

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Simulace dynamiky synchronního generátoru  
pracujícího do propojené elektrizační soustavy**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan MERGL**

Osobní číslo: **E16N0108P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Název tématu: **Simulace dynamiky synchronního generátoru pracujícího do propojené elektrizační soustavy**

Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Zpracujte komplexně téma řešení dynamiky synchronního generátoru pracujícího do propojené elektrizační soustavy (ES).

1. Rozeberte důležitost řešení statické a dynamické stability systému alternátoru a ES pro spolehlivost dodávky elektrické energie.
2. Popište teorii chování alternátoru v režimu synchronního provozu a dodávky výkonu do propojené ES.
3. Zrekapitulujte současné možnosti tvorby modelu alternátoru vhodného pro interaktivní simulace stability systému alternátoru a ES a navrhňte moderní řešení v nástroji DY-NAST.
4. Řešte netriviální úlohy stability chodu alternátoru ve vytvořeném modelu a výsledky porovnejte se stávajícími reprezentativními nástroji.
5. Zhodnoťte vlastnosti a kvality vytvořeného modelu vzhledem k věrohodnosti, snadnosti použití a výpočetnímu výkonu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

1. Mühlbacher - Metody řešení přechodných dějů v elektroenergetice
2. Hájek - Přechodné děje v elektrizačních soustavách
3. Mertlová, Beran, Hájek - Přenos a rozvod elektrické energie - příklady
4. Brettschneider, Haňka, Hruška, Chladová, Mach, Máslo, Sádecký, Švejnar, Veleba, Vrba - Řízení a stabilita elektrizační soustavy

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2018**

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



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

V Plzni dne 10. října 2017

## **Anotace**

Tato diplomová práce je zaměřena na popis a řešení problematiky úhlové stability synchronního generátoru připojeného do propojené elektrizační soustavy. K řešení je použit vytvořený model 3fázového synchronního generátoru v simulačním nástroji DYNAST. Který využívá k řešení rovnic stroje přechod do d, q, 0 rotující souřadný systém.

## **Klíčová slova**

Úhlová stabilita, Synchronní generátor, Elektromechanické přechodné děje, Parkova transformace, DYNAST

## **Abstract**

This master thesis is focused on describing and solving the issue of angular stability of the synchronous generator connected to the power grid. To solve the issue, a model of a three phase's synchronous motor has been created in DYNAST simulation tool, which uses the transformation in d, q, 0 coordinate rotation system to solve the machine's equations.

## **Key words**

Angular stability, Synchronous generator, Electromechanical transients, Park transformation, DYNAST

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 24.5.2018

Jan Mergl

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Karlu Noháčovi, Ph. D. za značné úsilí, odborné vedení, vstřícnost při konzultacích a cenné rady k této diplomové práci.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>2</b>
<b>1 STABILITA SYSTÉMU A JEJÍ VÝZNAM</b> .....	<b>6</b>
1.1 STATICKÁ STABILITA.....	8
1.2 DYNAMICKÁ STABILITA .....	12
1.3 DŮSLEDKY ZTRÁTY STABILITY, ASYNCHRONNÍ CHOD .....	15
1.3.1 <i>Asynchronní chod</i> .....	15
1.3.2 <i>Budící obvod přerušovaný</i> .....	16
1.3.3 <i>Budící obvod uzavřený</i> .....	17
1.3.4 <i>Výhody a nevýhody asynchronního chodu</i> .....	17
1.4 METODY PRO ZLEPŠENÍ STABILITY ALTERNÁTORU PRACUJÍCÍHO DO ES.....	18
<b>2 ALTERNÁTOR V SYNCHRONNÍM PROVOZU A DODÁVKOU DO ES</b> .....	<b>20</b>
2.1.1 <i>Odvození přenosu výkonu z alternátoru do ES</i> .....	20
2.1.2 <i>Pracovní oblast alternátoru</i> .....	22
<b>3 MOŽNOSTI MODELOVÁNÍ ALTERNÁTORU</b> .....	<b>23</b>
3.1 PŘEDPOKLADY PRO MODELOVÁNÍ .....	23
3.1.1 <i>Parkova transformace</i> .....	24
3.2 MODEL V A, B, C SOUŘADNÉM SYSTÉMU.....	26
3.2.1 <i>Shrnutí modelu v ABC</i> .....	29
3.3 MODEL V D, Q, 0 SOUŘADNÉM SYSTÉMU .....	29
3.3.1 <i>Shrnutí modelu v d, q, 0</i> .....	34
3.4 TVORBA MODELU .....	34
3.4.1 <i>Vlastní model</i> .....	35
<b>4 ŘEŠENÉ ÚLOHY</b> .....	<b>39</b>
4.1 NAVÝŠENÍ VÝKONU MODEL V DYNASTU .....	39
4.1.1 <i>DYNAST - Navýšení výkonu o 50%</i> .....	40
4.1.2 <i>DYNAST - Navýšení výkonu o 100%</i> .....	43
4.2 NAVÝŠENÍ VÝKONU MODEL V SIMPOWER SYSTEMS .....	45
4.2.1 <i>Navýšení výkonu o 50%</i> .....	46
4.2.2 <i>Navýšení výkonu o 100%</i> .....	48
4.3 POROVNÁNÍ MODELŮ .....	49
4.4 ZKRAT NA PŘÍVODNÍM VEDENÍ .....	50
4.4.1 <i>Doba trvání zkratu 0,3s</i> .....	52
4.4.2 <i>Doba trvání zkratu 0,9s</i> .....	55
4.4.3 <i>Doba trvání zkratu 1,5s</i> .....	58
<b>5 ZHODNOCENÍ MODELU</b> .....	<b>61</b>
5.1 VLASTNOSTI A KVALITA MODELU .....	61



---

5.2	VĚROHODNOST MODELU .....	61
5.3	UŽIVATELSKÁ PŘÍSTUPNOST MODELU .....	62
5.4	VÝPOČETNÍ VÝKON MODELU .....	62
<b>ZÁVĚR</b>	.....	<b>63</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b>	.....	<b>64</b>

## **Úvod**

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku týkající se dynamiky synchronního alternátoru v propojené elektrizační soustavě. Tedy na elektromechanické přechodné děje, které ovlivňují tento stroj při přechodných stavech. Způsobených jak elektrizační soustavou, tak změnám mechanického výkonu dodávaného soustrojím a jejich vzájemným vazbám.

Následně je vytvořen model 3 fázového synchronního stroje využívající Parkových rovnic náhradního modelu tohoto stroje, vytvořený v simulačním systému DYNAST. Model je poté porovnáván s modelem sobě podobným dostupným v knihovně SimPowerSystem v Simulinku, nástroje MATLAB (ověření správné funkce, rychlosti i uživatelské přístupnosti). Po ověření modelu jsou provedeny simulace vzorových rozruchů, kterým by synchronní generátor byl vystaven při provozu do propojené elektrizační soustavy.

## Seznam symbolů a zkratk

CIGRE .....	Council on Large Electronic Systems
IEEE .....	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ES .....	Elektrizační soustava
OZ.....	Opětné zapnutí
$S_V$ .....	Zdánlivý výkon vyrobený (VA)
$S_S$ .....	Zdánlivý výkon spotřebovaný (VA)
$S_Z$ .....	Zdánlivý výkon ztráty (VA)
$S_A$ .....	Zdánlivý výkon akumulovaný (VA)
$U_1$ .....	Napětí (V)
$\Delta \vartheta$ .....	Rozdíl zátěžních úhlů ( $^\circ$ ; rad)
P.....	Činný výkon (W)
Q.....	Jalový výkon (VAr)
$X_{12}$ .....	Souhrnná reaktance propojení ( $\Omega$ )
j.....	Operátor komplexních čísel
$P_T$ .....	Mechanický výkon (W)
$\vartheta$ .....	Zátěžný úhel alternátoru ( $^\circ$ ; rad)
$\Delta M$ .....	Rozdíl momentů (Nm)
$\Delta P$ .....	Rozdíl výkonů (W)
W .....	Energie (Ws)
$T_M$ .....	Mechanická časová konstanta
$\omega_s$ .....	Synchronní úhlová rychlost ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )
M.....	Moment (Nm)
PSAT .....	Power System Analysis Toolbox
$m_d^/$ .....	složka společného toku budicího a tlumicího vinutí v podélné ose (-)
$m_d^{//}$ .....	složka změny rozptylových toku budicího a tlumicího vinutí v podélné ose (-)
$m_q^{//}$ .....	složka s toku budicího a tlumicího vinutí v příčné ose (-)
$T_d^/$ .....	Podélná přechodná tlumicí konstanta (-)
$T_d^{//}$ .....	Podélná rázová tlumicí konstanta (-)
$T_q^{//}$ .....	Příčná rázová tlumicí konstanta (-)
$S_N$ .....	Jmenovitý výkon (VA)

---

p.u. ....	Poměrné jednotky
$\omega_R$ .....	Mechanická úhlová rychlost rotoru ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )
$\omega_f$ .....	Úhlová rychlost magnetického pole indukovaného do rotoru ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )
s .....	Skluz (-)
$I_N$ .....	Jmenovitý proud (A)
$M_N$ .....	Jmenovitý moment (Nm)
$\bar{I}$ .....	Proud v komplexním tvaru (A)
$\bar{U}$ .....	Napětí v komplexním tvaru (V)
$\bar{Y}$ .....	Admitance v komplexním tvaru (S)
$\bar{I}^*$ .....	Komplexně sdružený proud (A)
$\bar{U}^*$ .....	Komplexně sdružené napětí (V)
$\bar{Y}^*$ .....	Komplexně sdružená admitance (S)
$\bar{S}$ .....	Zdánlivý výkon v komplexním tvaru (VA)
Re .....	Reálná složka komplexního čísla (-)
Im .....	Imaginární složka komplexního čísla (-)
$f_p$ .....	Vektor složek statorových veličin v osách d,q,0 (-)
$f$ .....	Vektor fázových statorových veličin (-)
$P$ .....	Matice Parkovy transformace (-)
$P_z$ .....	Matice inverzní Parkovy transformace (-)
$\gamma$ .....	Úhel pootočení d,q,0 rotačního systému oproti ABC ( $^\circ$ ; rad)
$u_d$ .....	Poměrné napětí v ose d (-)
$i_d$ .....	Poměrný proud v ose d (-)
$u_q$ .....	Poměrné napětí v ose q (-)
$i_q$ .....	Poměrný proud v ose q (-)
$u_0$ .....	Poměrné napětí v ose 0 (-)
$i_0$ .....	Poměrný proud v ose 0 (-)
$u_f$ .....	Poměrné napětí v budícím vinutí (-)
$i_f$ .....	Poměrný proud v budícím vinutí (-)
$u_a$ .....	Poměrné napětí v ose A (-)
$i_a$ .....	Poměrný proud v ose A (-)
$u_b$ .....	Poměrné napětí v ose B (-)
$i_b$ .....	Poměrný proud v ose B (-)
$u_c$ .....	Poměrné napětí v ose C (-)

---

$i_c$ .....	Poměrný proud v ose C (-)
$R$ .....	Odpor statorového vinutí ( $\Omega$ )
$R_F$ .....	Odpor budícího vinutí ( $\Omega$ )
$R_D$ .....	Odpor tlumiče v ose d ( $\Omega$ )
$R_Q$ .....	Odpor tlumiče v ose q ( $\Omega$ )
$r$ .....	Odpor statorového vinutí p.u. (-)
$r_F$ .....	Odpor budícího vinutí p.u. (-)
$r_D$ .....	Odpor tlumiče v ose d p.u. (-)
$r_Q$ .....	Odpor tlumiče v ose q p.u. (-)
$i_D$ .....	Poměrný proud tlumičem v ose d (-)
$i_Q$ .....	Poměrný proud tlumičem v ose q (-)
$\Psi_{abc}$ .....	Cívkový tok statorem (Wb)
$\Psi_F$ .....	Cívkový tok budícího vinutí (Wb)
$\Psi_D$ .....	Cívkový tok tlumičem v ose d (Wb)
$\Psi_Q$ .....	Cívkový tok tlumičem v ose q (Wb)
$L_{abc}$ .....	Vlastní indukčnost statorových vinutí (H)
$L_{abcF}$ .....	Vzájemné indukčnost statorových vinutí a budícího vinutí (H)
$L_{abcD}$ .....	Vzájemné indukčnost statorových vinutí a tlumiče v ose d (H)
$L_{abcQ}$ .....	Vzájemné indukčnost statorových vinutí a tlumiče v ose Q (H)
$L_{bc}$ .....	Vzájemné indukčnost mezi b, c statorovými vinutími (H)
$L_{ca}$ .....	Vzájemné indukčnost mezi c, a statorovými vinutími (H)
$L_{ab}$ .....	Vzájemné indukčnost mezi a, b statorovými vinutími (H)
$L_d$ .....	Vlastní indukčnost statorových vinutí transformovaná do osy d (H)
$L_q$ .....	Vlastní indukčnost statorových vinutí transformovaná do osy q (H)
$L_{dF}$ .....	Vzájemné indukčnost transformovaného vinutí v ose d vůči budícímu vinutí (H)
$L_{qF}$ .....	Vzájemné indukčnost transformovaného vinutí v ose q vůči budícímu vinutí (H)
$L_D$ .....	Vlastní indukčnost tlumícího vinutí v ose d (H)
$L_Q$ .....	Vlastní indukčnost tlumícího vinutí v ose q (H)
$L_F$ .....	Vlastní indukčnost budícího vinutí (H)
$L_{FD}$ .....	Vzájemná indukčnost budícího vinutí a tlumícího vinutí v ose d (H)
$L_{FQ}$ .....	Vzájemná indukčnost budícího vinutí a tlumícího vinutí v ose q (H)

---

$I_{ad}$	Vzájemné indukčnosti všech obvodů v ose d v p.u. (-)
$I_{aq}$	Vzájemné indukčnosti všech obvodů v ose q v p.u. (-)
$I_{d\sigma}$	Vlastní indukčnost v ose d s uvažovaným rozptylem v p.u. (-)
$I_{q\sigma}$	Vlastní indukčnost v ose q s uvažovaným rozptylem v p.u. (-)
$I_{F\sigma}$	Vlastní indukčnost budícího vinutí s uvažovaným rozptylem v p.u. (-)
$I_{D\sigma}$	Vlastní indukčnost tlumiče v ose d s uvažovaným rozptylem v p.u. (-)
$I_{Q\sigma}$	Vlastní indukčnost tlumiče v ose q s uvažovaným rozptylem v p.u. (-)
$I_d$	Celková indukčnost v ose d p.u. (-)
$I_q$	Celková indukčnost v ose q p.u. (-)
$I_F$	Celková indukčnost budícího vinutí v p.u. (-)
$I_D$	Celková indukčnost tlumiče v ose d p.u. (-)
$I_Q$	Celková indukčnost tlumiče v ose q p.u. (-)
$\Psi_{dq0FDQ}$	Cívkové toky v soustavě vzájemných poměrných hodnot (-)
$\delta$	zátěžný úhel (rad)
$\Delta\omega$	Diference úhlových rychlostí (rad)
$J$	Moment setrvačnosti ( $\text{kg m}^2$ )
$T'_d$	Přechodná časová konstanta (s)
$T_{dc}$	Přechodná časová konstanta (s)
$e'_q$	Přechodné napětí v ose q (-)
$e_{qc}$	Přechodné napětí v ose q (-)
$x_d$	Podélná synchronní reaktance p.u. (-)
$x'_q$	Příčná přechodná reaktance p.u. (-)
$x_{qc}$	Příčná přechodná reaktance p.u. (-)
$u_{if}$	Poměrné budící napětí p.u. (-)
$\alpha$	Úhel pootočení d,q,0 rotačního systému oproti ABC (rad)
$x_{qc}$	Příčná přechodná reaktance p.u. (-)
$u_{if}$	Poměrné budící napětí p.u. (-)
$E_0$	Vnitřní elektromotorické napětí. (-)
$N$	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
$1f, 3f$	Počet fází
$L1, L2, L3$	Fázové vodiče napájecí soustavy

## **1 Stabilita systému a její význam**

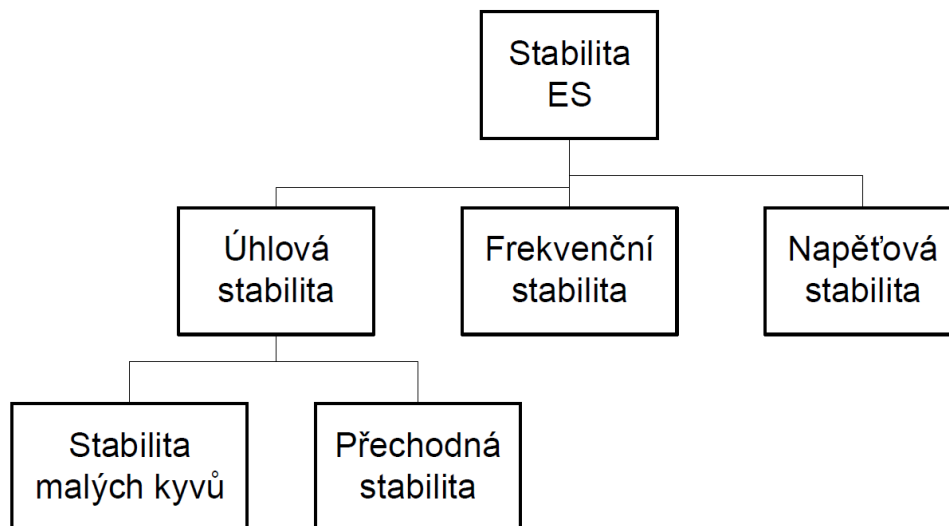
Tato kapitola se zabývá přiblížením problematiky stability. Především do problematiky úhlové stability, tedy pojmů statické a dynamické stability systému alternátoru a elektrizační soustavy. Protože dosažení statické a dynamické stability je jednou z inherentních podmínek, pro funkční elektrizační soustavu. Důsledky ztráty stability. Dále je zde uveden zkrácený popis metod, jak tyto stability zlepšit.

Historicky byli první základy položeny již v roce 1892 ruským matematikem jménem A.M. Ljapunov, jenž své teze uvedl v publikaci Obecná úvaha o stabilitě pohybu [1]. Od roku 1920 se začali řešit problémy se stabilitou v elektrizační soustavě spojené s rozsáhlou výstavbou a provozováním těchto přenosových vedení.

V pro nás již bližší době se problematice definice stability věnovala pracovní skupina složená ze specialistů z CIGRE a IEEE. Výsledná navržená definice zní: „Jestliže dojde v soustavě k rozruchu, musí se soustava vrátit do rovnovážného stavu s veličinami v dovolených mezích a soustava jako celek zůstane nedotčena“ [1]. Rozruchem v anglickém jazyce „disturbance“, v ruském jazyce „возмущение“ jsou myšleny [1]:

- Změny provozního charakteru, zejména změna výkonu dodávaného a odebíraného, naplánované změny topologie sítě (například zapínání nebo vypínání propojovacích vedení)
- Poruchy zařízení způsobené skrytými vnitřními vadami nebo urychleným stárnutím (způsobené přetěžováním)
- Poruchy zaviněné vnějšími vlivy, z drtivé většiny klimatické vlivy například silný vítr, vysoká teplota, úder blesku, atd.

Elektrizační soustavu lze považovat za složitý systém vystavovaný neustálým změnám podmětů jak vnitřních, tak vnějších. Proto je z pohledu analýzy odolnosti velice výhodné separovat stabilitu do několika oddělených částí. Tato separace při analýze dovoluje přijetí určitých zjednodušujících předpokladů využívaných následně při reprezentaci soustavy a pro užití vhodných metod analýzy. Proto lze základní členění stability ES zaneš jako obrázek níže.



