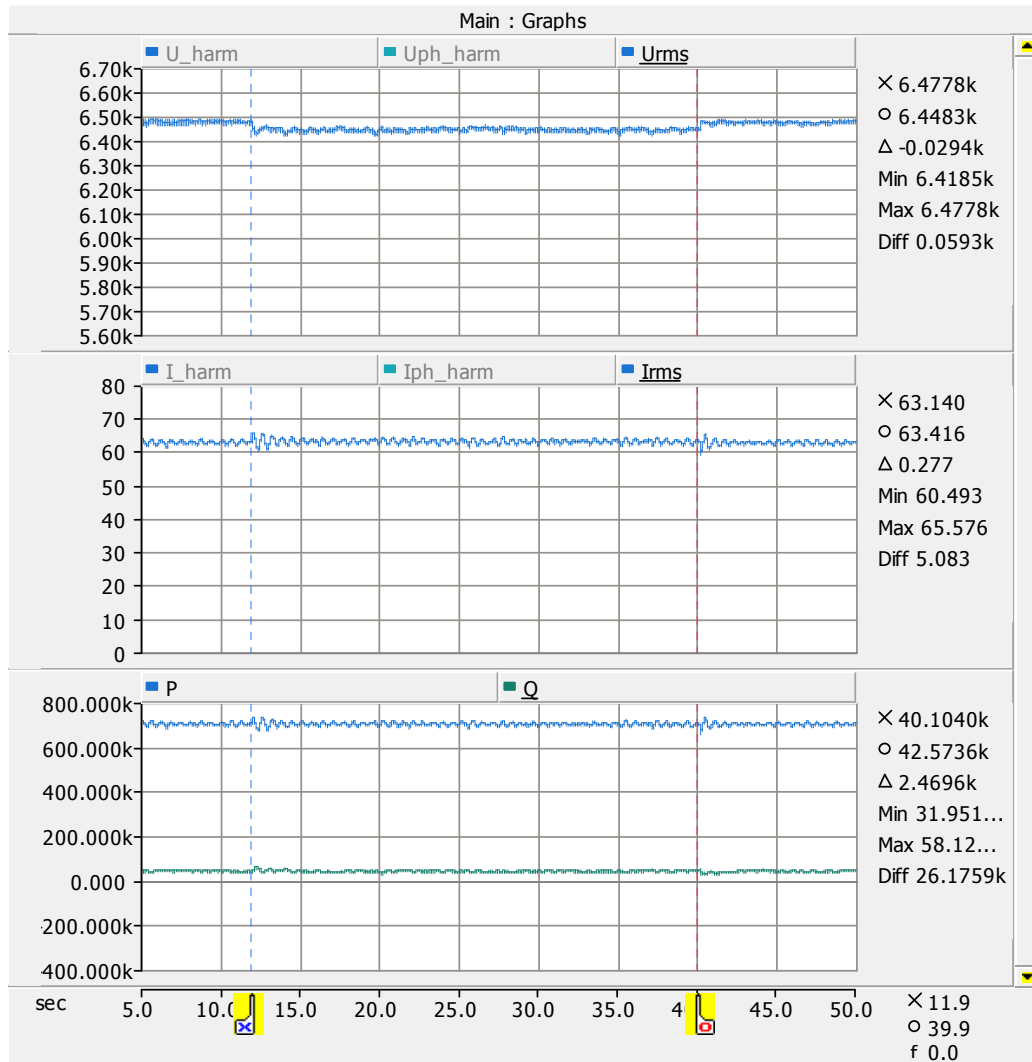
Lze vidět, že nastavení získaných parametrů do modelů víceméně vyhovuje skutečnému stavu. Simulace není úplně přesná kvůli odchylkám nastavení a nepřesnostem provádění spolehlivé PID regulace.

### 6.1.2 Změna zatížení sítě

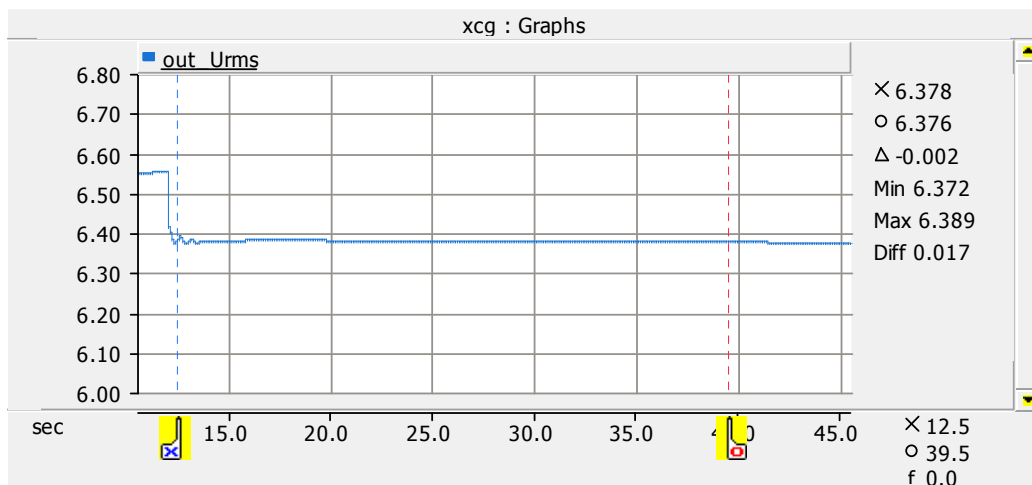
Na základě nastavení prvního měření byla prováděna změna zatížení sítě, které nastalo v časech od 12 sec do 40 sekund, celý experiment probíhal 74 sekund, viz obr. 6-3. V neregulované soustavě je změna zatížení spojena se změnou frekvence podle charakteristik zátěže.

Z grafů měření na obr. 6-4 se dá vidět, že napěťová hodnota při těchto změnách klesla jen o 0,03 kV, proud se změnil o 0,2 kA, výkonové – jenom o 2 kW nejvýše, což neumožňuje přesně nastavit simulovaný model tak, aby odpovídal skutečnosti měření dle grafů.

Na obr. 6-5 je zobrazena změna výstupního napětí o 0,002 kV generátoru v okamžiku přifázování na síť a rychlém přepínání spínačů v celkové topologii sítě viz. přílohu 3.

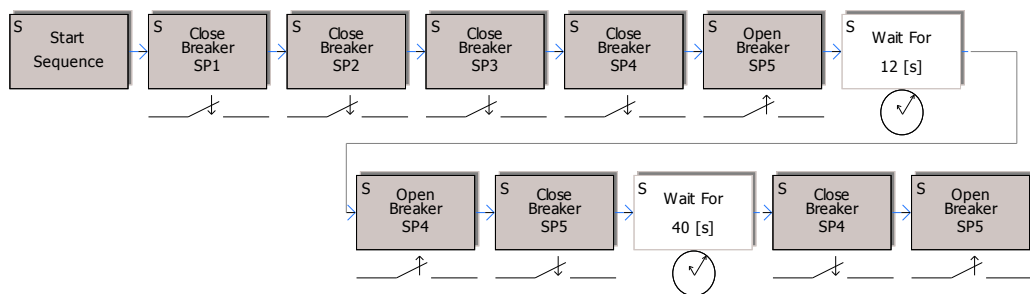


Obr. 6-3 Naměřené RMS hodnoty proudu a napětí, přepočítané hodnoty činného a jalového výkonu



Obr. 6-4 Změna výstupního napětí generátoru během simulace

Na obr. 6-5 je znázorněny sekvenční komponenty, které vytvářejí skupinu řízení tohoto přepínání.



Obr. 6-5 Ovládací prvek přepínání sítí

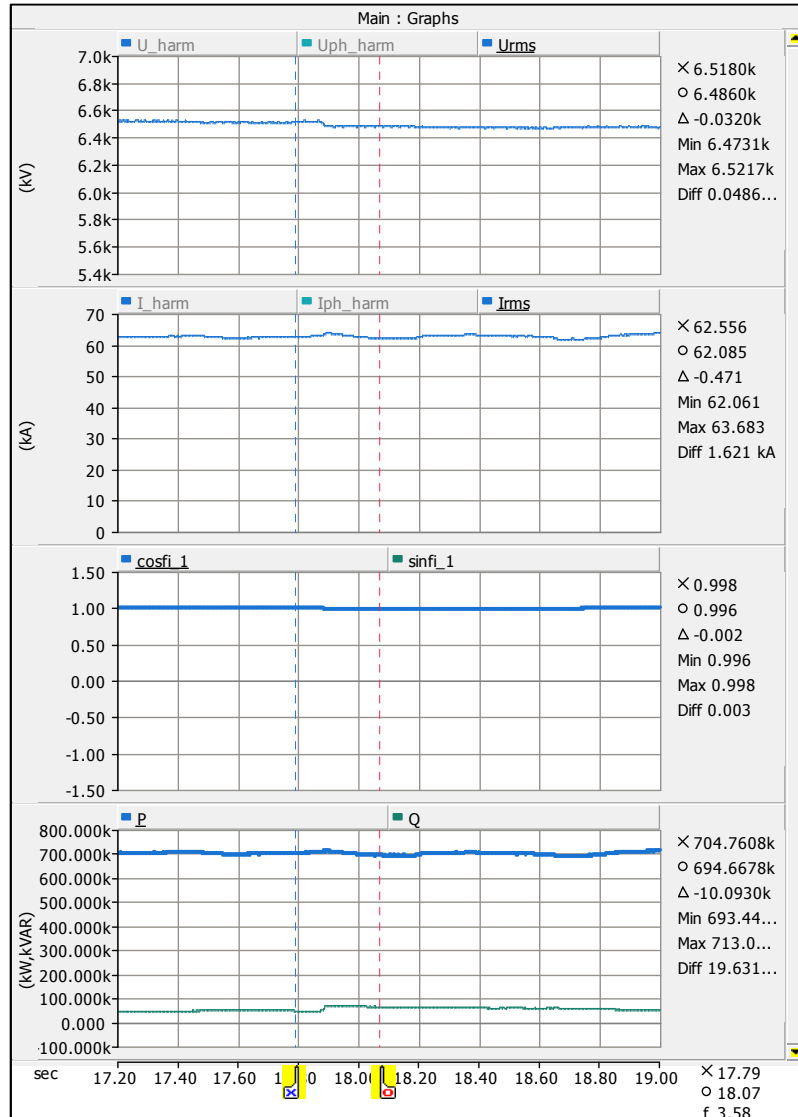
Velkou roli při takových změnách hraje přesnost stavu sítí v okamžiku měření, třeba jaké bylo napětí na zdrojích odběrných míst.

### 6.1.3 Manipulace přepojení na konec vedení

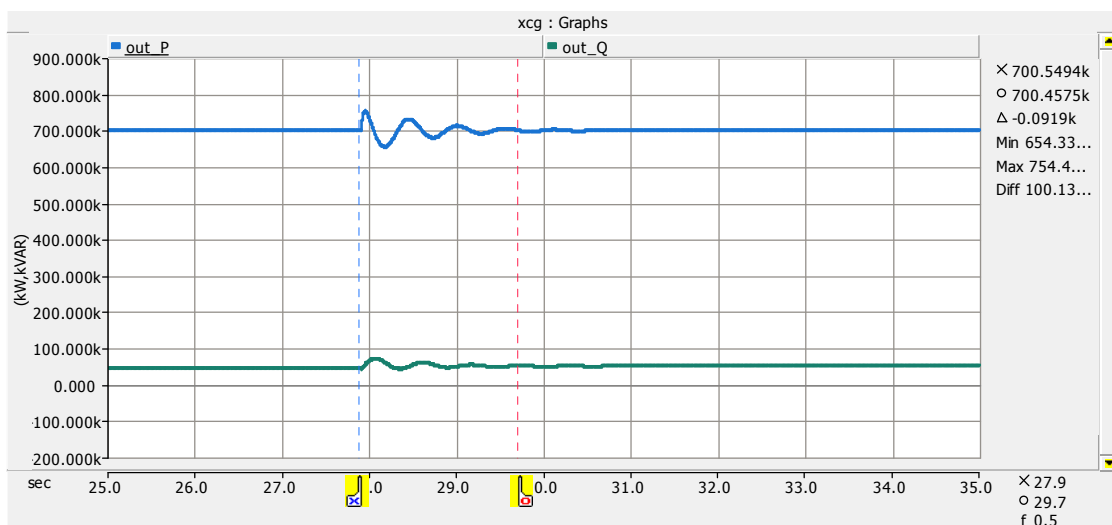
Manipulace přepnutí nastala v čase cca 17.8 sekund, celé měření probíhalo cca 48 sekund, což znamená, že stačilo nastavit *duration of run* – 50 sec. Výsledky naměřených a nasimulovaných hodnot jsou zobrazeny na obr. 6-6, obr. 6-7, obr. 6-8.

Z grafů měření na obr. 6-6 vyplývá, že napěťová hodnota při těchto změnách klesla jen o 0,03 kV, proud se změnil o 0,4 kA, výkonové – jen o 0,35 kW nejvýše, což neumožňuje přesně nastavit simulovaný model tak, aby odpovídal skutečnosti měření dle grafů.