**Obr. 1.1 Rozdělení pojmu stabilita elektrizační soustavy [1]**

Úhlová stabilita je spjata s pohybem rotorů synchronních strojů, které jsou používány jako nejrozšířenější zdroj pro výrobu elektrické energie. Tedy se vztahuje na schopnost synchronních strojů zůstat v synchronním chodu spolu zbytkem elektrizační soustavy při rozruchu [1]. Tato vlastnost j úzce provázána se schopností soustrojí udržovat elektrický moment generátoru v rovnováze s mechanickým moment stroje dodávajícího rotační práci, zde bývá nejčastěji turbína. Z tohoto tedy vyplívá, že je úhlová stabilita konkrétně zaměřena na elektromechanické přechodné děje. Za běžných podmínek stačí úhlovou stabilitu vyšetřovat do 10 sekund, právě proto se také občas nazývá krátkodobá dynamika [1].

Frekvenční a napěťová stabilita souvisí se schopností udržení systémové funkce soustavy [2]. Tedy udržováním rovnosti bilanční rovnice zdánlivých výkonů a tedy stabilní frekvenci po rozruchu ze zadaného počátečního stavu [1].

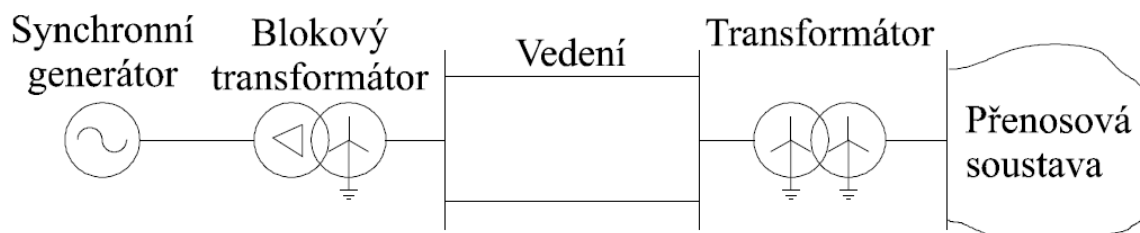


Bilanční rovnice [3]:

$$S_V(t) = S_S(t) + S_Z(t) + S_A(t) \quad (1)$$

Úhlovou stabilitu dále lze dělit na stabilitu malých kyvů označovanou jako statickou stabilitu dříve stabilnost v malém a přechodnou stabilitu (z anglického jazyka „Transient stability“) dříve stabilnost ve velkém. Pojem přechodná stabilita lze použít v celosvětovém měřítku, i přes své malé rozšíření u nás. Na rozdíl od dynamické stability, která má v Evropě a Severní Americe jiný význam [1]. Z těchto důvodů je tato práce zpracována s pojmy u nás více známých.

Pro vysvětlení pojmů statické a dynamické stability je potřeba popsat systém, jehož analýza je provedena. Tato analýza systému alternátoru pracujícího do propojené elektrizační soustavy je postavena na následujícím zjednodušeném modelu.



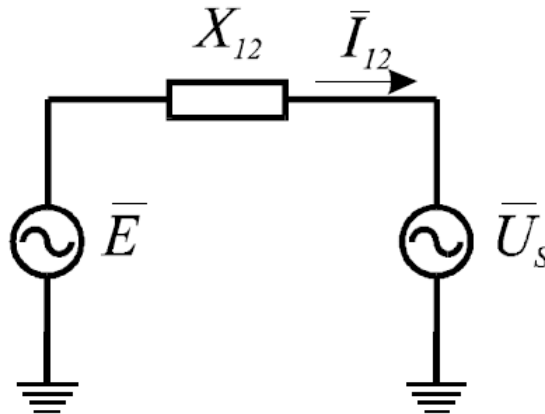
Obr. 1.2 Analyzovaný systém propojení alternátoru a ES [5]

## 1.1 Statická stabilita

Statická stabilita alternátoru pracujícího do propojené elektrizační soustavy popisuje schopnost (vlastnost) samotného systému alternátoru a ES dosáhnout při nekonečně pomalých a malých změnách nového synchronního stavu, tedy nového stavu s konstantním zátěžným úhlem. Jedná se o změny zátěžného úhlu, výkonu turbíny, parametrů ovlivňující přenos činného výkonu, případně dalších parametrů ovlivňujících výše uvedené parametry. [5]

Určuje se především ve frekvenční oblasti na systému linearizovaných rovnic, jejichž řešení probíhá pomocí určování kořenů charakteristických diferenciálních rovnic. Pokud jsou kořeny v reálné části záporné, soustavu lze považovat za stabilní a dojde k ustálení přechodných jevů. [1]

Pro názorné vysvětlení statické stability je nejprve potřeba definovat potřebný systém. Úpravy vedoucí k rovnicím pro výpočet přenosu výkonu. Toto odvození je provedeno v kapitole 2.1.1. Z tohoto odvození vyplývá, že stabilitu jednoduchého přenosu lze popsat použijeme následujícím obrázkem a několika rovnicemi.



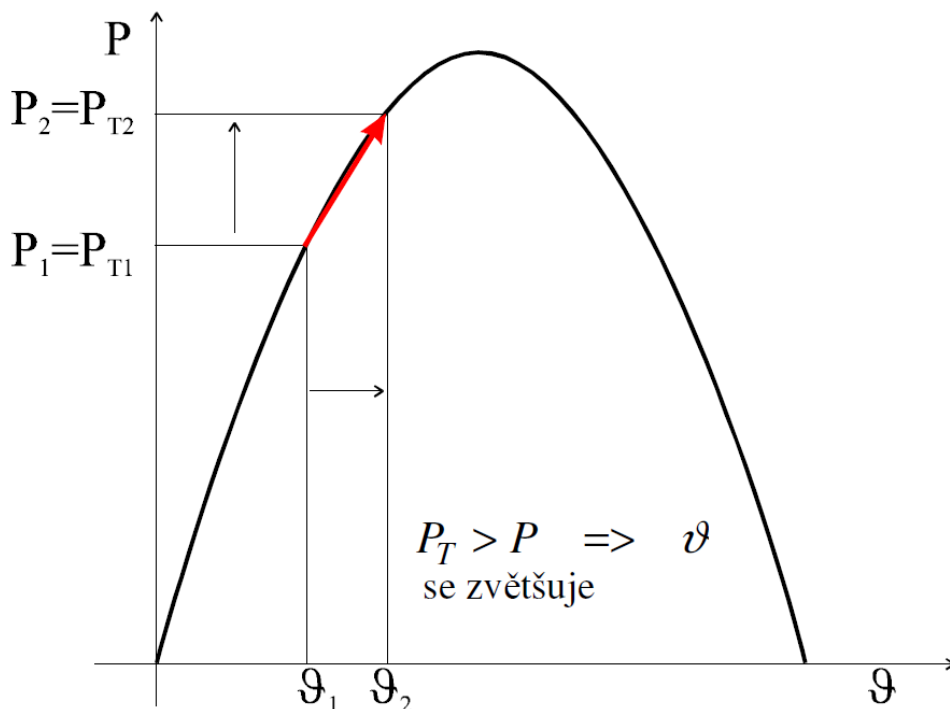
Obr. 1.3 Statická stabilita jednoduchého přenosu [5]

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin \Delta\vartheta \quad (2)$$

$$Q_1 = \frac{U_2^2}{X_{12}} - \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \cos \Delta\vartheta \quad (3)$$

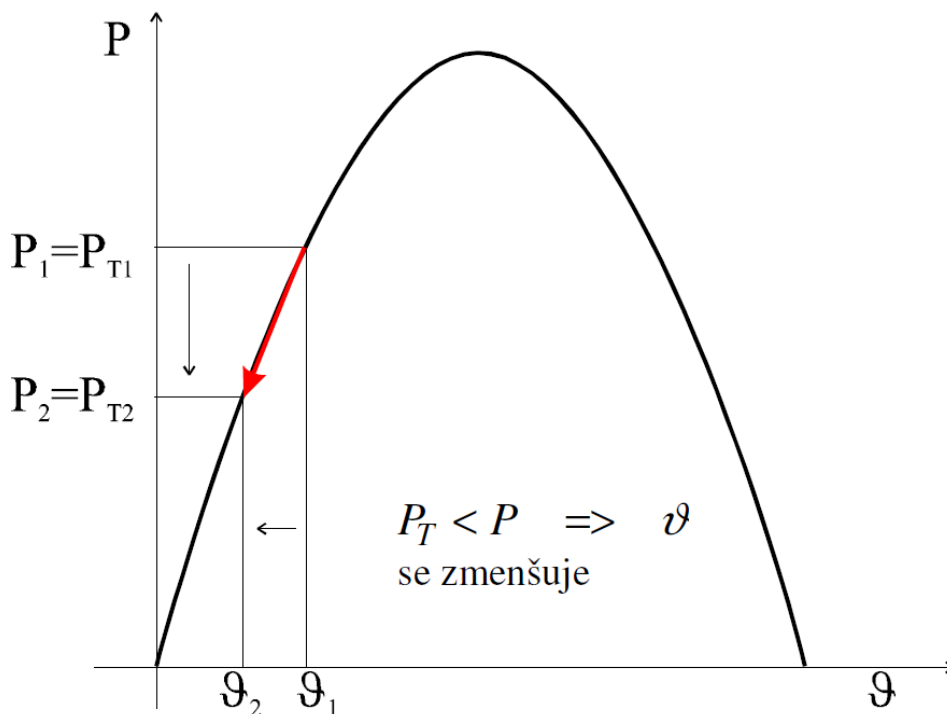
$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \cos \Delta\vartheta - \frac{j U_2^2}{X_{12}} \quad (4)$$

Dále je zde uvedeno i několik názorných příkladů v grafické provedení problematiky splnění podmínky statické stability. Níže uvedené tři obrázky jsou grafickým promítnutím rovnice (2), při změnách činného výkonu dodávaného alternátorem do ES pomocí výkonu turbíny. To následně vede ke změně velikosti zátěžného úhlu, napětí sítě a alternátoru považujeme za konstantní, stejně tak reaktanci jejich vzájemného propojení.



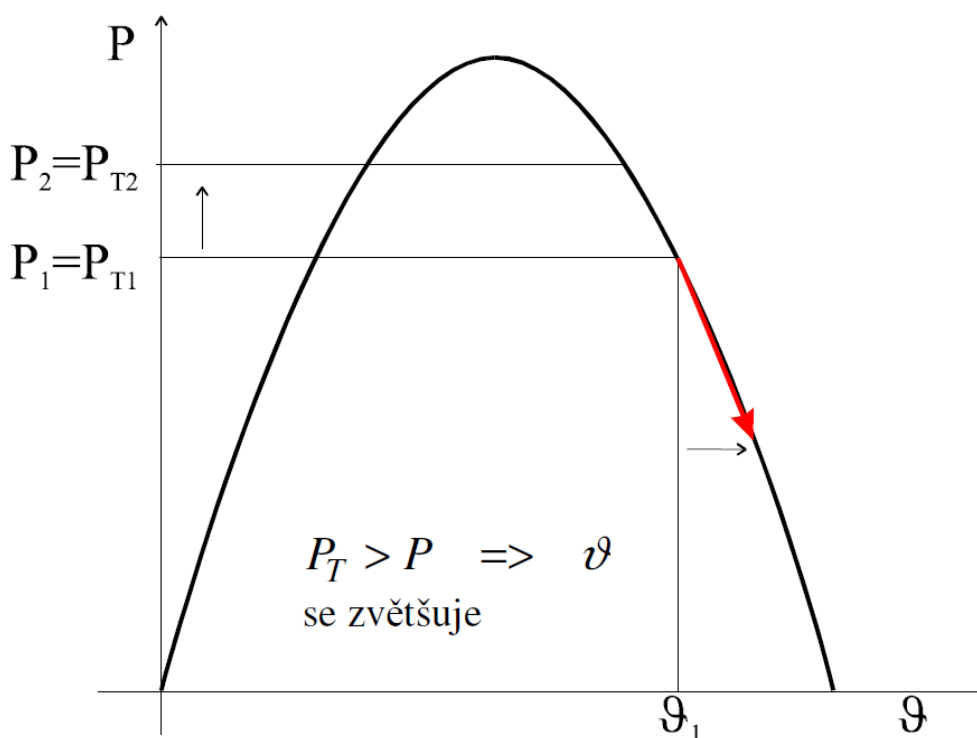
**Obr. 1.4** Výkonová charakteristika alternátoru pracujícího do ES nárůst výkonu,  $\vartheta < 90^\circ$  [5]

V případě Obr. 1.4 požadujeme navýšení činného výkonu dodávaného alternátorem do ES při počátečním zátěžném úhlu menším než  $90^\circ$ . Spolu s nárůstem výkonu dochází i k nárůstu zátěžného úhlu. Jedná se tedy o staticky stabilní stav.



**Obr. 1.5** Výkonová charakteristika alternátoru pracujícího do ES pokles výkonu,  $\vartheta < 90^\circ$  [5]

V případě Obr. 1.5 požadujeme pokles činného výkonu dodávaného alternátorem do ES při počátečním zátěžném úhlu menším než  $90^\circ$ . Spolu s poklesem výkonu dochází i k poklesu zátěžného úhlu. Jedná se tedy o staticky stabilní stav.



**Obr. 1.6 Výkonová charakteristika alternátoru pracující do ES při nárůstu výkonu,  $\vartheta > 90^\circ$  [5]**

V případě Obr. 1.6 požadujeme navýšení činného výkonu dodávaného alternátorem do ES při počátečním zátěžném úhlu větším než  $90^\circ$ . Zde narůstá činný výkon, zátěžný úhel na rozdíl od předchozích variant klesá. Jedná se tedy o staticky nestabilní stav.

Z výše uvedených poznatků je patrná určitá pravidelnost, potažmo podmínka. Tuto podmínku pro splnění statické stability lze zapsat pomocí následující rovnice.

Podmínku splnění statické stability lze zapsat následující rovnicí:

$$\frac{\partial P}{\partial \vartheta} > 0 \quad (5)$$

Z této podmínky tedy vyplývá, že synchronní stroj je staticky stabilní, pokud se zátěžný úhel pohybuje v tomto rozmezí:  $-90^\circ < \vartheta < 90^\circ$

## 1.2 Dynamická stabilita

Dynamická stabilita alternátoru pracujícího do propojené elektrizační soustavy popisuje schopnost systému alternátoru a ES dosáhnout při změnách nového synchronního stavu, tedy nového stavu s konstantním zátěžným úhlem. Jedná se o změny zátěžného úhlu, výkonu turbíny, parametrů ovlivňující přenos činného výkonu, případně dalších parametrů ovlivňujících výše uvedené parametry. Podmínku nutnou pro splnění dynamické stability lze definovat jako: Během přechodného děje musí mít systém k dispozici alespoň stejně velké množství brzdící energie jako je množství akcelerační energie dodané soustrojím v rámci přechodného děje. [1] [5] [6]

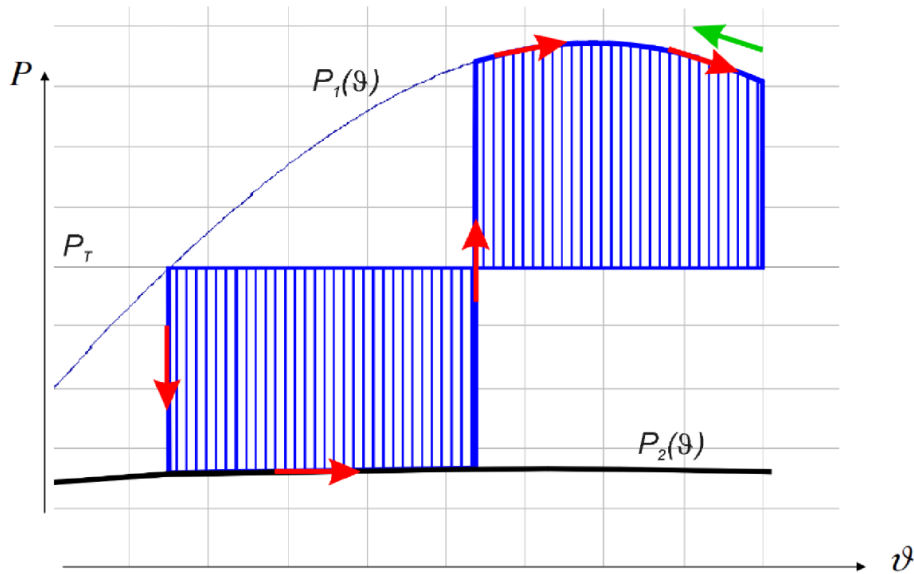
Podmínku splnění dynamické stability lze zapsat také následující rovnicí:

$$W_{mech} = \int_0^t \Delta P dt \int_0^t \Delta M \omega dt \approx \int_0^{\vartheta} \Delta P d\vartheta < 0 \quad (6)$$

$$\Delta P = P_T - P \quad (7)$$

Protože uvažujeme pouze drobné vychýlení alternátoru ze synchronního stavu, lze tedy provést přechod integrace podle času na zátěžný úhel.[5] Tedy lze užít tzv. „pravidlo ploch“, případně známé jako „metoda ploch“. Toto pravidlo udává, že plocha nad křivkou  $P_T$  omezená křivkou  $P$  je větší nebo rovna ploše pod křivkou  $P_T$ .

Pro lepší názornost je zde uvedeno i několik příkladů v grafickém provedení problematiky splnění podmínky dynamické stability. Níže uvedené obrázky jsou promítnutím rovnice ( 6 ), při změnách vazební admitační matice alternátoru a ES. Ve všech těchto konkrétních případech se jedná o snížení admitance. Především pro potenciálně největší ohrožení stroje roztočením nad mechanickou pevnost uchycení rotačních částí turbosoustrojí.