Z grafů simulace na obr. 6-7, obr. 6-8 je vidět, že napěťová hodnota při těchto změnách klesla jen o 0,04 kV, jenom o 0,09 kW maximálně.

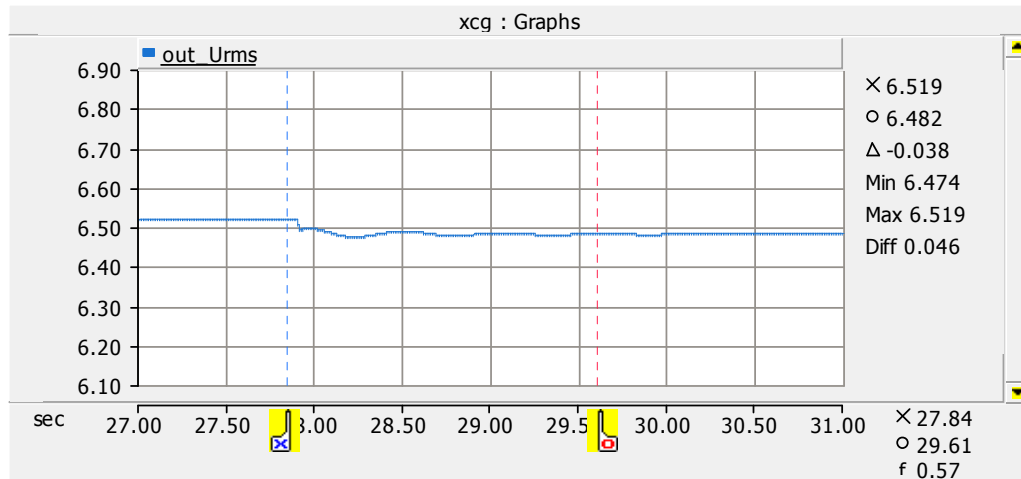


Obr. 6-6 Naměřené a přepočítané hodnoty při manipulaci připojení na konec vedení



Obr. 6-7 Změny simulovaného výkonu v okamžik připojení na konec vedení





Obr. 6-8 Změna výstupního napětí v okamžik připojení na konec vedení

Výsledkem porovnání je, že okamžik přepojení nastal skoro ve stejném čase. Odchylky jsou způsobeny možnými nepřesnostmi při nastavování parametrů sítě.

#### 6.1.4 Změna nastavení činného výkonu ze 100 % na 50%

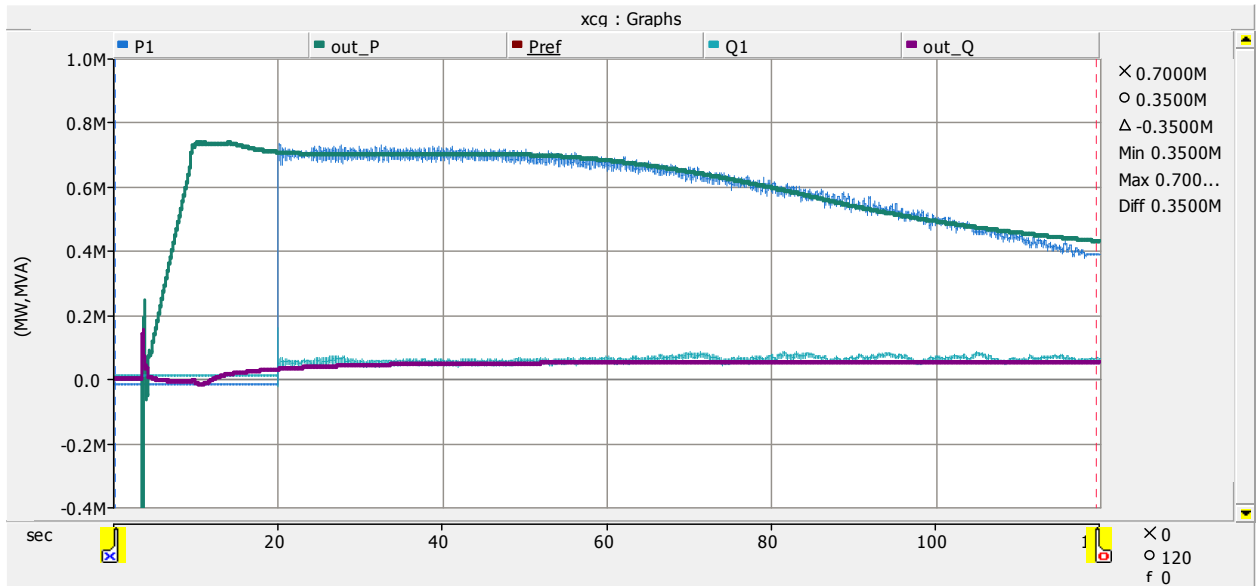
Doporučená nastavení pro měření změny dodávaného výkonu byly použity stejné jako pro rozběh generátoru: *solution time step – 500uS*, *channel plot step – 500uS*. Simulace probíhala dle délky měřeného času - 120 sekund.

Z obr. 6-9 se dá vidět, že po 20 sekundách generátor rozjel na plný výkon. Dle naměřených dat bylo zajištěno, že v 48 sekundě došlo k změně dodávaného výkonu do elektrizační soustavy. Po 120 sekundách dodávaný výkon klesl o polovinu.

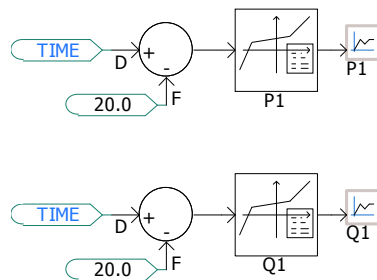
Při vzrůstu/klesání zatížení v neregulované soustavě vznikla výkonová nevyváženost, tj. zvýšení/zmenšení výkonu zdrojů dle zatížení. Frekvence elektrizační soustavy se kvůli setrvačnosti rotoru synchronního generátoru a turbíny nemohla měnit skokem, což znamenalo, že rotor se začal přibrzďovat (při zvětšení dodávaného výkonu) nebo naopak. Proto byla použita výkonová a otáčková PI regulace, pomocí které byl model zpřesněn a porovnán s naměřenými hodnotami.

Vyrovňovací přechodný děj trval, dokud v elektrizačně soustavě nenastala výkonová rovnováha.

Kvůli přifázování a plnému rozjždění modelu, naimportována data měření měly být posunuté o 20 sekund viz obr.6-10.



Obr. 6-9 Porovnání naměřených a nasimulovaných hodnot činného a jalového výkonu, kde  $P1$ ,  $Q1$  – naměřené,  $out\_P$ ,  $out\_Q$  – nasimulované



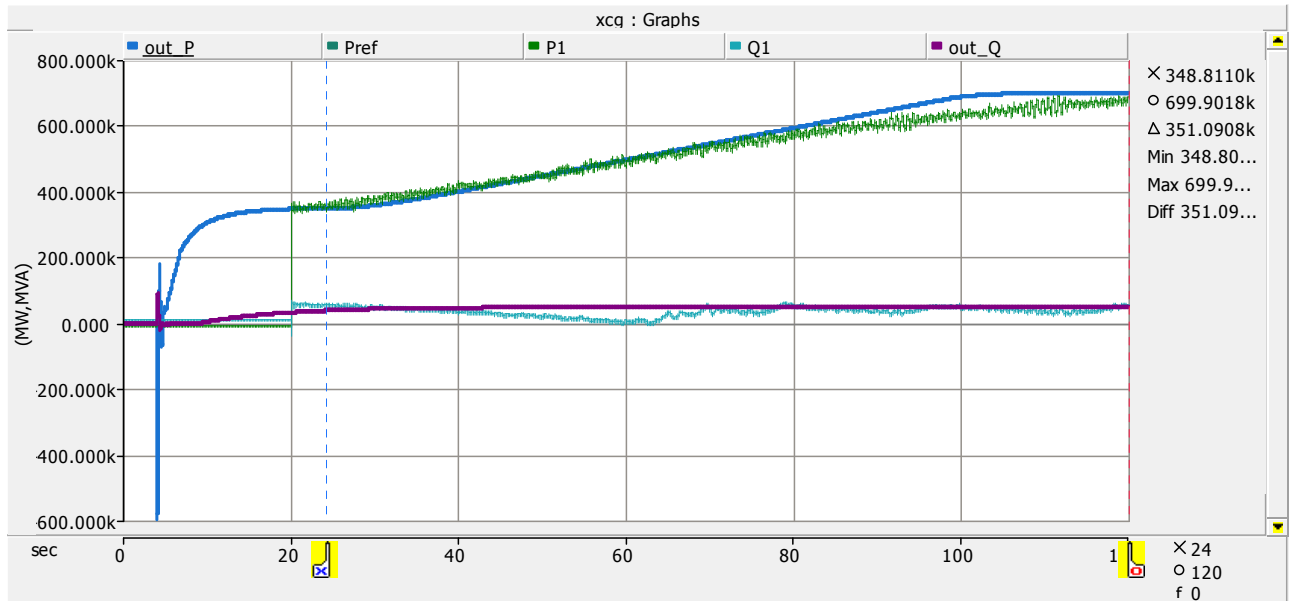
Obr. 6-10 Importování naměřených dat

Všechna regulace byla prováděna dle popisu v kapitole 2.3.

### 6.1.5 Změna nastavení činného výkonu z 50 % na 100%

Stejně jako v předchozí podkapitole 6.1.4 dle doručených nastavení byla provedena opačná změna výkonu z 50 % do 100 %.

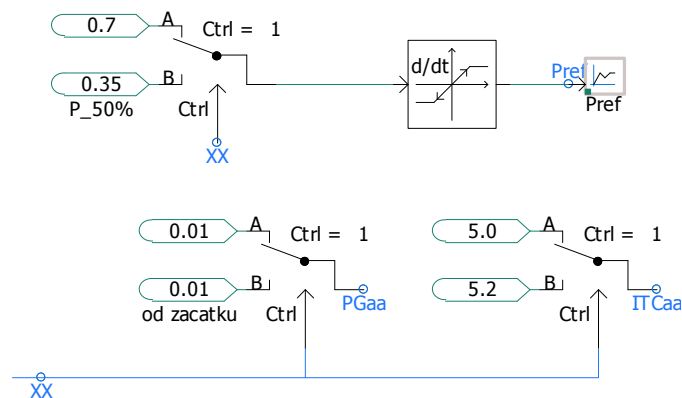
Z obr. 6-11 je vidět, že činná složka výkonu začala narůstat v 24 sekundě. Jak bylo popsáno výše, stabilita a dosažení maximální možné výkonnosti malé vodní elektrárny, se provádí řízením průtoku vody a otáčkovou regulací. Dle přesných nastavení PI regulátoru a s pomocí rampy, byla dosažena výstižnost simulace činného a jalového výkonu s naměřeným průběhem viz obr. 6-11.



Obr. 6-11 Porovnání naměřených a nasimulovaných hodnot činného a jalového výkonu, kde  $P1, Q1$  – naměřené,  $out\_P, out\_Q$  – nasimulované

Po 120 sekundách prováděné simulace, dodávaný výkon vzrostl na požadovaných 700 MW, což odpovídá naměřeným hodnotám a cílům tohoto experimentu.

Na obr. 6-12 znázorněna výkonová regulace a regulace rampou.



Obr. 6-12 Detailní regulace výkonu na PI kontrolérech

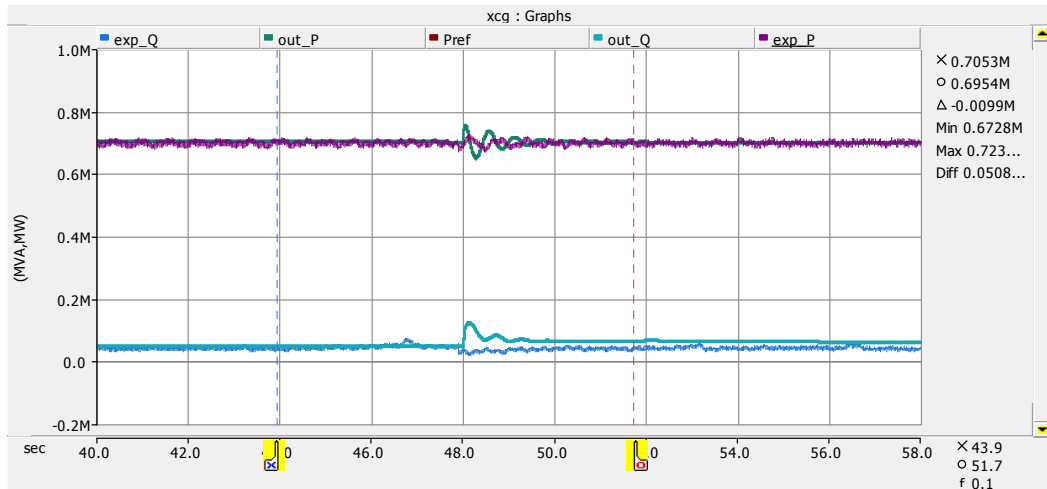
### 6.1.6 Skoková změna do tvrdé sítě

Na základě nastavení tohoto měření byla prováděna skoková změna zatížení sítě, která nastala v 48 sekundách, celý experiment trval 70 sekund viz obr. 6-13. Z hlediska přiřazování a plnému rozjždění modelu, naimportována data měření během simulace byly posunuté o 20 sekund, stejné jako v podkapitole 6.1.4.