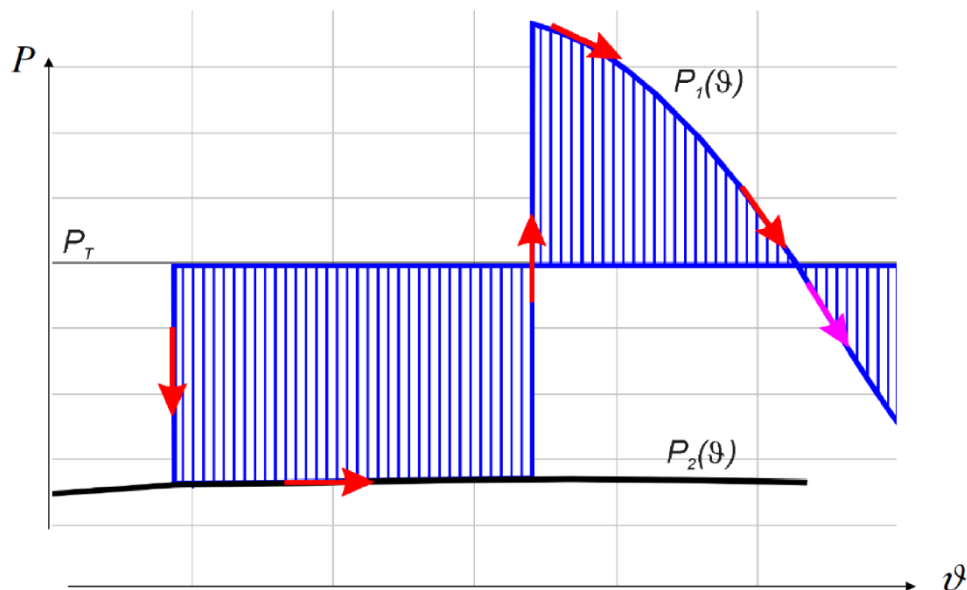
**Obr. 1.7** Dynamická stabilita, stabilní stav [5]

$$W_{mech} = \int_0^t \Delta P dt \approx \int_0^{\vartheta} \Delta P d\vartheta < 0 \quad \Delta P = P_T - P \quad (8)$$

Tento obrázek zobrazuje přechodný děj, při kterém soustava vypadla ze staticky stabilního stavu snížením vazební admitance mezi alternátorem a ES z důvodu poruchy na vedení. Snížení vazební admitance vede ke snížení velikosti přenášeného elektrického výkonu, který zde inherentně plní roly brzdného výkonu na hřídeli soustrojí. Na obrázku je tento pokles znázorněn poklesem výkonu z původní charakteristiky  $P_1(\vartheta)$  na  $P_2(\vartheta)$ .

$$\frac{T_M}{\omega_s} \frac{d^2\vartheta}{dt^2} = M_T - M \approx P_T - P \quad (9)$$

Zátěžný úhel začíná narůstat podle předchozí diferenciální pohybové rovnice [1]. Přibližně v době kdy dosáhl přibližně hodnoty 1.3 rad, došlo k odstranění poruchy a přenášený výkon se zpět vrací na počáteční křivku  $P_1(\vartheta)$ . Přibližně v době, kdy zátěžný úhel dosáhl hodnoty okolo 2 rad, dochází k naakumulování potřebného minimálního množství brzdící energie, která zastaví předchozí narůst zátěžného úhlu. Tento bod by se dal nazvat jako „mezní době trvání zkratu“ (z angl. „critical clearing time“). Po překročení této hranice by došlo k přechodu do nestabilního stavu. Protože dále dochází k převaze brzdného momentu nad momentem urychlující  $M > M_T \approx P > P_T$ , začne docházet ke snižování zátěžného úhlu (zelená šipka). Tedy celý přechodný děj lze prohlásit za dynamicky stabilní.



Obr. 1.8 Dynamická stabilita, nestabilní stav [5]

$$W_{mech} = \int_0^t \Delta P dt \approx \int_0^{\vartheta} \Delta P d\vartheta > 0 \quad \Delta P = P_T - P \quad (10)$$

Tento obrázek zobrazuje přechodný děj, při kterém soustava vypadla ze staticky stabilního stavu totožnou poruchou jako v Obr. 1.7. V tomto případě došlo k odstranění poruchy později. V době kdy přibližná hodnota zátěžného úhlu odpovídala 1,7 rad. Hodnota zátěžného úhlu se opět mění podle diferenciální pohybové rovnice ( 9 ) [1]. Přibližně v době, kdy zátěžný úhel dosáhl hodnoty odpovídající 2,7 rad, dochází k odstranění poruchy.

Protože však nedochází k naakumulování dostatečného množství brzdící energie, dochází k převaze urychlovacího momentu nad momentem brzdícím  $M_T > M \approx P_T > P$ . Bude tedy pokračovat nárůst urychlující energie (fialová šipka) [5]. Tedy celý přechodný děj lze prohlásit za dynamicky nestabilní. Protože soustrojí nedokázalo v rozmezí zátěžných úhlů (1,7 až 2,7 rad) naakumulovat dostatečné množství brzdící energie na pokrytí urychlující energie.

V praxi nelze obvykle využít jednoduché pravidlo ploch. Pro jeho časovou a výpočetní náročnost, především však pro jeho neproveditelnost při složitějších soustavách [1]. Na vyšetřování dynamické stability nelze použít linearizovaný model, protože analytické řešení nelineární soustavy není dostupné. Z tohoto důvodu byli pro praxi

vyvinuti takzvané „síťové simulátory“, které zpřístupňují řešení dynamické (přechodné) stability. Jako příklad síťového simulátoru lze uvést: MODES, PSAT. Dále tyto výpočty poskytuje vytvořený model v nástroji DYNAST.

### **1.3 Důsledky ztráty stability, asynchronní chod**

Při ztrátě stability je nutný okamžitý zásah regulace (například vybavením rychlým řízením ventilů). Jinak se stroj začne přetáčet nad synchronní otáčky a přejde do tzv. asynchronního chodu, který je provázen nepřejemnými důsledky jak pro stroj, tak elektrizační soustavu. Při přizpůsobení konstrukčních charakteristik synchronního stroje, lze tento vliv redukovat případně využít v nouzových stavech.

Dále bych rád upozornil, že v této kapitole při definici asynchronního chodu bylo na problematiku nahlíženo především z pohledu ztráty stability. Kromě ztráty stability může vést k asynchronnímu chodu také níže uvedené příčiny. Pro tuto práci jsou však upozaděny.

- zkrat budícího vinutí přímo nebo v odbuzovači
- zkrat na usměrňovači
- rozpojení obvodu buzení

#### **1.3.1 Asynchronní chod**

K asynchronnímu chodu synchronního stroje dochází ve chvíli, kdy je brzdňý synchronní moment nižší než moment dodávaný turbínou. Protože brzdňý moment alternátoru na soustrojí vinou ztráty stability poklesne, začne se alternátor urychlovat nad synchronní otáčky. Následně dochází k vyrovnání vzniklého asynchronního momentu a sníženého momentu turbíny.



Výsledný asynchronní moment lze popsat třemi složkami [4]:

$$\begin{aligned}
 m_{AS} &= m_d' + m_d'' + m_q'' = \\
 &= \frac{u_s^2}{2} \left[ \left( \frac{1}{x_d'} - \frac{1}{x_d} \right) \frac{s \cdot T_d'}{1 + s^2 T_d'^2} + \left( \frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_d'} \right) \frac{s \cdot T_d''}{1 + s^2 T_d''^2} \right. \\
 &\quad \left. + \left( \frac{1}{x_q''} - \frac{1}{x_q} \right) \frac{s \cdot T_q''}{1 + s^2 T_q''^2} \right] \quad (11)
 \end{aligned}$$

Víše uvedené poměry při asynchronním chodu jsou závislé na zapojení budícího vinutí, rozebraných v kapitolách 1.3.2 a 1.3.3.

Po přechodu synchronního stroje do asynchronního chodu začne stroj odebírat zvýšený jalový výkon induktivního charakteru potřebný (60 až 80%  $S_N$ ). Z důvodu zvýšených magnetizačních ztrát, to způsobí pokles napětí na přípojnicích vyvedení výkonu a vlastní spotřeby. Tento jalový výkon je dodáván ostatními alternátory, což často vede k nutnosti přejít na záložní napájení vlastní spotřeby z nezávislého zdroje.

### 1.3.2 Budící obvod přerušovaný

Rotor alternátoru lze zde uvažovat za klec asynchronního stroje s variabilním odporem. Příčinou je že, při nižší hodnotě skluzu proniká proud hlouběji do drážek rotoru stroje, a tedy snižuje odpor. Dále lze uvažovat téměř minimální změny indukčnosti, z důvodu malé magnetické nesymetrie rotoru [4].

Rotor se otáčí úhlovou rychlostí  $\omega_R = \omega_{synchr}(1 + s)$ , dochází k indukování proudů do rotoru, kde vytváří magnetické pole opožděné vůči rotoru s úhlovou rychlostí  $\omega_r = -s \cdot \omega_{synchr}$ . Toto vzniklé magnetické pole je unášeno rotorem s úhlovou rychlostí  $\omega_R$ . Z toho plyne, že se pole rotoru oproti synchronnímu statorovému poli nepohybuje, tedy lze psát  $\omega_r + \omega_R = \omega_{synchr}$ . Dochází tak ke vzniku konstantního momentu, a síti je tedy dodáván konstantní činný výkon. U těchto konstantních hodnot může docházet ke kolísání, které je způsobeno magnetickou nesymetrií tlumiče v příčné a podélné ose.

### 1.3.3 Budící obvod uzavřený

Při tomto stavu dochází k indukování proudu o skluzové frekvenci v budícím vinutí. Toto vzniklé pulsující magnetické pole je zde totožně unášeno rotorem s úhlovou rychlostí  $\omega_R = \omega_{synchr}(1 + s)$ , jako v předchozí variantě zapojení budícího vinutí. Provedeme náhradu pulsujícího pole za dvě totožná pole s poloviční amplitudou, jejichž vzájemnou rychlost definujeme jako  $s \cdot \omega_{synchr}$ . První z těchto složek položíme do nehybného stavu vůči poli statoru, druhá rotuje úhlovou rychlostí  $\omega_{synchr}(1 + s)$  a vytvoří střídavé proudy dané frekvence. Tyto střídavé proudy způsobí výrazné kmitání statorových proudů. [4]

Pro získání výsledného momentu je nutné provést superpozici momentů. Tyto dílčí momenty vznikají reakcí všech polí. Konstantních velikostí s totožnou úhlovou rychlostí a polí s proměnou velikostí a odlišnou úhlovou rychlostí. Vliv kyvů je možno snížit připojením odporu do rotorového vinutí, na úkor zmenšení středního momentu. [4]

### 1.3.4 Výhod a nevýhody asynchronního chodu

Asynchronní chod lze připustit pouze při úplné totální ztrátě buzení a za sníženého zatížení činným výkonem. Je nutné tento chod v co nejkratší době synchronním chodem po odstranění poruchy nebo přechodem na zálohu budícího systému.

Hlavní nebezpečí asynchronního chodu jsou především [4]:

- Značný ohřev statoru a rotoru způsobeny zvýšeným proudovým namáháním
- Na porušeném budícím vinutí dochází k indukci značně vysokého napětí
- Značný odběr induktivního výkonu a pokles velikosti napětí ve vlastní spotřebě vedoucí k nutnosti přechodu na záložní napájení
- Výrazné rozptylové magnetické toky, způsobující ohřev čel alternátoru.
- Kolísání parametrů výkonu

V současnosti je asynchronní chod povolen z důvodu pokračování dodávky činného výkonu do ES a dobrým zkušenostem u větších alternátorů, kde je skluz způsobený asynchronním chodem malý (0,3%) v mezích viz tabulka níže. Dále střední statorový proud nesmí přesáhnout hodnotu  $1,05I_N$ . [4]

**Tabulka 1. Mezní limity provozu turboalternátorů v asynchronním chodu [4]**

Výkon (MVA)	Do 10 min	Do 30 min	Trvalý chod
62,5	0,6 $P_N$	0,5 $P_N$	0,4 $P_N$
125	0,5 $P_N$	0,4 $P_N$	0,3 $P_N$
235	0,5 $P_N$	0,4 $P_N$	0,3 $P_N$

U alternátorů v provedení hydro, s menším asynchronním moment (0,5 až 0,6  $M_N$ ), vyšší hodnotu skluzu (3 až 5%), případně větší nesymetrie rotoru se asynchronní chod nedoporučuje. [4]

#### 1.4 Metody pro zlepšení stability alternátoru pracujícího do ES

V praktickém provedení se snažíme samozřejmě docílit vyšší stability alternátoru pracujícího do ES. Zde jsou uvedeny metodiky pro zlepšení stability.

- Snížení vazební impedance propojující alternátor s ES. (Využití alternativní trasy přenosu výkonu)
- Snížení přenášeného výkonu před poruchou. (Před provedením rekonfigurace vedení, je provedeno snížení výkonu přenášeného vedením.)
- Rychlost regulace otáček turbíny. (Například vybavení turbíny rychlým řízením ventilů.)
- Rychlost a rozsah regulace buzení. (Využití budící soupravy schopné velice dynamicky provádět změny budícího proudu alternátoru.)
- Rychlost a spolehlivost chránícího systému. (Zmenšení doby trvání zkratu. Moderní chránící systémy jsou schopny tuto dobu redukovat pod 100ms. [1])

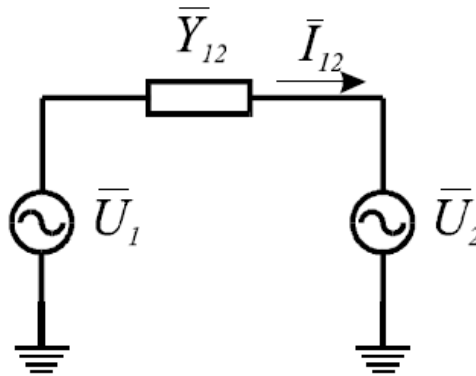
- Vybavení vedení zařízeními systému opětovného zapnutí. (Urychluje návrat vedení na původní úroveň přenášeného výkonu)
- Setrvačnost soustrojí. (Zvýšením hmoty soustrojí lze snížit vliv poruch na alternátor, viz rovnice ( 9 ). Ovšem na úkor snížení schopnosti dynamické regulace výkonu. Problematické s rostoucím podílem obnovitelných zdrojů.)
- Tlumící vinutí alternátoru a činná složka vazební impedance

## 2 Alternátor v synchronním provozu a dodávkou do ES

V této kapitole si přiblížíme standartní provoz alternátoru v synchronním chodu s dodávkou výkonu do elektrizační soustavy. Jakožto klíčový způsob dodávky výkonu pro elektrizační soustavu ČR.

Pro určení rovnic výpočtů dodávky činného a jalového výkonu do ES potřeba definovat potřebné výpočtové náležitosti, které vedou k rovnicím pro výpočet přenosu výkonu. Zde o zjednodušený přenos výkonu z alternátoru do elektrizační soustavy. Toto odvození je postaveno na základě materiálu [5].

### 2.1.1 Odvození přenosu výkonu z alternátoru do ES



Obr. 2.1 Blokové schéma zjednodušeného přenosu výkonu [5]

$$\bar{I}_{12} = (\bar{U}_1 - \bar{U}_2)\bar{Y}_{12} \quad (12)$$

$$S = \bar{U} \cdot \bar{I}_{12}^* = \bar{U}(\bar{U}_1^* - \bar{U}_2^*)\bar{Y}_{12}^* \quad (13)$$

$$\bar{U}_i = U_i \cdot e^{j\vartheta_i} \quad \bar{Y}_{12} \approx \frac{1}{j\omega L_{12}} = \frac{1}{jX_{12}} \quad (14)$$

$$\bar{S}_{12} = (\bar{U}U_1 e^{-j\vartheta_1} - \bar{U}U_2 e^{-j\vartheta_2}) \left( \frac{-j}{X_{12}} \right)^* \quad (15)$$

$$\bar{S}_2 = (U_2 U_1 e^{j(\vartheta_2 - \vartheta_1)} - U_2 U_2 e^{j(\vartheta_2 - \vartheta_2)}) \cdot \left( \frac{j}{X_{12}} \right) \quad (16)$$

$$P_2 = \operatorname{Re} \left\{ (U_1 U_2 e^{j(-(\vartheta_1 - \vartheta_2))} - U_2^2) \left( \frac{j}{X_{12}} \right) \right\} \quad (17)$$

$$P_2 = \operatorname{Re} \left\{ \frac{U_1 U_2}{X_{12}} j (\cos(-\Delta\vartheta) + j \sin(-\Delta\vartheta)) \right\} \quad (18)$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_2 \quad (19)$$

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin \Delta\vartheta \quad (20)$$

$$Q_2 = \operatorname{Im} \left\{ \frac{U_1 U_2}{X_{12}} j (\cos(-\Delta\vartheta) + j \sin(-\Delta\vartheta)) - \frac{j U_2^2}{X_{12}} \right\} \quad (21)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \cos \Delta\vartheta - \frac{U_2^2}{X_{12}} \quad (22)$$

$$P_1 = \operatorname{Re} \left\{ (U_1 U_1 e^{j(\vartheta_1 - \vartheta_2)} - U_1 U_2 e^{j(\vartheta_1 - \vartheta_2)}) \left( \frac{j}{X_{12}} \right) \right\} \quad (23)$$

$$P_1 = \operatorname{Re} \left\{ \frac{j U_1^2}{X_{12}} - \frac{U_1 U_2}{X_{12}} j (\cos(\Delta\vartheta) + j \sin(\Delta\vartheta)) \right\} \quad (24)$$

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_2 \quad (25)$$

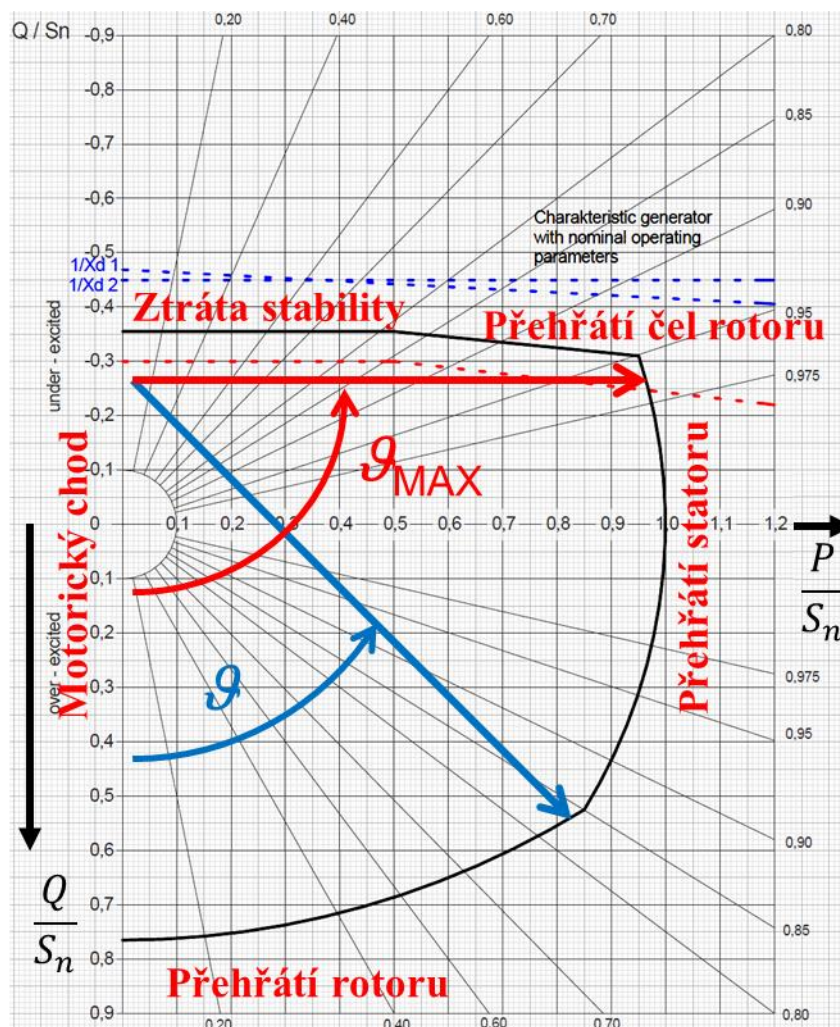
$$P_1 = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin \Delta\vartheta \quad (26)$$

$$Q_1 = \operatorname{Im} \left\{ \frac{jU_1^2}{X_{12}} - \frac{U_1 U_2}{X_{12}} j(\cos(\Delta\vartheta) + j \sin(\Delta\vartheta)) \right\} \quad (27)$$

$$Q_1 = \frac{U_2^2}{X_{12}} - \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \cos \Delta\vartheta \quad (28)$$

### 2.1.2 Pracovní oblast alternátoru

Samotná pracovní oblast alternátoru je omezena několika konstrukčními a provozními parametry. Tato omezení lze zaneš pomocí křivek do os činného a jalového výkonu. Tím vytvořit provozní P-Q diagram alternátoru.