Kvůli tomu, že docházelo ke skokové změně, se měl by objevit určitý induktivní či kapacitní proud, který by přesně popisoval chování stroje při spínání. Z grafů simulace, se dá vidět, že budičem AC1A stroj byl dobuzen tak, aby mohl dodržet napěťovou stabilitu celého systému, které jsou popsány v kapitolách 2.2 a 3.3.

Z grafů měření na obr. 6-14 se dá vidět, že v čase 28 sec napěťová hodnota při těchto změnách zvýšil jen o 0.04 kV, proud se změnil o 1.6 kA, což moc neumožňovalo přesné nastavit parametry

budiče a časové konstanty generátoru tak, aby co nejvíce odpovídali skutečnosti měření dle grafů. Jinak na tvrdé síti lze stroj řídit momentem na hřídeli.



Obr. 6-13 Porovnání naměřených a nasimulovaných hodnot činného a jalového výkonu, kde  $exp\_P$ ,  $exp\_Q$  – naměřené,  $out\_P$ ,  $out\_Q$  – nasimulované

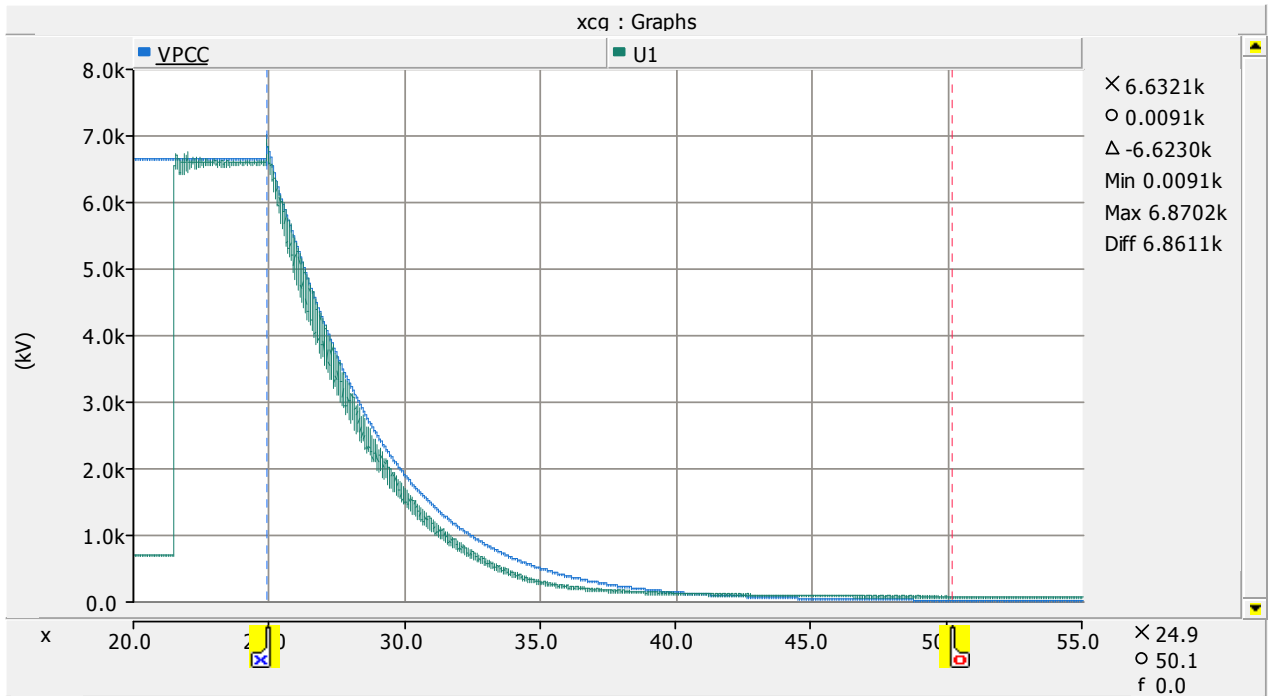


Obr. 6-14 Naměřené RMS hodnoty proudu a napětí

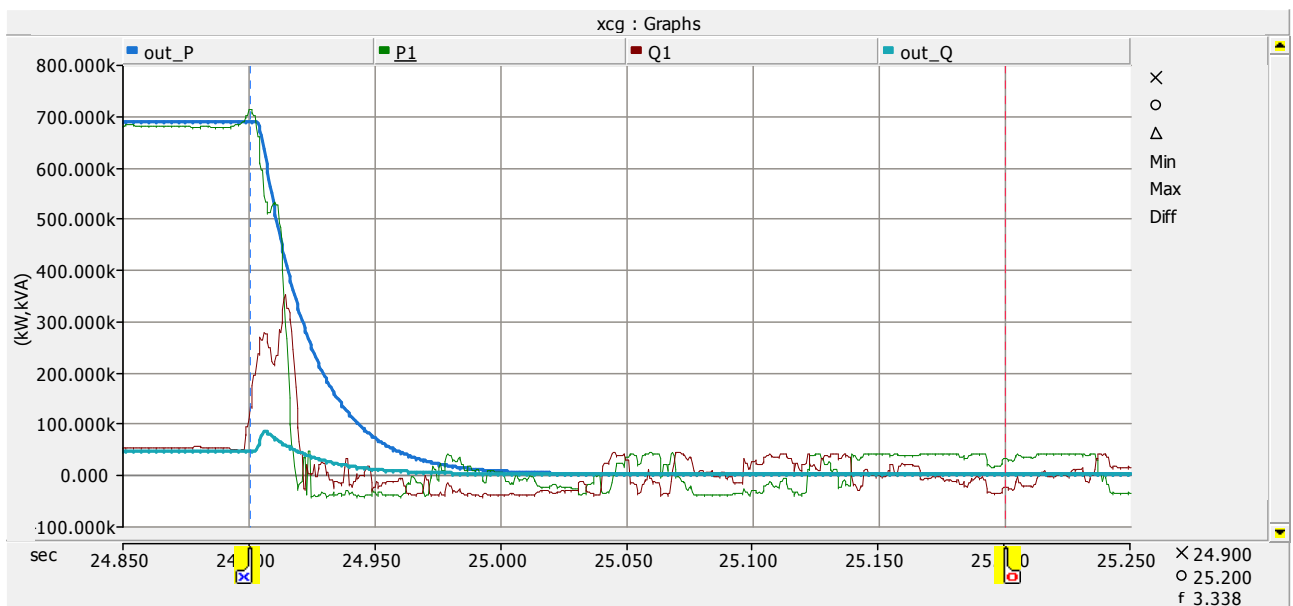
### 6.1.7 Rázové odstavení generátoru

Rázové odstavení generátoru nastala v čase 25 sekund. Porovnání naměřených a nasimulovaných hodnot je zobrazeno na obr. 6-15 a na obr. 6-16. Výsledkem porovnání je, že okamžik odstavení nastal přesně ve stejném čase. Odchytky jsou způsobeny možnými nepřesnostmi při nastavování časových konstant na generátoru.

Z těchto grafů se dá vidět, že výkon klesl do 0 během cca 0,3 s, změna napětí trvala cca 25 sekund, čímž se popisuje odbuzování stroje samotným budícím systémem při rázovém odstavení generátoru od sítě, za kterou magnetický tok ve stroji zanikl na nulu.



Obr. 6-15 Porovnání RMS hodnot naměřeného a nasimulovaného napětí při odstavení generátoru



Obr. 6-16 Porovnání hodnot naměřených  $P_1$ ,  $Q_1$  a nasimulovaných  $out\_P$ ,  $out\_Q$  výkonů při odstavení generátoru

## 7 ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo vytvořit model malé vodní elektrárny a porovnat jej s reálně naměřenými hodnotami.

V první části diplomové práce vymezujeme pojem malá vodní elektrárna. Jejich dělení dle normy ČSN 75 0120, která je dělí dle využití, spádu a nakládání s vodou. Je zde také popsána základní problematika malých vodních elektráren. Další kapitola popisuje teoretické základy synchronních strojů, výpočty týkající se matematickému modelování generátorů s řídicími systémy, což jsou například budicí systémy a automatické regulace napětí. V poslední kapitole týkající se teorie jsou uvedeny základní pojmy stability elektrizační soustavy, především však statická stabilita. Jsou zde popsány druhy stabilit a možnosti regulace, např. regulace otáček turbíny. Dále kapitola stručně popisuje elektrickou část modelu (generátor, budicí a řídicí systémy atd.).

V poslední části diplomové práce se věnujeme zpracování praktické části práce. V rámci této části práce byl v programu PSCAD zpracován model paralelního provozu malé vodní elektrárny a tvrdé sítě. Tento model je dále srovnáván s reálně změřenými daty z malé vodní elektrárny Soběnov. Je zde popsán postup zpracování dat, která na této elektrárně byla naměřena, a také nastavení získaných referenčních hodnot do simulace paralelního provozu generátoru na síť.

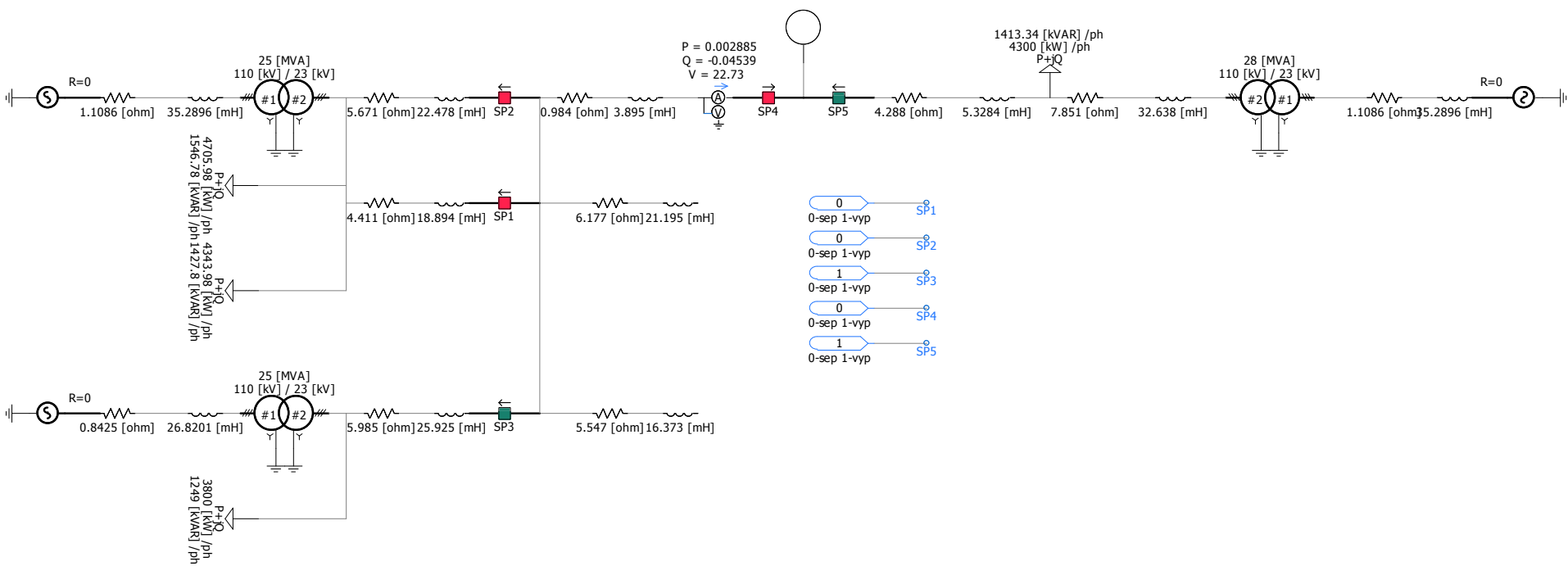
Na namodelovaném generátoru byly poté provedeny simulace různých jevů, které během provozu elektrárny mohou nastat. Nejprve byl vyzkoušen samotný rozběh generátoru, kdy bylo řešeno, jestli navržený model dosáhne a krátkodobě udrží stabilní chod. Doby dosažení stabilního chodu pro modelovaný a reálný generátor se příliš nelišily a vycházely cca 30 sekund. Dále bylo vyzkoušeno chování modelu například při regulaci jalového výkonu, regulaci otáček turbíny nebo skokového přepojení generátoru na síť.

Jednotlivé výstupy ze simulací modelu a z reálně naměřených hodnot se příliš nelišily. Navržený model malé vodní elektrárny může být považován za relativně přesný. Případné odchylky mohly být pravděpodobně způsobeny nepřesným nastavením parametrů sítě.