Obr. 2.2 P-Q provozní diagram alternátoru [8]

### **3 Možnosti modelování alternátoru**

V této kapitole si přiblížíme dvě hlavní varianty výpočtového modelování synchronního alternátoru. (Obě možnosti modelování jsou postaveny na řešení náhradního schéma synchronního stroje.) Následně jsme jednu z metod použili k vytvoření modelového bloku synchronního alternátoru v nástroji DYNAST.

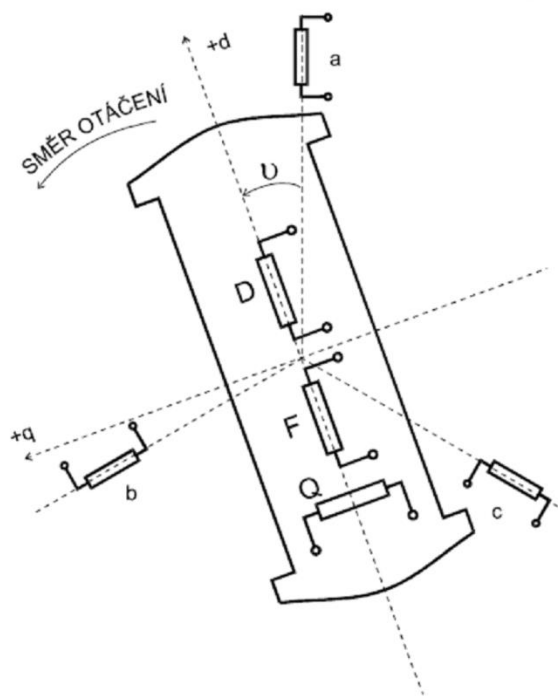
#### **3.1 Předpoklady pro modelování**

Než přistoupíme k jednotlivým metodám, je velice vhodné vytknout společná zjednodušení pro řešení přechodných jevů v obvodech synchronního stroje (podrobněji rozepsány v publikaci [6]):

- Uvažujeme přibližně konstantní úhlová rychlost v průběhu přechodného děje.
- Veškeré tlumicí obvody jsou nahrazeny jedním v podélné a jedním v příčné ose.
- Sinusové rozprostření magnetometrického napětí uvnitř vzduchové mezery.

Pro oba případy lze uvažovat následující schématické znázornění elektrických obvodů. Pro toto schéma budeme následně budovat rovnice pro samotný výpočet synchronního stroje.





**Obr. 3.1** Schématické znázornění elektrických obvodů synchronního stroje [7]

Je vhodné zdůraznit, že orientace proudů a indukovaných napětí byla zvolena na základě materiálu [6], kde je uvedeno podrobnější vysvětlení. Kladné směry orientace proudů statorového vinutí jsou v tzv. „generátorickém systému“, na rozdíl od orientace rotorových proudů, kde kladný směr znázorňuje tzv. „motorický systém“ [6].

### 3.1.1 Parkova transformace

Jak již bylo řečeno, Parkova transformace zajišťuje transformaci statorových veličin do souřadného systému rotoru. Tedy z ABC statického souřadného systému do d, q rotujícího souřadného systému. Jehož osy jsou položeny do podélné a příčné osy rotoru (Obr. 3.1). Dále je nutné uvést hlavní podmínku pro bezchybnou funkci Parkovy transformace. Tedy nutnost linearitu systému určeného k transformaci.

Parkovu transformaci zapisujeme pomocí matice v následujícím univerzálním znění:

$$\mathbf{f}_P = \frac{2}{3} \mathbf{P} \mathbf{f}; \quad \mathbf{f} = \mathbf{P}_z \mathbf{f}_P; \quad \mathbf{f} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix}; \quad \mathbf{f}_P = \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\gamma + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin \gamma & \sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\gamma + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\mathbf{P}_z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 1 \\ \cos\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \\ \cos\left(\gamma + \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\gamma + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

Transformace souřadného systému dle ( 29 ), je považována za jednoznačnou. Z důvodu nenulového determinantu soustavy.

$$\begin{vmatrix} \cos \gamma & \cos\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\gamma + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin \gamma & \sin\left(\gamma - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\gamma + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{vmatrix} = -\frac{3}{4}\sqrt{3} \quad (32)$$

Výkon v d, q, 0 složkách vyjadřujeme následujícím níže uvedeným způsobem. Je však nutné zdůraznit, že tato transformace nesplňuje princip invariance výkonů (Vysvětlené v materiálu [10]).

$$p = \mathbf{U}^T \mathbf{I} = (\mathbf{P}_z \mathbf{U}_P) * \mathbf{P}_z \mathbf{I}_P = \mathbf{U}_P^T \mathbf{P}_z^T \mathbf{P}_z \mathbf{I}_P$$

$$\mathbf{P}_z^T \mathbf{P}_z = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (33)$$

To následně vede ke konečnému vzorci pro výkon v d, q, 0 složkách. V následujícím znění:

$$p = \frac{3}{2} u_d i_d + \frac{3}{2} u_q i_q + \frac{3}{2} u_0 i_0 \quad (34)$$

### 3.2 Model v A, B, C souřadném systému

Označení této varianty modelu synchronního stroje vyplývá z pohledu na souřadný systém, v němž jsou provedeny rovnice popisující statorové vinutí a ve kterém následně probíhá samotný výpočet přechodného jevu synchronního stroje. Dále je nutno uvažovat:

- Soustředění toků v jednom bodu pro každou fázi (neuvažuje se plošné rozložení pólu).

Z těchto poznatků vyplývá, že synchronní stroj v A, B, C souřadném systému lze popsat následujícími rovnicemi [6]:

$$\begin{aligned}
 u_a &= -Ri_a - \frac{d\Psi_a}{dt}; & u_F &= R_F i_F + \frac{d\Psi_F}{dt} \\
 u_b &= -Ri_b - \frac{d\Psi_b}{dt}; & 0 &= R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \\
 u_c &= -Ri_c - \frac{d\Psi_c}{dt}; & 0 &= R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt}
 \end{aligned} \tag{35}$$

Kde:

$$\begin{aligned}
 \Psi_a &= L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + L_{aF} i_F + L_{aD} i_D + L_{aQ} i_Q \\
 \Psi_b &= L_{ba} i_a + L_b i_b + L_{bc} i_c + L_{bF} i_F + L_{bD} i_D + L_{bQ} i_Q \\
 \Psi_c &= L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + L_c i_c + L_{cF} i_F + L_{cD} i_D + L_{cQ} i_Q \\
 \Psi_F &= L_{Fa} i_a + L_{Fb} i_b + L_{Fc} i_c + L_F i_F + L_{FD} i_D \\
 \Psi_D &= L_{Da} i_a + L_{Db} i_b + L_{Dc} i_c + L_{DF} i_F + L_D i_D \\
 \Psi_Q &= L_{Qa} i_a + L_{Qb} i_b + L_{Qc} i_c + L_Q i_Q
 \end{aligned} \tag{36}$$

Následně rozepíšeme indukčnosti, které nejsou konstantní. Protože lépe vystoupí vlastnosti celého systému. Tyto periodické proměny indukčnosti jsou následkem pohybu rotoru vůči statorovým vinutím. Pro lepší přehlednost je lze rozdělit do několika částí [7] a díky zjednodušujícím předpokladům z úvodu kapitoly uvažovat totožné velikost indukčností.

Indukčnosti statoru vůči buzení:

$$\begin{aligned}L_{aF} &= L_{Fa} = L_{aFm} \cos \vartheta \\L_{bF} &= L_{Fb} = L_{aFm} \cos \left( \vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) \\L_{cF} &= L_{Fc} = L_{aFm} \cos \left( \vartheta + \frac{2}{3} \pi \right)\end{aligned} \quad (37)$$

Indukčnosti statoru vůči tlumiči v ose d:

$$\begin{aligned}L_{aD} &= L_{Da} = L_{aDm} \cos \vartheta \\L_{bD} &= L_{Db} = L_{aDm} \cos \left( \vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) \\L_{cD} &= L_{Dc} = L_{aDm} \cos \left( \vartheta + \frac{2}{3} \pi \right)\end{aligned} \quad (38)$$

Indukčnosti statoru vůči tlumiči v ose q:

$$\begin{aligned}L_{aQ} &= L_{Qa} = L_{aQm} \cos \left( \vartheta - \frac{1}{2} \pi \right) \\L_{bQ} &= L_{Qb} = L_{aQm} \cos \left( \vartheta - \frac{2}{3} \pi + \frac{1}{2} \pi \right) \\L_{cQ} &= L_{Qc} = L_{aQm} \cos \left( \vartheta + \frac{2}{3} \pi + \frac{1}{2} \pi \right)\end{aligned} \quad (39)$$

Vlastní indukčnosti statoru:

$$\begin{aligned}L_a &= L_{aa} = L_{a0} + L_2 \cos(2\vartheta) \\L_b &= L_{bb} = L_{b0} + L_2 \cos \left[ 2 \left( \vartheta - \frac{2}{3} \pi \right) \right] \\L_c &= L_{cc} = L_{c0} + L_2 \cos \left[ 2 \left( \vartheta + \frac{2}{3} \pi \right) \right]\end{aligned} \quad (40)$$

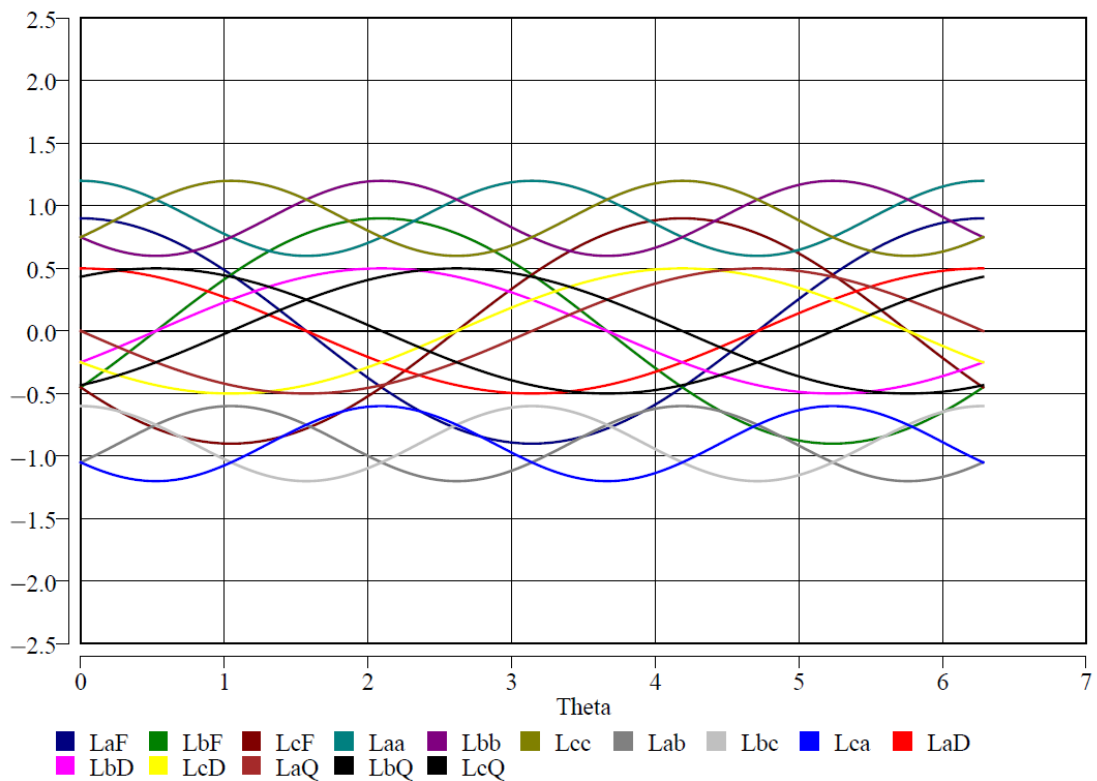
Vzájemné indukčnosti statoru:

$$L_{bc} = -L_{ab0} + L_2 \cos(2\vartheta)$$

$$L_{ca} = -L_{ab0} + L_2 \cos\left[2\left(\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right)\right]$$

$$L_{ab} = L_{ab0} + L_2 \cos\left[2\left(\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right)\right]$$
(41)

Pokud si zobrazíme závislosti indukčností synchronního stroje v A, B, C souřadném systému v průběhu zátěžného úhlu, dostaneme výrazně komplikovaný graf:



**Obr. 3.2 Grafické znázornění indukčností synchronního stroje v A, B, C [9]**

### **3.2.1 Shrnutí modelu v ABC**

Shrnutím významných poznatků k modelu synchronního stroje v A, B, C souřadném systému dospějeme k následujícímu:

- + Nevyžaduje transformaci souřadného systému.
- + Umožňuje zahrnout magnetické sycení a magnetické toky nemusí být lineární.
- + Nevyžaduje plnou symetrii vinutí vůči podélným a příčným osám, lze řešit nesymetrické zatížení stroje.
- Vyžaduje soustředění toků v jednom bodu.
- Indukčnosti jsou proměnné a závislé na poloze rotoru.
- Náročnější výpočty magnetických toků (diferenciální rovnice jsou rozsáhlejší)
- Náročnější řešení přechodných jevů.

### **3.3 Model v d, q, 0 souřadném systému**

Označení této varianty modelu synchronního stroje vyplývá z pohledu na souřadný systém, v němž jsou provedeny rovnice popisující statorové vinutí a ve kterém následně probíhá samotný výpočet přechodného jevu synchronního stroje.

Pro správnou funkci modelu v d-q-0 je nutno splnit i následující předpoklady:

- Zanedbání magnetického sycení, a magnetické toky jsou lineární funkcí proudu.
- Uvažujeme plné symetrie vinutí vůči jejich podélným a příčným osám.

Z důvodu periodických změn indukčností je patrná vhodnost eliminace těchto změn z rovnic ( 35 ). Eliminace je provedena vyjádřením statorových veličin v souřadné soustavě rotoru. Tento postup se provádí pomocí tzv. Parkova transformace, která nám toto vyjádření zprostředkuje. Po vyřešení přechodného jevu je provedena zpětná inverzní transformace k převedení opět na statorové veličiny v A, B, C souřadném systému.

Provedením (Parkovy) transformace napěťových rovnic ( 35 ) a rovnic ( 36 ) dochází k úpravě do následujícího tvaru. Jednotlivé podrobné kroky jsou rozepsány v materiálu [6]:

$$\begin{aligned}
 u_d &= -Ri_d - \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega\Psi_q; & u_F &= R_F i_F + \frac{d\Psi_F}{dt} \\
 u_q &= -Ri_q - \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega\Psi_d; & 0 &= R_D i_D + \frac{d\Psi_D}{dt} \\
 u_0 &= -Ri_0 - \frac{d\Psi_0}{dt}; & 0 &= R_Q i_Q + \frac{d\Psi_Q}{dt}
 \end{aligned} \tag{42}$$

$$\Psi_d = L_d i_d + L_{dF} i_F + L_{dD} i_D$$

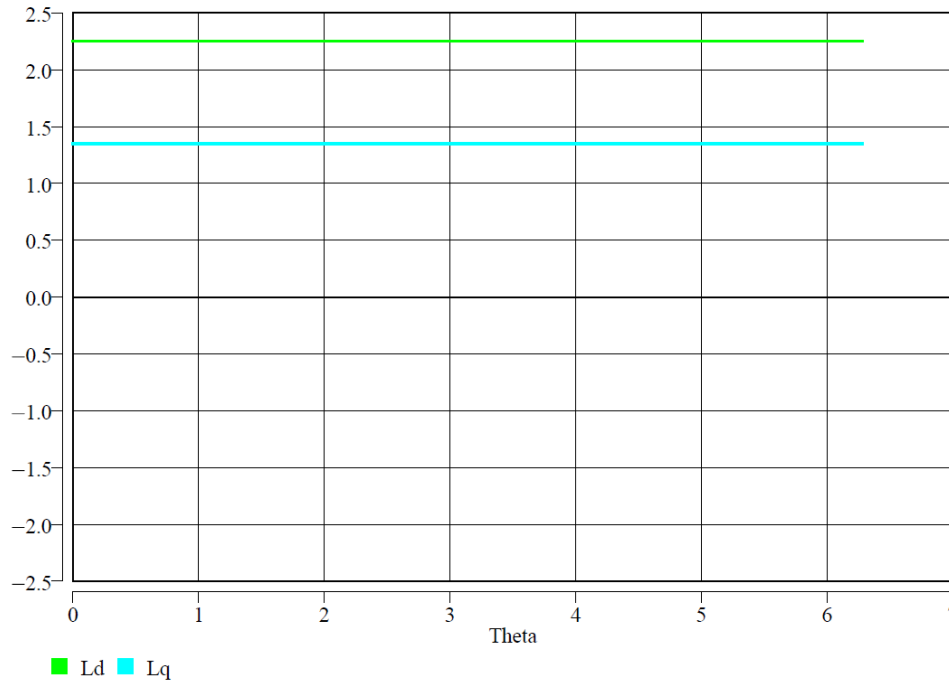
$$\Psi_q = L_q i_q + L_{qQ} i_Q$$

$$\Psi_F = L_{dF} i_d + L_F i_F + L_{FD} i_D \tag{43}$$

$$\Psi_D = L_{dD} i_d + L_{FD} i_F + L_D i_D$$

$$\Psi_Q = L_{qQ} i_q + L_Q i_Q$$

Pokud si zobrazíme závislosti indukčností synchronního stroje v d, q, 0 souřadném systému v průběhu zátěžného úhlu, dostaneme výrazně zjednodušené závislosti (oproti průběhu indukčností v ABC souřadném systému Obr. 3.2):



**Obr. 3.3 Grafické znázornění indukčností synchronního stroje v d, q, 0 [9]**

Pro praktické výpočtový se ve většině případů používají rovnice uvedené v poměrných hodnotách. V praxi není určena jednotná poměrná soustava, proto je nutné určit soustavu použitou dále. Budeme užívat tzv. „vzájemnou soustavu poměrných hodnot“ [6]. Ve které platí rovnost poměrných hodnot vzájemných indukčností synchronního stroje v osách d a q.

$$\begin{aligned}
 l_d &= l_{d\sigma} + l_{ad}; & l_F &= l_{F\sigma} + l_{ad} \\
 l_q &= l_{q\sigma} + l_{aq}; & l_D &= l_{D\sigma} + l_{ad} \\
 & & l_Q &= l_{Q\sigma} + l_{aq}
 \end{aligned}
 \tag{44}$$



Aplikací soustavy poměrných hodnot na napěťové rovnice ( 42 ) a rovnice toků ( 43 ) přecházejí do následujícího tvaru:

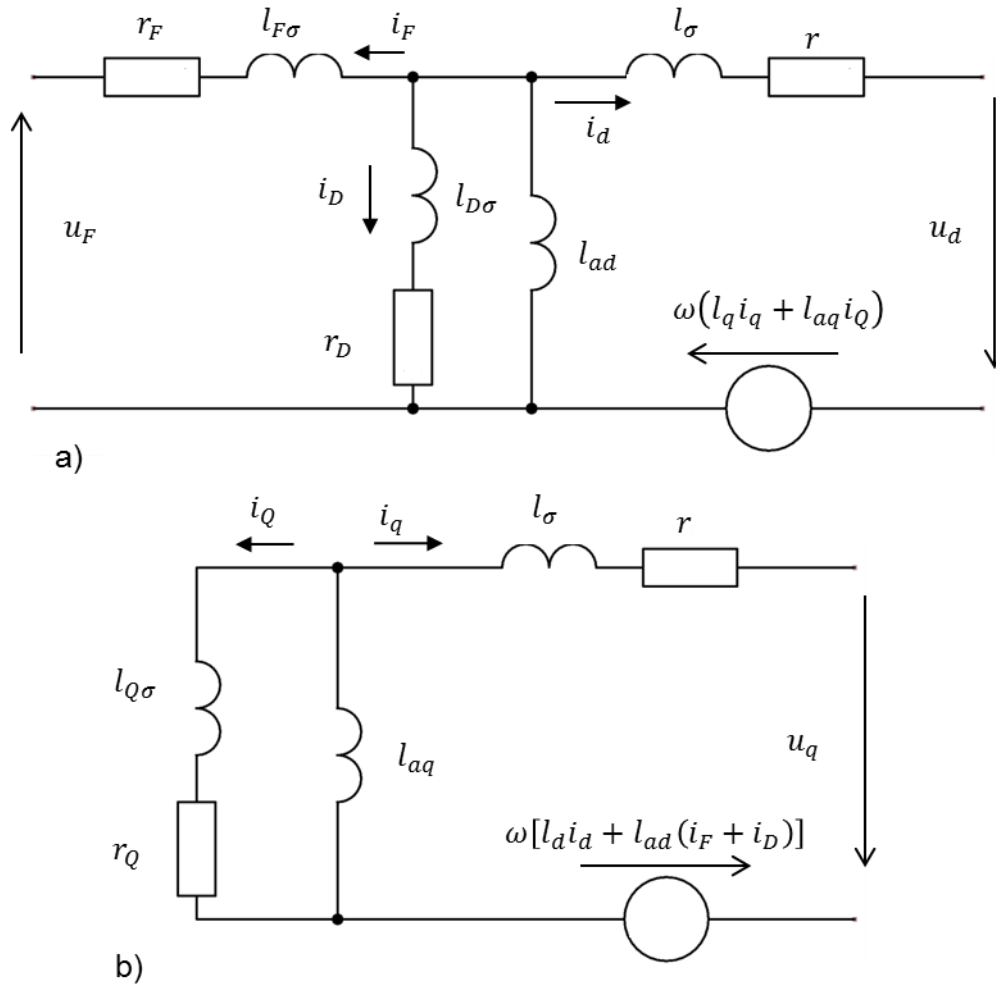
$$\begin{aligned}
 u_d &= -ri_d - \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q; & u_F &= r_F i_F + \frac{d\psi_F}{dt} \\
 u_q &= -ri_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d; & 0 &= r_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \\
 u_0 &= -ri_0 - \frac{d\psi_0}{dt}; & 0 &= r_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt}
 \end{aligned} \tag{45}$$

$$\begin{aligned}
 \psi_d &= l_a i_d + l_{dF} i_F + l_{dD} i_D \\
 \psi &= l_q i_q + l_{qQ} i_Q \\
 \psi_0 &= l_0 i_0 \\
 \psi_F &= l_{dF} i_d + l_F i_F + l_{FD} i_D \\
 \psi_D &= l_{dD} i_d + l_{FD} i_F + l_D i_D \\
 \psi_Q &= l_{qQ} i_q + l_Q i_Q
 \end{aligned} \tag{46}$$

Dosazením rovnic ( 46 ) do ( 45 ) získáme soustavu rovnic popisující elektromagnetické chování stroje, které dále upravíme dosazením vztahů ( 44 ). Aplikací těchto rovnic nahrazuje magnetické vazby vazbami elektrickými, protože vzájemné indukčnosti obvodů umístěných v ose d jsou stejné ( $l_{ad}$ ), stejně tak i vzájemné indukčnosti v ose q lze považovat za totožné ( $l_{aq}$ ). Poupravené výsledné rovnice lze zapsat jako:

$$\begin{aligned}
 u_d &= -ri_d - l_\sigma \frac{di_d}{dx} - l_{ad} \frac{d(i_d + i_F + i_D)}{dt} - \omega(l_q i_q + l_{aq} i_Q) \\
 u_q &= -ri_q - l_\sigma \frac{di_q}{dt} - l_{ad} \frac{d(i_d + i_F + i_D)}{dt} - \omega(l_q i_q + l_{aq} i_Q) \\
 u_f &= r_F i_d + l_{F\sigma} \frac{di_F}{dt} + l_{ad} \frac{d(i_d + i_F + i_D)}{dt} \\
 0 &= r_D i_D + l_{D\sigma} \frac{di_D}{dt} + l_{ad} \frac{d(i_d + i_F + i_D)}{dt} \\
 0 &= r_Q i_Q + l_{Q\sigma} \frac{di_Q}{dt} + l_{aq} \frac{d(i_d + i_Q)}{dt}
 \end{aligned} \tag{47}$$

Z těchto rovni lze sestavit náhradní schéma synchronního stroje v d,q,0 souřadném systému. Náhradní schéma je rozděleno do dvou obvodů a označeno podle jednotlivých os souřadného systému.



Obr. 3.4 Náhradní schéma synchronního stroje pro a) podélnou b) příčnou osu [6]

### **3.3.1 Shrnutí modelu v $d, q, 0$**

Shrnutím významných poznatků k modelu synchronního stroje v  $d, q, 0$  souřadném systému dospějeme k následujícímu (Vlastnosti vyplývají především z výhod a nevýhod transformace):

- + Nevyžaduje soustředění toků v jednom bodu.
- + Indukčnosti jsou konstantní a nezávislé na poloze rotoru.
- + Jednodušší řešení přechodných jevů.
- + Nevyžaduje soustředění toků v jednom bodu.
- Vyžaduje transformaci souřadného systému.
- Vyžaduje plnou symetrii vinutí vůči podélným a příčným osám.
- Při magnetickém sycení a nelineární závislosti magnetických toků na proudu (Dochází k selhávání transformace.).

### **3.4 Tvorba modelu**

V této podkapitole jsme vytvořili model synchronního stroje v simulačním nástroji, který využívá jednu z více uvedených metod. Konkrétně modelování řešení pomocí rovnic v  $d, q, 0$  rotujícím souřadném systému popsán v předchozí podkapitole 3.3.

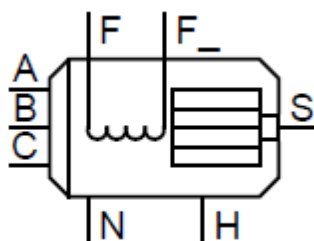
Pro tvorbu vlastního modelu byl použit simulační systém DYNAST. Který byl zvolen pro své vhodné vlastnosti, veřejnou dostupnost, uživatelskou přístupnost. Dále pro zkušeností získané při studiu a v neposlední řadě značnou zkušenost vedoucího práce s prací v tomto simulačním nástroji. Dalším důvodem je již existence modelů využívající Parka v simulačních systémech. Například na platformě MATLAB (Simulink + knihovna SimPowerSystems), EMPT-ATP, případně síťový simulátor MODES.

První verzi modelu jsem sestavil pomocí charakteristických rovnic pro daný fyzikální systém a předpokladu jediného výsledného blokového submodelu, který by byl uvažován pro připojení na vnější elektrické a mechanické rozhraní. Bohužel přes značné úsilí, které jsem věnoval tvorbě a odlaďování funkčnosti modelu jsem se tento koncept rozhodl nakonec opustit a nahradit jiným vhodnějším. Hlavní příčinou mého rozhodnutí byla především přílišná složitost a nepřehlednost již v rané fázi vývoje.

Výsledný zprovozněný a zde popisovaný model je tvořen pomocí menších funkcionálních bloků, vhodnější jak pro snazší orientaci a přehlednost, tak možnost separace a dílčího testování správné funkce těchto jednotlivých bloků. Model byl vytvořen za značného přispění vedoucího práce doc. Ing. Karla Noháče, Ph.D. Z tohoto důvodu budou některé části publikovány ve zkrácené formě.

### 3.4.1 Vlastní model

Vlastní model synchronního stroje je vytvořen v nástroji DYNAST jako submodel a poměrných jednotek s využitím Parkovy transformace. Jedná se o model aproximace třetího řádu, tedy je tvořen třemi diferenciálními rovnicemi.



**Obr. 3.5** Výsledný model synchronního stroje

Model je připojen s vnějším uspořádáním pomocí těchto vnějších proměnných:

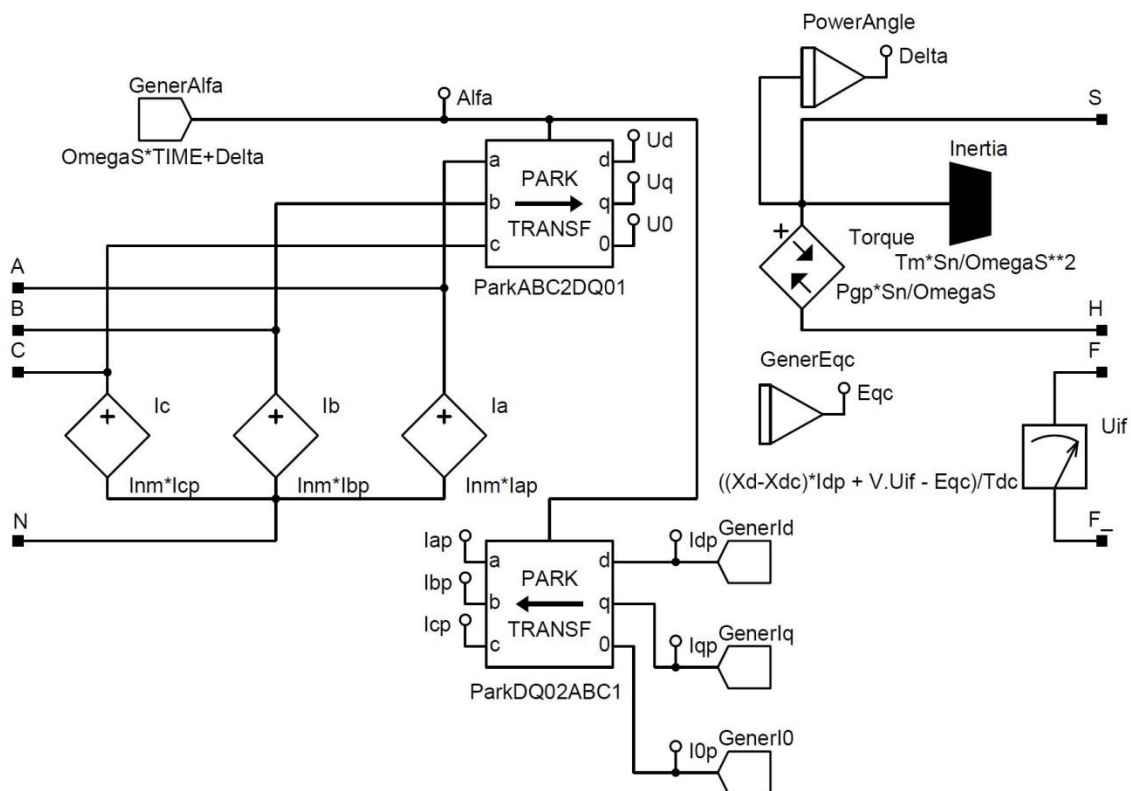
- A,B,C ..... Jednotlivá statorová vinutí (V)
- F ..... Vstupní svorka pro budicí systém (V)
- F- ..... Výstupní svorka pro budicí systém (V)
- S ..... Hřídel stroje (rad/s)
- H..... Mechanické pouzdro (rad/s)
- N..... Uzel statoru (V)

Vstupními parametry stroje potřebné pro model jsou:

$$S_n \text{ (MVA)}, U_n \text{ (kV)}, x_d \text{ (-)}, x_{dc} \text{ (-)}, x_q \text{ (-)}, r_s \text{ (-)}, T_{dc} \text{ (s)}, T_m \text{ (s)}$$

Principiálně model pracuje realizací kroků. Proběhne výpočet proudů  $i_d$ ,  $i_q$ ,  $i_0$  z rovnic ( 50 ). Poté je provedena inverzní Parkova transformace proudů a úpravy popsané ( 51 ), tyto získané proudy jsou pomocí proudových zdrojů injektovány do statorových vinutí. Následně je provedena Parkova transformace napětí a úpravy popsané ( 49 ), které jsou potřebné pro určení činného a jalového výkonu ( 52 ). Následně jsou vyřešeny diferenciální rovnice ( 48 ).

Jak již bylo řečeno, model je složen z několika bloků. Některé jsou nově vytvořeny (PARK TRANSF), případně jsou použity předdefinované prvky z knihoven nástroje DYNAST. Jenž jsou vysvětleny a popsány [12].



Obr. 3.6 Vnitřní uspořádání částí modelu

Potřebné diferenciální rovnice jsou sestaveny a upraveny dle materiálu [11], zjednodušeny a upraveny do následujících tvarů:

$$\frac{d\delta}{dt} = -\Delta\omega$$

$$J \frac{d\Delta\omega}{dt} = -M_g \leftrightarrow \frac{T_m \cdot S_n}{\omega_s^2} \frac{d\Delta\omega}{dt} = -\frac{p_g \cdot S_n}{\omega_s} \quad (48)$$

$$T'_{d'} \frac{de'_{q'}}{dt} = (x_d - x'_{d'}) \cdot i_d + u_{if} - e'_{q'}$$

Pro určení napětí  $u_d$ ,  $u_q$ ,  $u_0$  je potřeba převést statorová napětí pomocí Parkovy transformace. Transformace je doplněna o převod z pojmenovaných veličin s uvažováním jejich maximální hodnoty i jejich velikosti, do poměrných veličin (pomocí  $U_{nm}$ ).

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3 \cdot U_{nm}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos\left(\alpha - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\alpha + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \sin \alpha & \sin\left(\alpha - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\alpha + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (49)$$

Řešení proudů v Parkově souřadném systému vychází z níže uvedených rovnic [11]:

$$0 = u_q + r_s i_q - e'_{q'} + (x'_{d'} - x_l) i_d$$

$$0 = u_d + r_s i_d - (x'_{d'} - x_l) i_q \quad (50)$$

V těchto rovnicích zanedbáme  $x_l$  (rozptylová reaktance), následně dořešíme a určíme proudy. Poté jsou dosazeny do bloků GenerId, GenerIq, GenerI0.

Po určení proudů  $i_d$  a  $i_q$  je potřeba převést jejich řešení na statorové proudy pomocí inverzní Parkovy transformace. Transformace je doplněna o převod do pojmenovaných veličin s uvažováním jejich maximální hodnoty i jejich velikosti (pomocí  $I_{nm}$ ).

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = I_{nm} \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 1 \\ \cos\left(\alpha - \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\alpha - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \\ \cos\left(\alpha + \frac{2}{3}\pi\right) & \sin\left(\alpha + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (51)$$

Výkony se určují jako [11]:

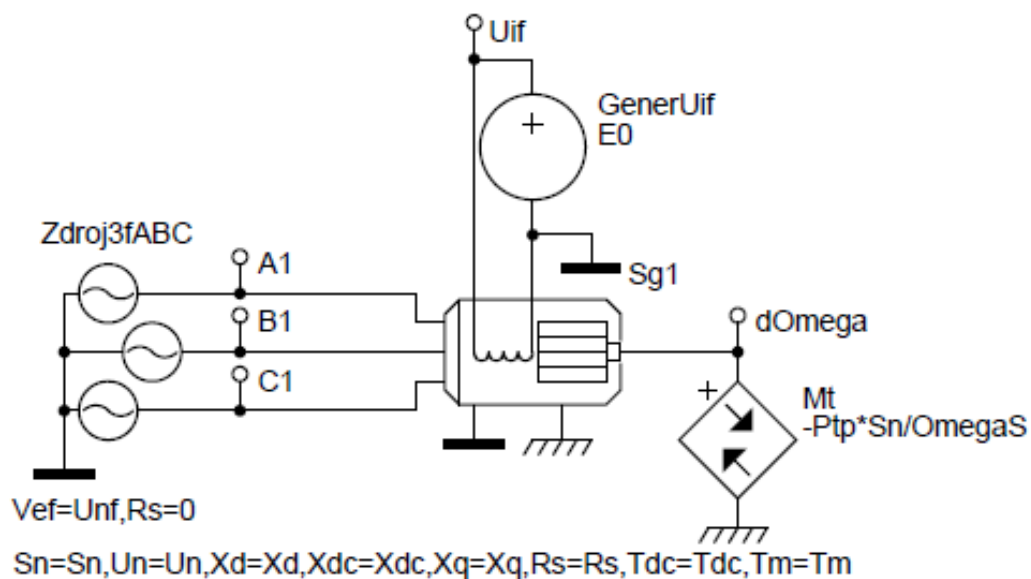
$$p_g = u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q; \quad q_g = -u_q \cdot i_d + u_d \cdot i_q \quad (52)$$

## 4 Řešené úlohy

V této kapitole je řešeno několik netriviálních úloh s využitím modelu (z kapitoly 3.4.1). Na kterých je předvedena, ověřena správná funkce modelu. Porovnáním tvarů průběhů s průběhy modelu v SimPowerSystems. Zde řešené úlohy jsou zaměřeny na skokové nárůsty mechanického výkonu a zkraty na jednom z přívodních vedení.

### 4.1 Navýšení výkonu model v DYNASTU

Pro ukázkou správné funkce modelu v DYNASTU při stabilním a nestabilním přechodném ději je zde realizováno skokového navýšení mechanického výkonu které k těmto stavům povede. V první variantě je navýšení výkonu o 50%, v druhé variantě je výkon navýšen o 100%. Pro obě varianty je blokové schéma totožné.

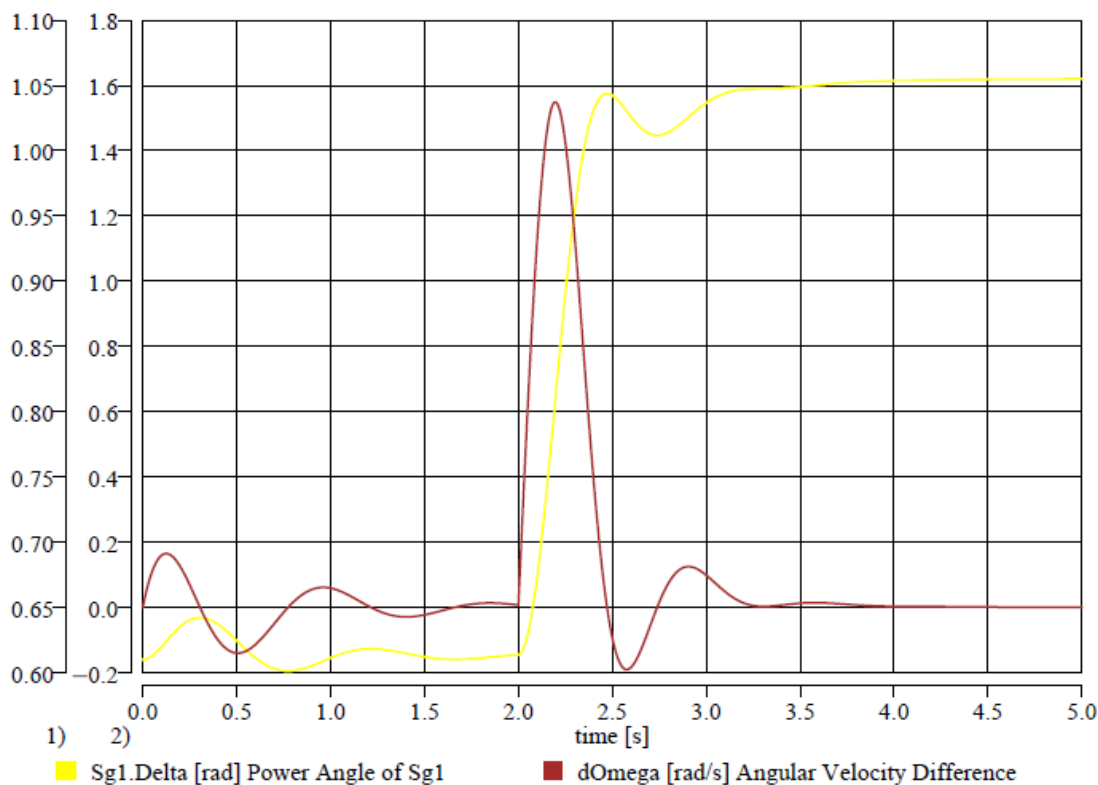


Obr. 4.1 Blokové schéma modelu pro skokové nárůsty mechanického výkonu

Vnitřní elektromotorické napětí  $E0=2.7010$  (-) pro obě varianty navýšení mechanického výkonu.