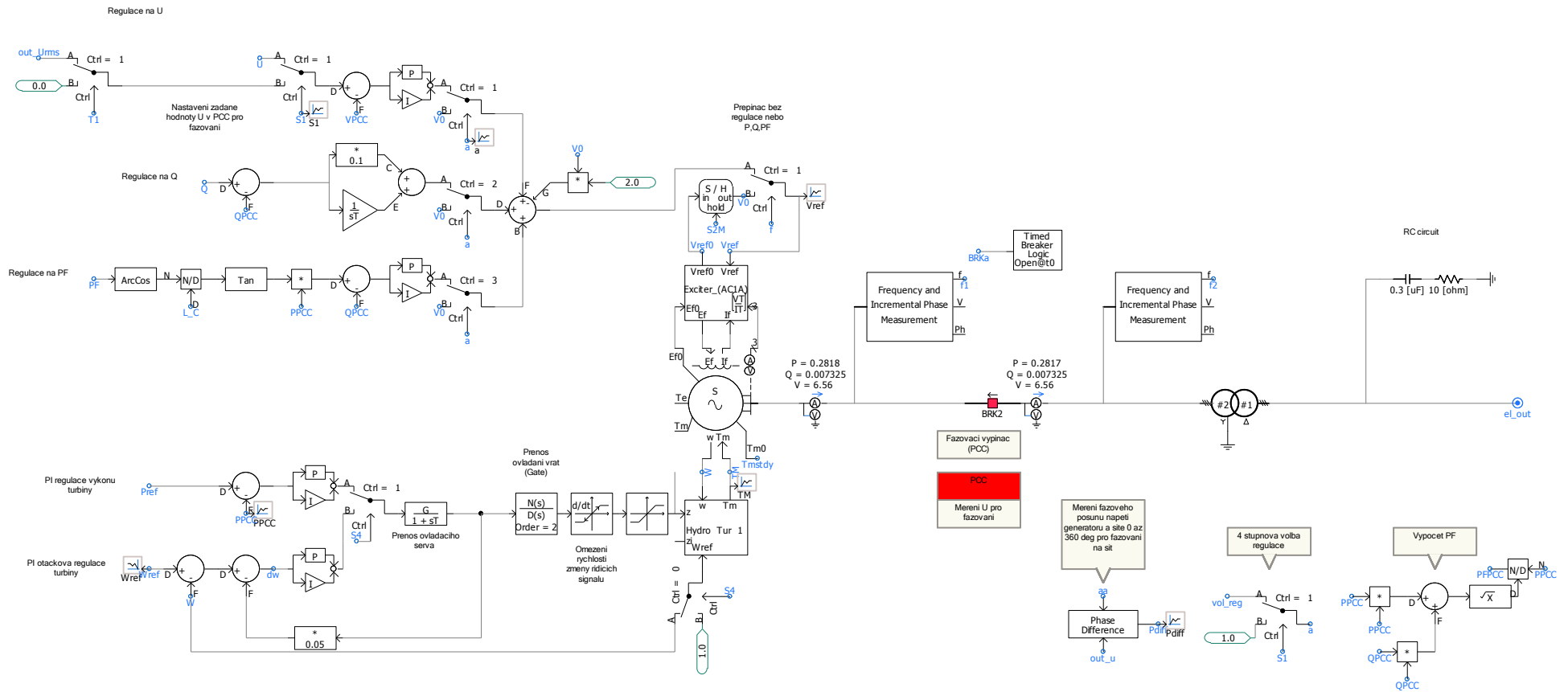
## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] L. ŠAMÁNEK, *Malé vodní elektrárny - proč, kde a jak?*, Česká asociace pro obnovitelné energie, O.P.S. BRNO, 2011.
- [2] ČSN 75 0120, *Vodní hospodářství – terminologie hydrotechniky*, 2009.
- [3] P. MASTNÝ. *Malé zdroje elektrické energie* [ONLINE]. Dostupné z <http://www.ueen.feec.vutbr.cz/~mastny/vyuka/mmze/skripta/voda.pdf>
- [4] J. MACHOWSKI, J. W. BIALEK AND J. R. BUMBY, *Power System Dynamics Stability and Control 2nd edition*, TRONDHEIM: JOHN WILEY & SONS LTD, 2008.
- [5] ING. M. BEŠTA. *Synchronní stroj* [online]. Dostupné z <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/T3-SYNCHRONN%C3%8D-STROJ.pdf>
- [6] E. W. KIMBARK, *Power system stability Volume 3: Synchronous Machines*, NEW YORK: IEEE PRESS, 1995.
- [7] P. KUNDUR, *Power System Stability and Control*, MCGRAW-HILL, INC., 1994.
- [8] A.E.Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D.Umans, *Electric Machinery, 6th edition* Boston, Mass. : McGraw-Hill, - McGraw-Hill series in electrical engineering. Power and energy
- [9] *PSCAD Cookbook Synchronous Machine Studies*, Manitoba HVDC Research Centre a division of Manitoba Hydro International Ltd. 211 Commerce Drive Winnipeg, MB R3P 1A3, Canada <https://hvdc.ca/>
- [10] *PSCAD Example Salient and Non-salient Models for Synchronous Generator*, Manitoba HVDC Research Centre a division of Manitoba Hydro International Ltd. 211 Commerce Drive Winnipeg, MB R3P 1A3, Canada <https://hvdc.ca/>
- [11] Richard Habrych, *Řízení jalového výkonu synchronního generátoru*, *Energetika* 3/2015
- [12] Ing. Karel Máslo a kolektiv: *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*
- [13] Jaroslav Doležal, *Jaderné a klasické elektrárny* Dostupné z <https://www.powerwiki.cz/attach/ENY/CVUT-1-Elektrarny.pdf>

# 1 PŘÍLOHA







## 2 PŘÍLOHA

*(Příklad napsání skriptu pro jedno měření)*

```

clc
clear all
format compact

A = importdata('MVE002.csv');

pom = A.';
C = size(pom);
B = 0:0.00005:0.00005*C(1,2);

U1=pom(2,:);

for i=1:C(1,2)
    E(1,i)=B(1,i);
    E(2,i)=U1(1,i);
end

fileID = fopen('MVE002_U1','w');
fprintf(fileID,'%s\r\n','! napeti - U1 MVE002');
fprintf(fileID,'%6.5f %12.4f\r\n',E);
fprintf(fileID,'%1s\r\n','ENDFILE:');
fclose(fileID);
disp ('hotovo U1')

counter = 10;
mask = repmat([true, false(1,counter-1)], 1, (size(E,2)/counter));
reducedE = E(:,mask);

fileID = fopen('MVE002_U1_reduced','w');
fprintf(fileID,'%s\r\n','! napeti - MVE002_U1');
fprintf(fileID,'%6.5f %12.4f\r\n',reducedE);
fprintf(fileID,'%1s\r\n','ENDFILE:');
fclose(fileID);
disp ('hotovo U1')

I1=pom(5,:);

for i=1:C(1,2)
    E(1,i)=B(1,i);
    E(2,i)=I1(1,i);
end

fileID = fopen('MVE002_I1','w');
fprintf(fileID,'%s\r\n','! proud - I1 MVE002');
fprintf(fileID,'%6.5f %12.4f\r\n',E);
fprintf(fileID,'%1s\r\n','ENDFILE:');
fclose(fileID);
disp ('hotovo I1')

counter = 10;
mask = repmat([true, false(1,counter-1)], 1, (size(E,2)/counter));
reducedE = E(:,mask);

fileID = fopen('MVE002_I1_reduced','w');
fprintf(fileID,'%s\r\n','! proud - MVE002_I1');