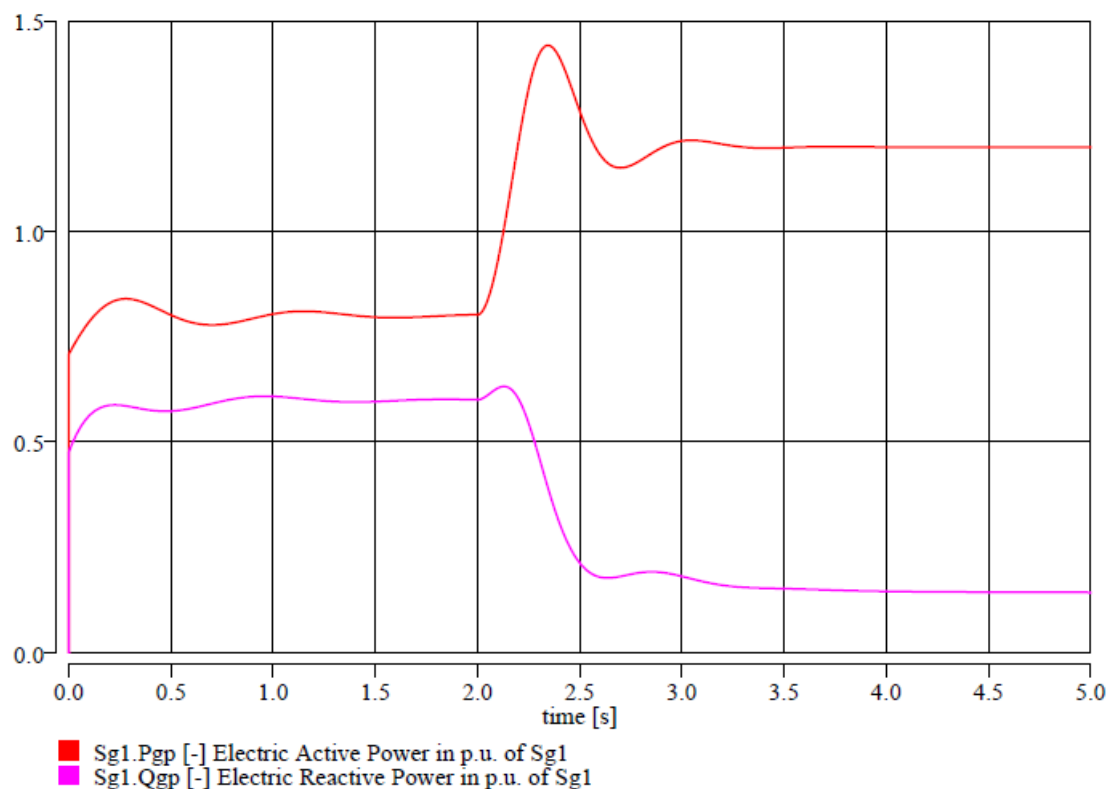


#### 4.1.1 DYNAST - Navýšení výkonu o 50%



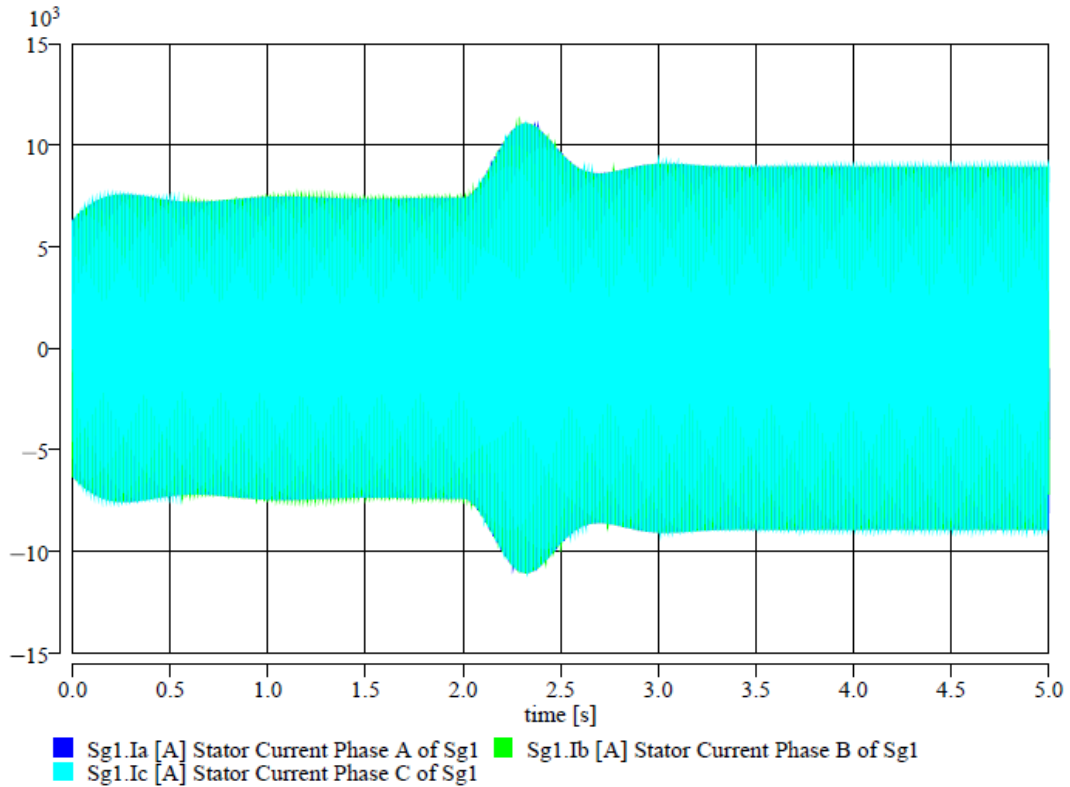
**Obr. 4.2 Průběhy zátěžného úhlu a diferenciální úhlová rychlost při navýšení o 50%**

Z počátku probíhá jemná synchronizace ze stavu blízkého synchronnímu. V čase 2s dochází ke skokovému navýšení mechanického výkonu dodávaného turbínou o 50%. To způsobí urychlování soustrojí a nárůst zátěžného úhlu. K definitivnímu rozhodnutí o charakteru přechodného děje dochází, v okamžiku, kdy diferenciální úhlová rychlost projde nulovou hodnotou (což je přibližně v čase 2,5s). Poté lze přechodný děj prohlásit za stabilní. Výsledný zátěžný úhel se nezvýšil o  $2\pi$ , proto nedošlo k žádnému prokluzu.

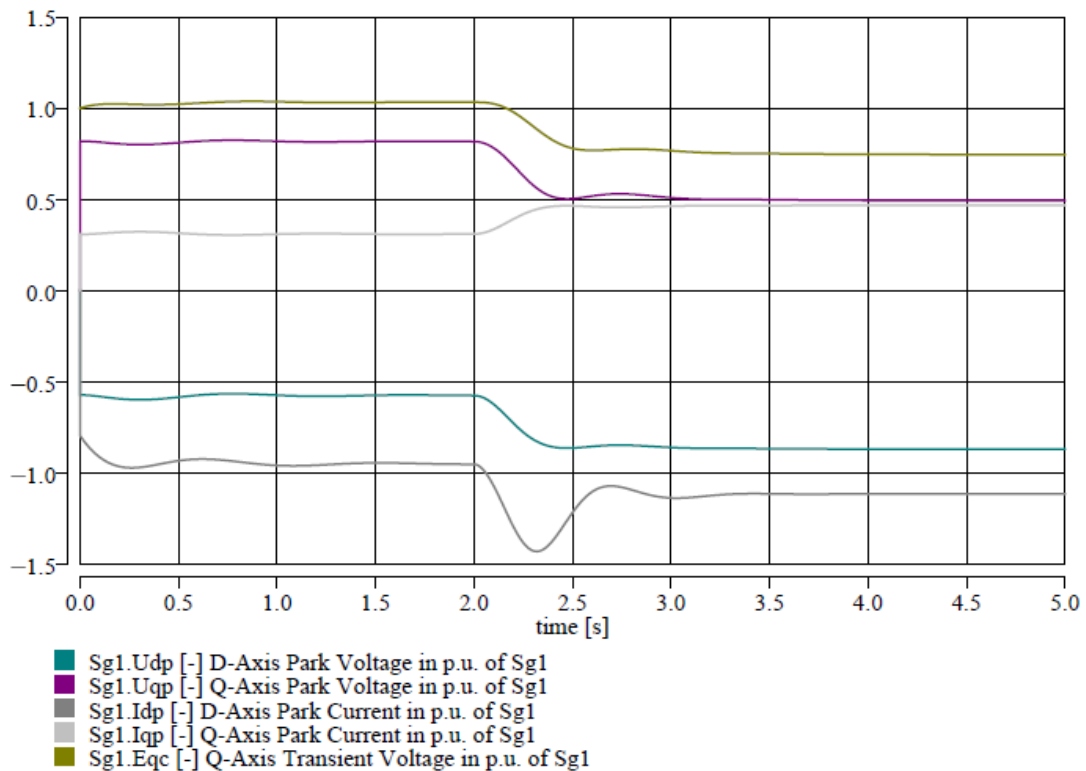


**Obr. 4.3 Průběhy výkonů při navýšení o 50%**

Navýšení mechanického výkonu se projevilo nárůstem činného výkonu a poklesem jalového výkonu. Tento charakter reakce stroje vychází z rovnic ( 2 ) ( 3 ). Současně je snadno identifikovatelný na P-Q diagramu (Obr. 2.2).



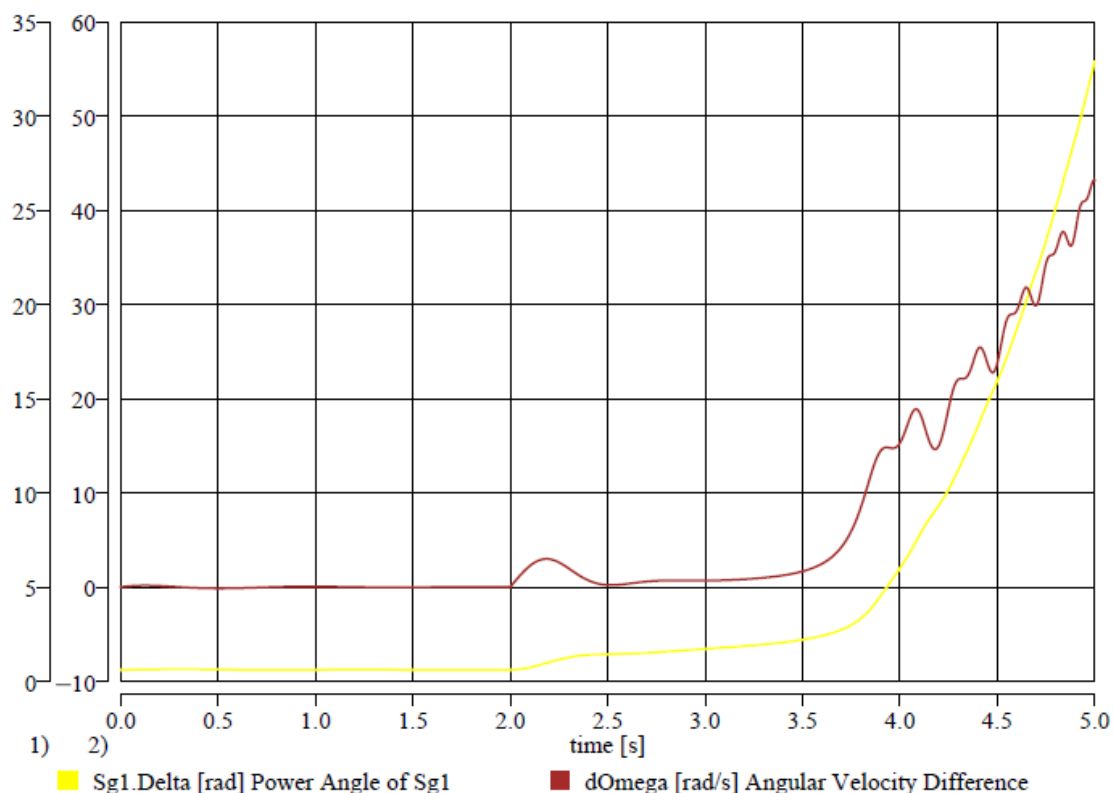
**Obr. 4.4 Statorové proudy při navýšení o 50%**



**Obr. 4.5 Průběhy Parkových napětí, proudů v podélné a příčné ose při navýšení o 50%**

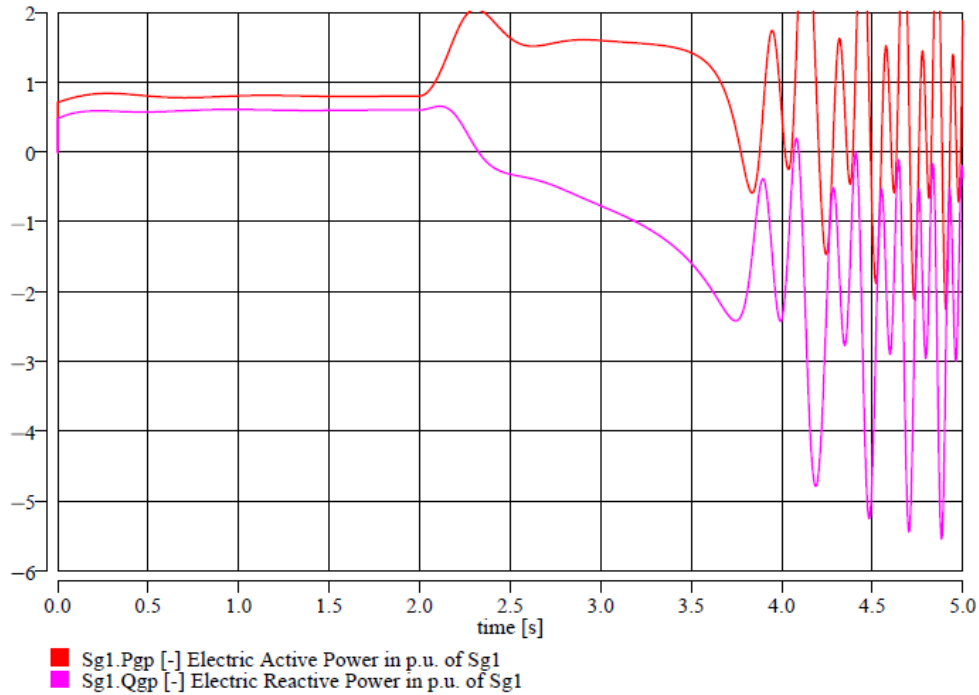
Vývoje změn parkových veličin odpovídají předpokladům plynoucích z navýšení činného výkonu a fázového diagramu alternátoru [7]. Na Obr. 4.4 a Obr. 4.5 je výborně vidět provázání proudů před a po parkově transformaci. Při ustáleném stavu jsou proudy v parkově transformaci konstantní, zatímco přechodné děje způsobí odchylku od konstantních hodnot.

#### 4.1.2 DYNAST - Navýšení výkonu o 100%



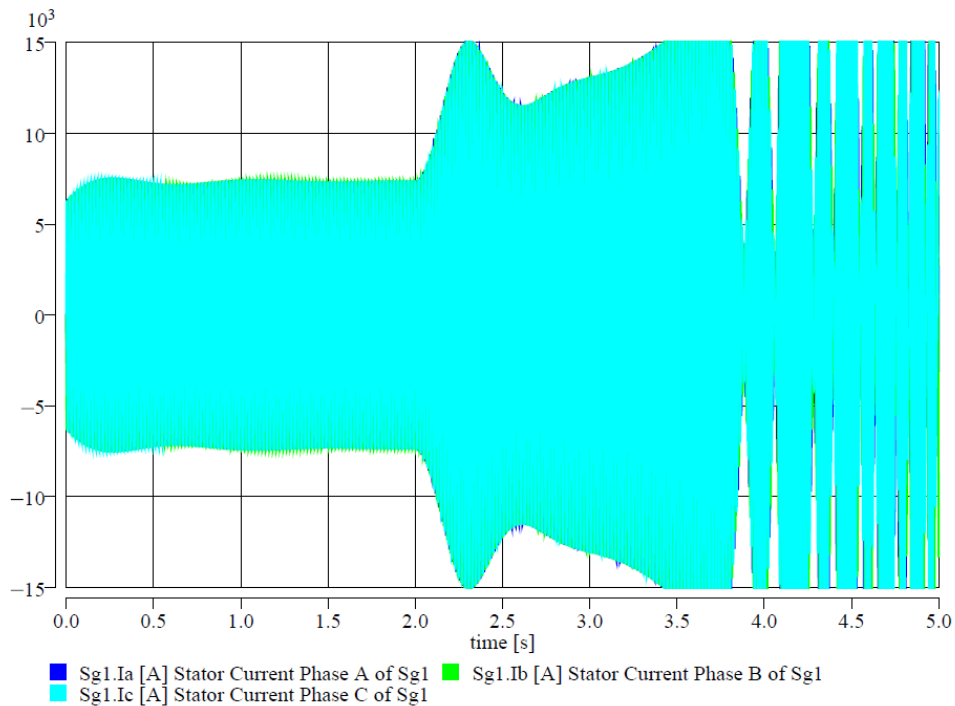
**Obr. 4.6 Průběhy zátěžného úhlu a diferenciální úhlová rychlost při navýšení o 100%**

V čase 2s dochází ke skokovému navýšení mechanického výkonu dodávaného turbínou o 100%. To způsobí zrychlování soustrojí a zvětšování zátěžného úhlu. K rozhodnutí o konečném výsledku přechodného děje vzhledem k stabilitě dochází, v čase přibližně 2,5s, kdy se diferenciální úhlová rychlost přiblíží nulové hodnotě, této hodnoty však nedosáhne. Následně dochází k opětovnému urychlování a zvětšování zátěžného úhlu nade všechny meze. Tedy je přechodný děj nestabilní. Výsledný zátěžný úhel několikanásobně překročil hodnotu  $2\pi$ , i proto je zřejmé, že nedochází ke stabilizaci. Důvodem nestability je trvalá nevyrovnanost mezi výkonem turbíny a brzdným činným elektrickým výkonem dodávaným do sítě.