```

```
fprintf(fileID, '%6.5f %12.4f\r\n', reducedE);
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'ENDFILE:');
fclose(fileID);
disp ('hotovo I1')

n=pom(8, :);

for i=1:C(1,2)
    E(1,i)=B(1,i);
    E(2,i)=n(1,i);
end

fileID = fopen('MVE002_n', 'w');
fprintf(fileID, '%s\r\n', '! otacky - n MVE002');
fprintf(fileID, '%6.5f %12.4f\r\n', E);
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'ENDFILE:');
fclose(fileID);
disp ('hotovo n')

Ub=pom(9, :);

for i=1:C(1,2)
    E(1,i)=B(1,i);
    E(2,i)=Ub(1,i);
end

fileID = fopen('MVE002_Ub', 'w');
fprintf(fileID, '%s\r\n', '! napeti na budici - Ub MVE002');
fprintf(fileID, '%6.5f %12.4f\r\n', E);
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'ENDFILE:');
fclose(fileID);
disp ('hotovo Ub')

Ib=pom(7, :);

for i=1:C(1,2)
    E(1,i)=B(1,i);
    E(2,i)=Ib(1,i);
end

fileID = fopen('MVE002_Ib', 'w');
fprintf(fileID, '%s\r\n', '! budici proud - Ib MVE002');
fprintf(fileID, '%6.5f %12.4f\r\n', E);
fprintf(fileID, '%1s\r\n', 'ENDFILE:');
fclose(fileID);
disp ('hotovo Ib')

disp ('hotovo')
```

### 3 PŘÍLOHA

exp.		U1	I1	otáčky	time	cos1	P1	Q1
		[kV]	[A]	[rpm]	[sec]	[-]	[kVA]	[kVA]
6.1.1	Rozběh TG	6,5489	1,489	1.0 pu	68	0,7	12	11,84
6.1.2	Změna zatížení sítě	6,48-6,45	61,14- 63,41	1.0 pu	12 - 40	0,998	701	40,1-42,57
6.1.3	Manipulace, přepojení na konec vedení	6,5	63,63	1.0 pu	17.8	0,996	698	65,84
6.1.4	Změna činného výkonu ze 100% na 50%	6,41	62,716	1.0 pu	28	0,998	695	54,64
6.1.5	Změna činného výkonu z 50% na 100%	6,4514	62,142	1.0 pu	120	0,999	694,387	44
6.1.6	Skoková změna do tvrdší sítě, manipulace	6,5256	61,736	1.0 pu	50	0,998	702	40
6.1.7	Razové odstavení TG	6,6	59,5	1.0 pu	3.5	0,994	680	45,96

Tab. naměřených hodnot během simulace

## 4 PŘÍLOHA

### Popis a technické charakteristiky hlavního výrobního zařízení MVE Soběnov

#### 1. Hlavní údaje turbíny T1 a T2:

V MVE jsou instalovány 2 horizontální spirálové Francisové turbíny (po úpravě firmou Pavelka v r.2009), regulátor Hydraulický regulační agregát Typ HA40-R3 – 2x1,5 AC (r 2007) Bohemia Hydro s.r.o. Blansko, každá pro tyto poměry:

Spád účinný	H = 59,34 m (61,36 m bez ztrát), s náplatký H = 59,64 m.
Hltnost	Q = 1,45 m <sup>3</sup> / sek.
Výkon	P = 770 kW, tj. 1047 ks
Otáčky jm.	n = 1 000 min
Průběžné otáčky	n <sub>p</sub> = 1 800 min
Průměr oběžného kola	580/575 mm, výška 256 mm, 16 lopat oběžného kola,
Rozváděcí kolo	- 20 lopat, výška 112 mm, šířka 114 mm.

#### 2. Hlavní údaje generátorů TG 1 a TG 2:

Generátory jsou na jedné hřídeli s turbínou, mezi turbínami a generátory jsou segmentová ložiska s oběhovým chlazeným mazáním a ložiska z druhé strany generátoru jsou kroužková chlazená vodou.

Výrobce	Č K D
Rok výroby	1924, převinutí v roce 2009
Typ	TG 128 / 65
Výkon jmenovitý	770 kVA, 616 kW (po REK výkon 800 kW)
Napětí	6 300 V
Proud	70,5 A
Cos	0,8
Kmitočet	50 Hz
Otáčky	1 000/min.

Na generátoru je instalována hydraulická brzda (na setrvačnicku)

#### 3. Budič, regulace napětí:

Statický budič firmy TENEL je tvořen skříní buzení a fázování turbogenerátorů TG1a TG2, 770 kVA. Regulátor TE 5301 je mikroprocesorový regulátor, který obsahuje kromě všech regulačních režimů řídicí, ochranné, komunikační a diagnostické funkce, včetně fázování generátoru.

Rotační budiče jsou umístěny na hřídelích generátorů pevnou spojkou, na druhé straně mají ložiska, za nimi spojky pro pohon olejových zubových čerpadel (P 1,2kW, Q 46 l/min) oběhového mazání segmentových ložisek. Slouží pro elektrické přibrzdování soustrojí při rozběhu a fázování.

Výrobce	Č K D
Rok výroby	1924
Typ	GME 28,5/12,5
Výkon	5,85 kW
Napětí	65 V
Proud	90 A
Otáčky	1 000/min

#### 4. Převodové transformátory:

V elektrárně jsou 2 transformátory, které slouží k transformaci napětí generátoru a přenosu výkonu strojů do rozvodného systému. Označení transformátorů je TI a TII.

Výrobce	KONČAR typ 6TBS 800–24 B-B
Váha	3420 kg
Napětí	22/6,3 kV, EK = 5,5%
Zapojení	Yd1 800 kVA
Proud	21/73 A

Pro chlazení je použito prutového vzduchu v transformovně. Jako ochrany pro oba bloky použita ochrana Siemens 7UM62 VTX, které jsou na rozvaděči R6v dozorně.