**Obr. 4.7 Průběhy výkonů při navýšení o 100%**

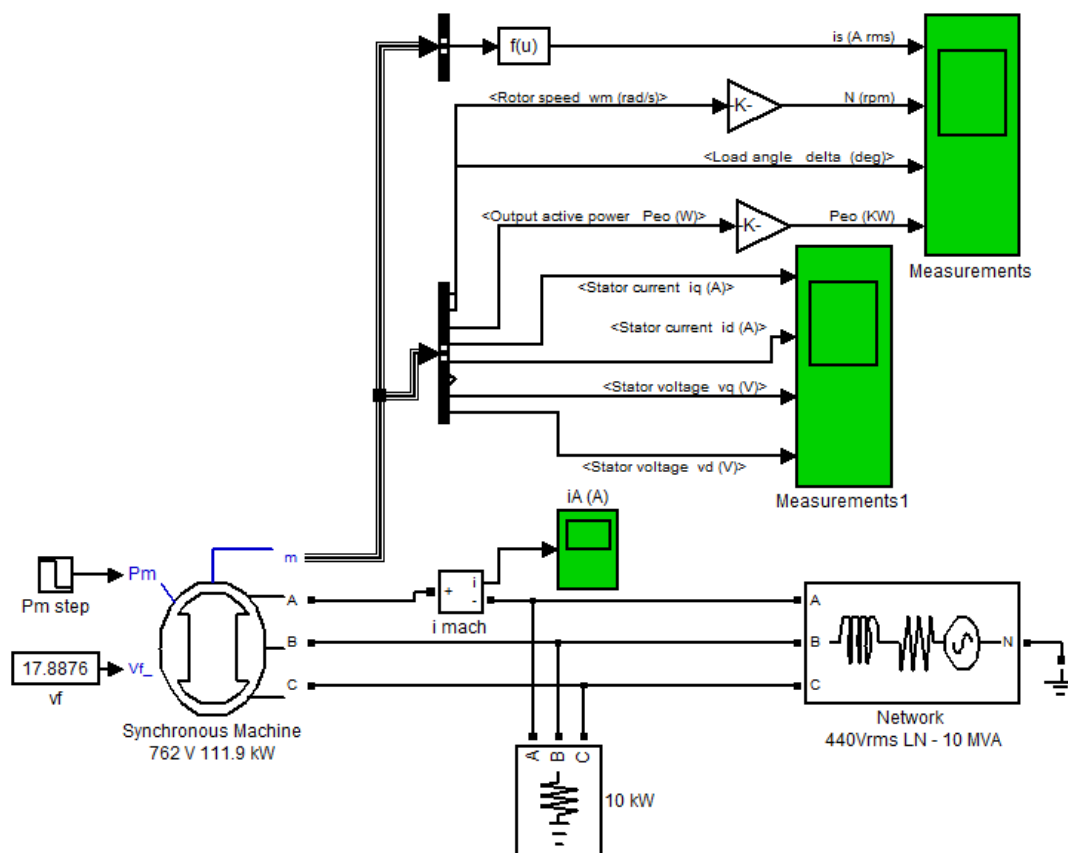
Při pohledu na průběhy jsou patrné značné výkyvy výkonů, především jalového. Toto výrazné pulzování jalového výkonu je způsobeno pokusy alternátoru o vtažení do synchronismu.



**Obr. 4.8 Statorová proudy při navýšení o 100%**

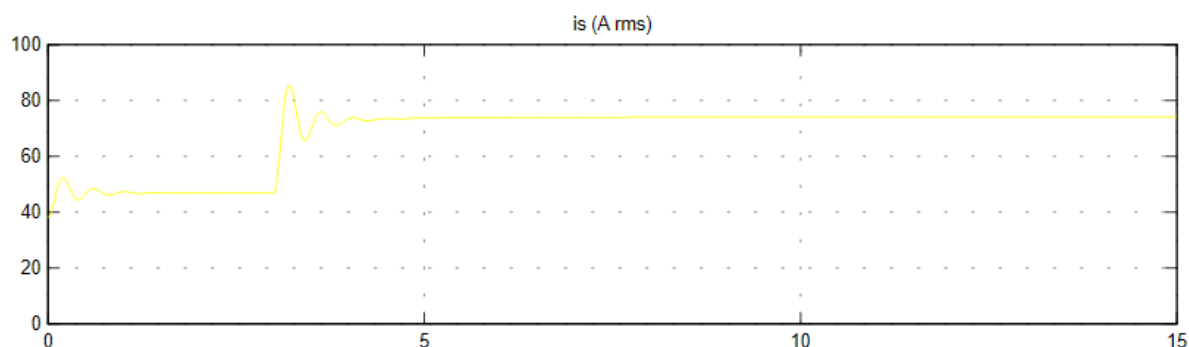
## 4.2 Navýšení výkonu model v SimPowerSystems

Realizujeme zde skokové navýšení mechanického výkonu. V prvním provedení o 50%, v druhém o 100%. Pro možnost ověření tvarů průběhů s modelem DYNAST. Dostupný stroj SimPowerSystems zobrazuje výsledné hodnoty v pojmenovaných jednotkách. Obě navýšení jsou provedena s využitím totožného blokového schéma modelu. Výsledné průběhy jsou očekávány přibližně totožným průběhem. Rozdílnost je způsobena použitím modelu šestého řádu, který již uvažuje i elektromagnetické přechodné děje.



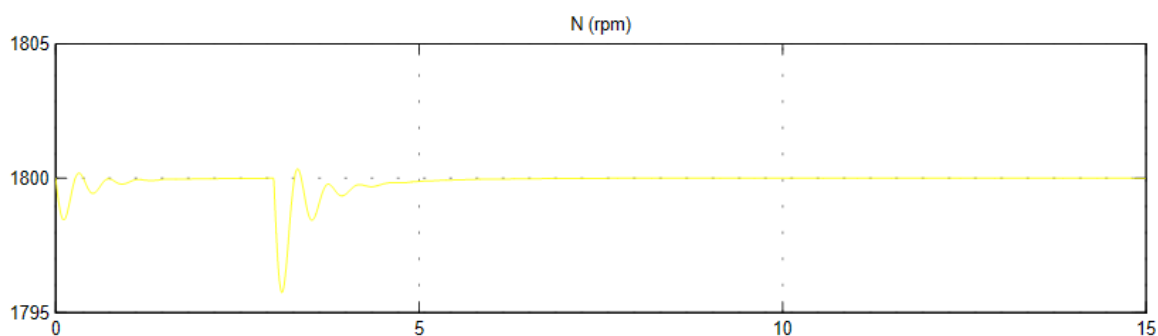
Obr. 4.9 Blokové schéma modelu v Simulinku

#### 4.2.1 Navýšení výkonu o 50%



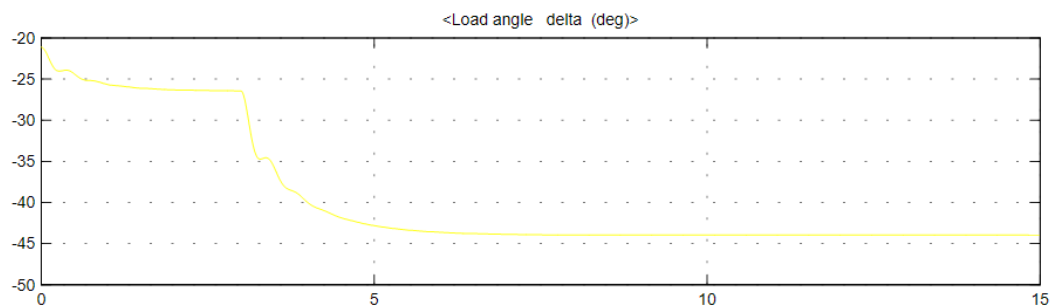
Obr. 4.10 Statorový proud navýšení výkonu o 50% Simulink

Průběh proudu odpovídá tvarem obalové křivce statorovému proudu získaném z DYNAST modelu.



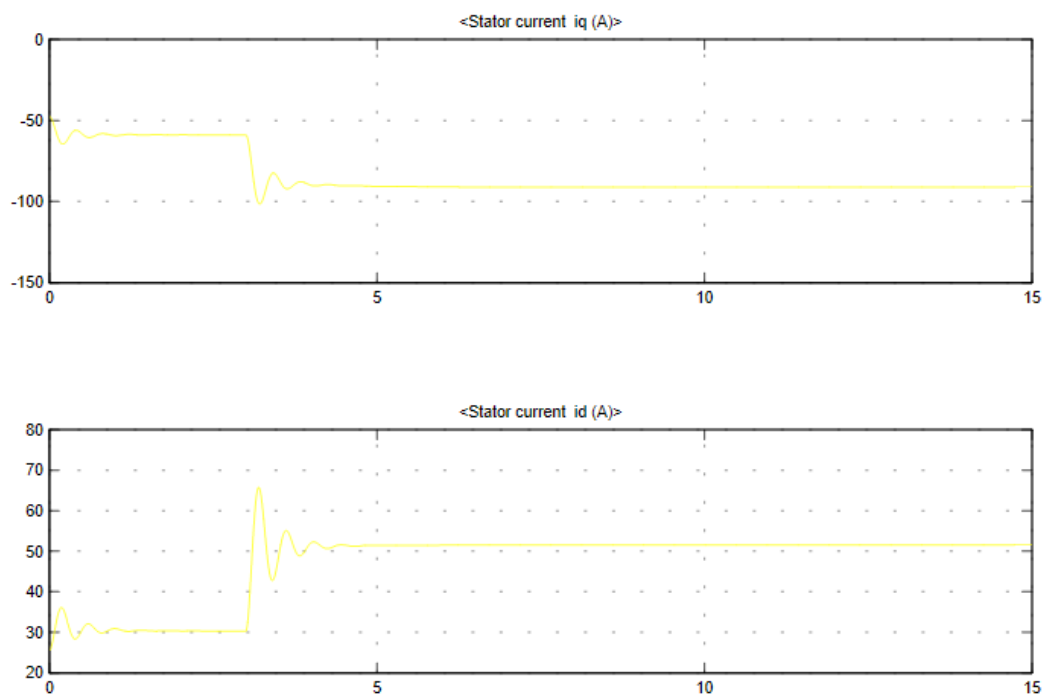
Obr. 4.11 Rychlost pro navýšení o 50%

Odchylka rychlosti odpovídá tvarem průběhu získaném z modelu v simulačním nástroji DYNAST. Simulink pouze prezentuje rychlost v pojmenovaných jednotkách.



**Obr. 4.12 Zátěžný úhel při navýšení o 50%**

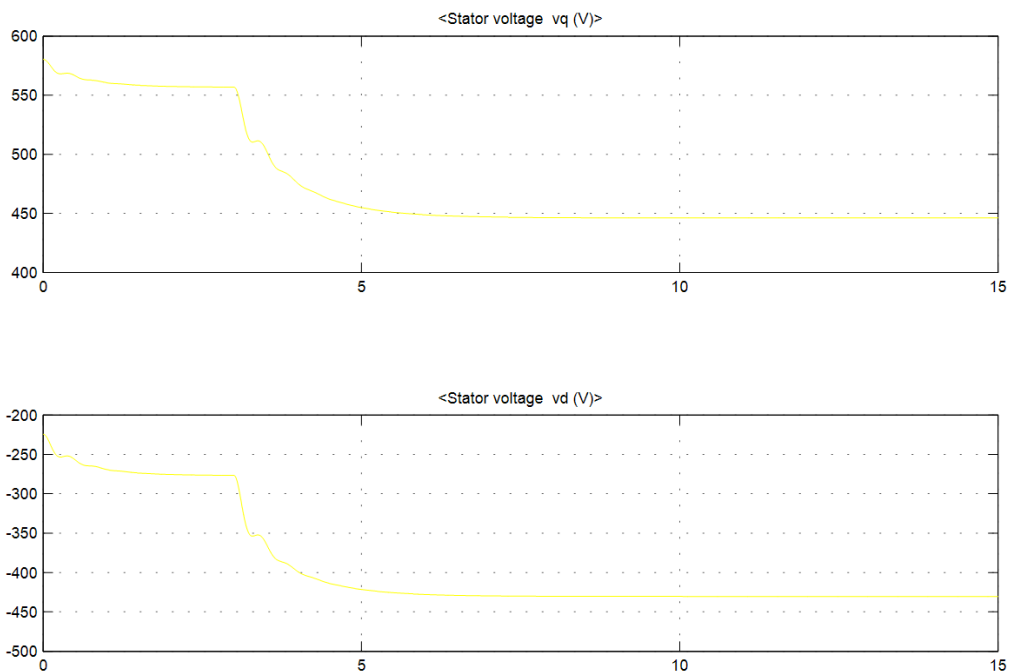
Průběh zátěžného úhlu přibližně odpovídá tvarem křivce zátěžného úhlu získaném z DYNAST modelu.



**Obr. 4.13 Průběhy statorových proudů v podélné a příčné ose při navýšení o 50%**

Průběhy statorových proudů jsou si velice podobny tvarem, rozdíl je způsoben prezentací proudů v pojmenovaných jednotkách.



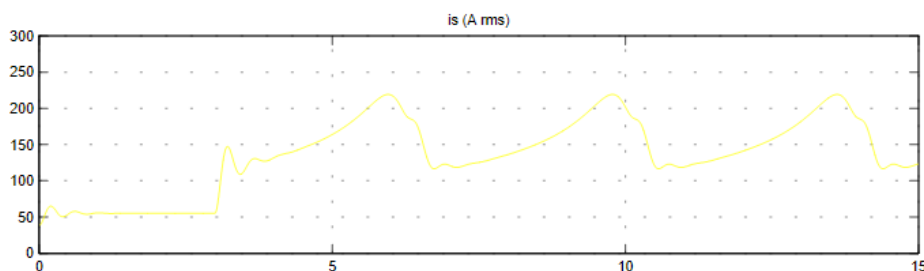


**Obr. 4.14** Průběhy statorových napětí v podélné a příčné ose při navýšení o 50%

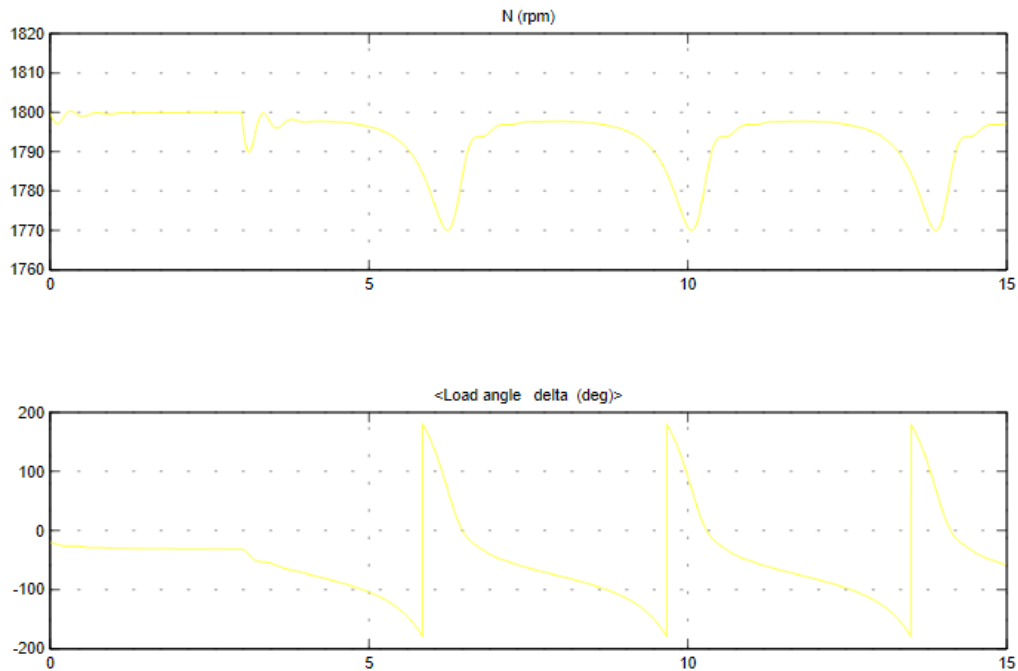
Průběhy statorových napětí jsou shodné s modelem v DYNAST, drobné odchylky jsou způsobeny prezentací napětí v pojmenovaných jednotkách.

#### 4.2.2 Navýšení výkonu o 100%

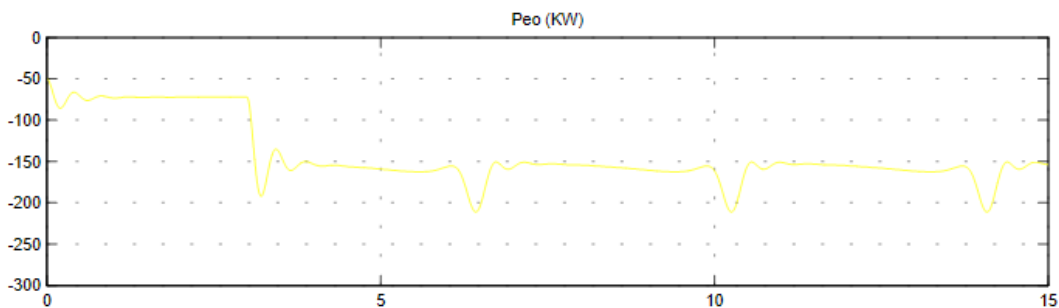
Průběhy pro navýšení výkonu o 100% jsou průběhy získané z Simulinku značně odlišné. Tato odlišnost je způsobena realizací modelu v Simulinku, protože pracuje se strojem spříčná vinutí a kompletní tlumič. Také pracuje s šesti primárními diferenciálními vztahy pro vnitřní systémové proměnné alternátoru. Je nutné zmínit, že stroj jenž byl používán dosahuje výkonu o tři řády nižšího.



**Obr. 4.15** Průběh obálky statorového proudu při navýšení o 100%



**Obr. 4.16** Průběhy rychlosti a zátěžného úhlu při navýšení výkonu o 100%



**Obr. 4.17** Průběh elektrického výkonu při zvýšení výkonu o 100%

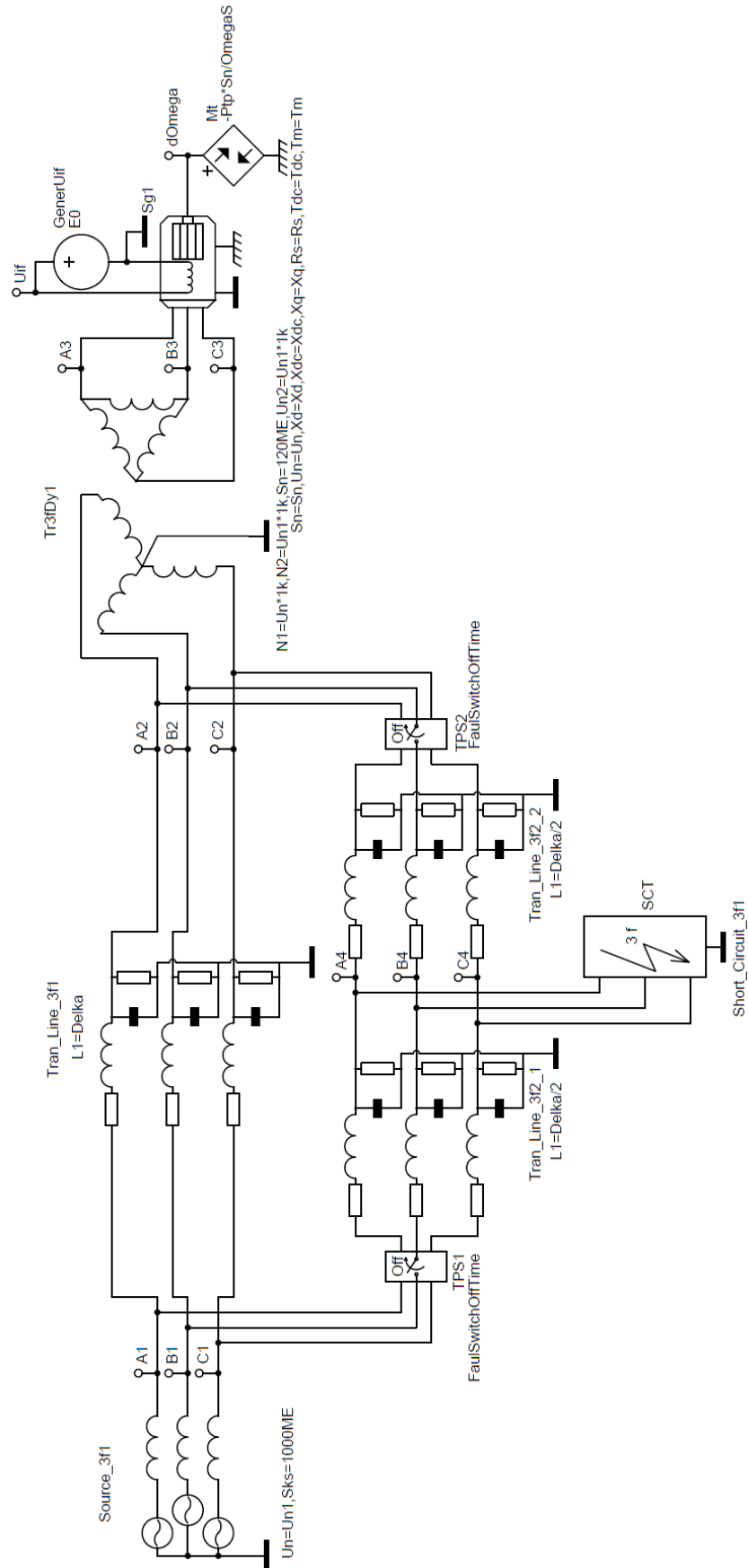
### 4.3 Porovnání modelů

Výsledky púro navýšení o 50% lze považovat za uspokojivé. Zatímco pro navýšení o 100% za velice neporovnatelné, především značný vliv rozsáhlejší výbavy Simulinkového modelu dvojnásobným počtem primárních diferenciálních vztahů pro vnitřní systémové proměnné alternátoru,

#### **4.4 Zkrat na přívodním vedení**

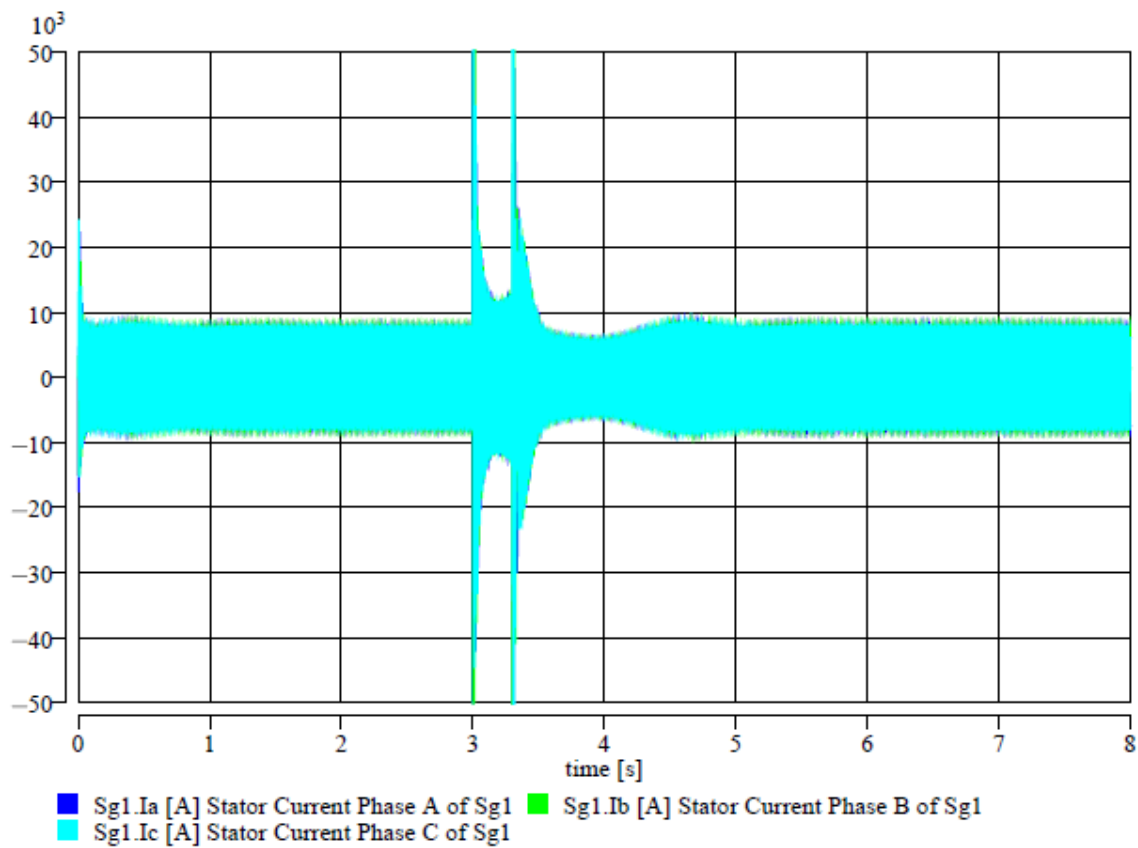
V této kapitole jsou modelovány tří fázové zkraty v polovině jednoho z přívodních paralelních vedení. Ve všech případech dochází ke zkratu v čase 3s. Doba trvání zkratu je variabilní (0,3s; 0,9s; 1,5). Odstranění zkratu proběhne reakcí ochran a odpojením daného vedení. Pro výraznější zřetelné ustálení je celková doba prodloužena na 8s

Blokové schéma modelu je totožné, pro jednotlivé varianty. Základní model je doplněn vedením o délce 20km a blokovým transformátorem.



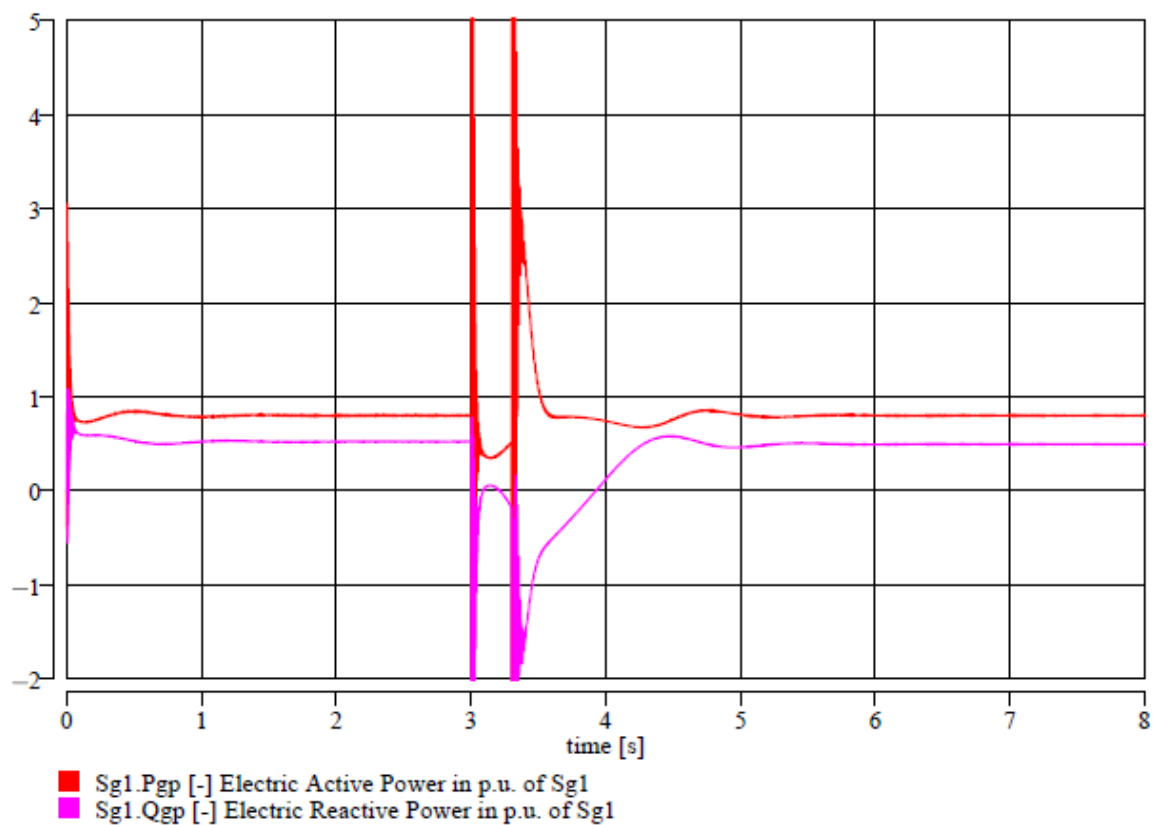
Obr. 4.18 Blokové schéma modelu pro zkrat v polovině jednoho z paralelních  
přívodních vedení

#### 4.4.1 Doba trvání zkratu 0,3s



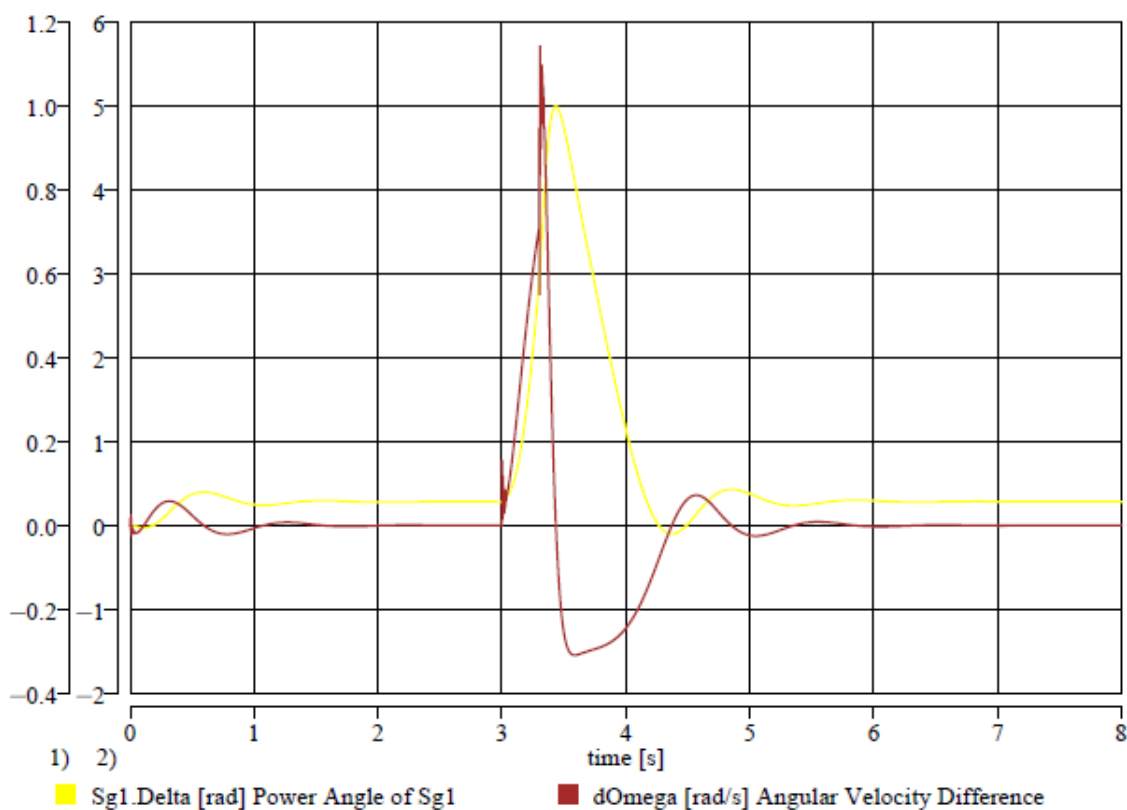
**Obr. 4.19** Statorové proudy při zkratu na přívodním vedení, doba trvání zkratu 0,3s

Již na první pohled je patrná doba vzniku zkratu v čase 3s i čas 3,3s v níž byl zkrat vypnut. Po vypnutí je patrný pokles statorových proudů, ten je způsoben zpomalením rotoru ( $\Delta\omega < 0$ ).



**Obr. 4.20** Průběhy výkonů při zkratu na přívodním vedení, doba trvání zkratu 0,3s

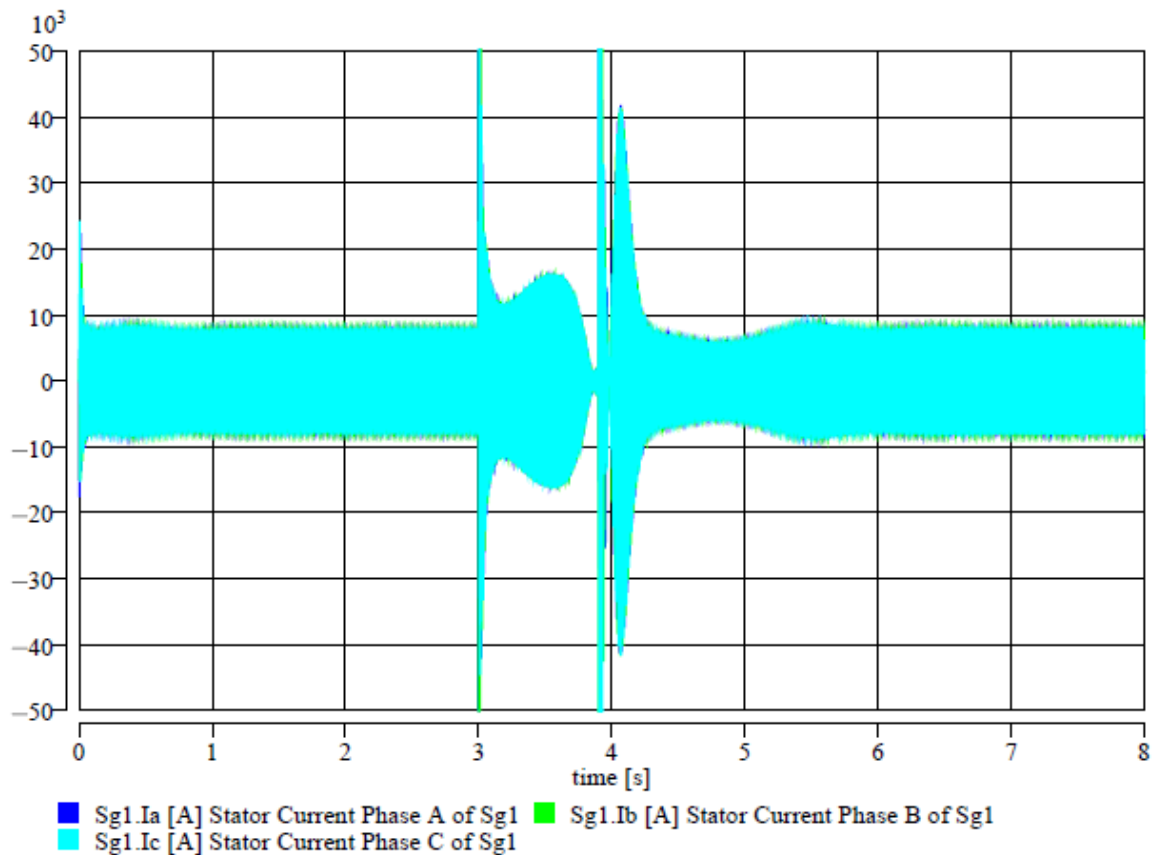
Zkrat způsobí přesun na nižší charakteristiky činného a jalového výkonu. Přesun činného výkonu lze připodobnit Obr. 1.7. Vypnutí zkratu v čase 3,3s provede přesun na původní výkonové charakteristiky.



**Obr. 4.21 Průběhy zátěžného úhlu a diferenciální úhlové rychlosti při zkratu na  
přívodním vedení, doba trvání zkratu 0,3s**

Při zkratu dochází k narůstání zátěžného úhlu a diferenciální úhlové rychlosti. K vypnutí zkratu dochází dostatečně rychle, proto nedochází k proklouznutí stroje. Při vypnutí dojde ke skokovému navýšení diferenciální úhlové rychlosti, které je následně rychle sníženo přesunem na vyšší výkonovou charakteristiku, která způsobí prudké zpomalení.

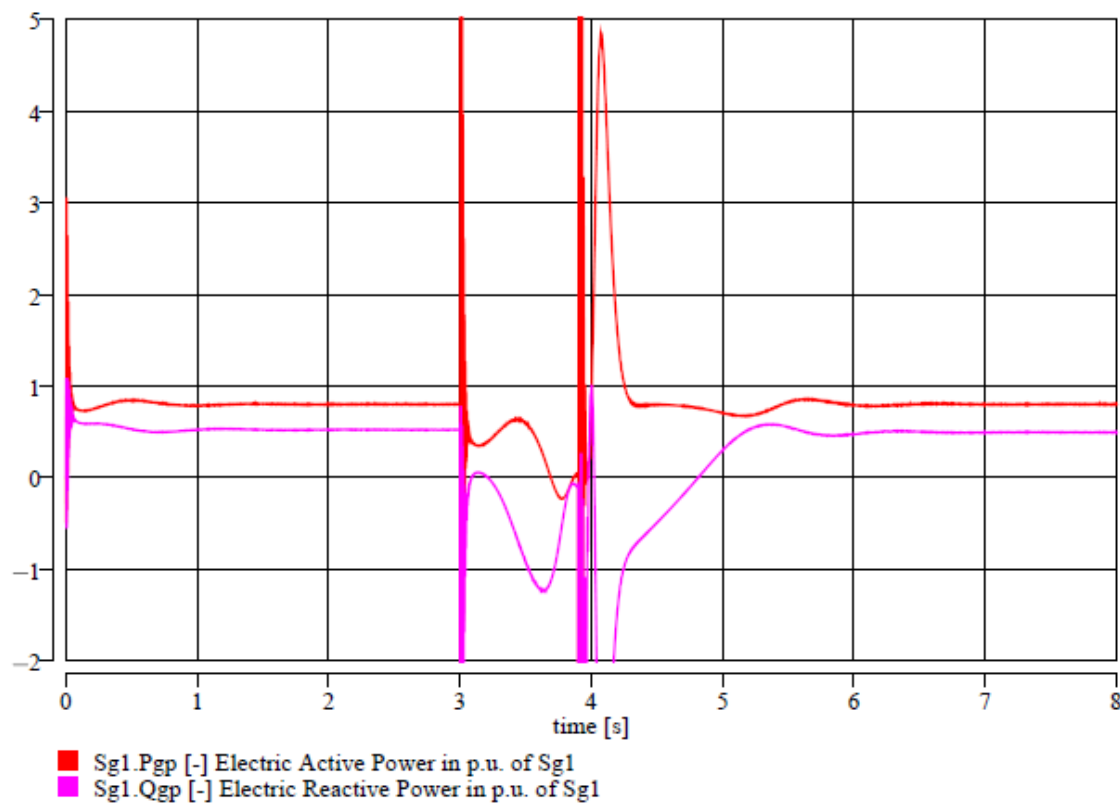
#### 4.4.2 Doba trvání zkratu 0,9s



**Obr. 4.22** Statorové proudy při zkratu na přívodním vedení, doba trvání zkratu 0,9s

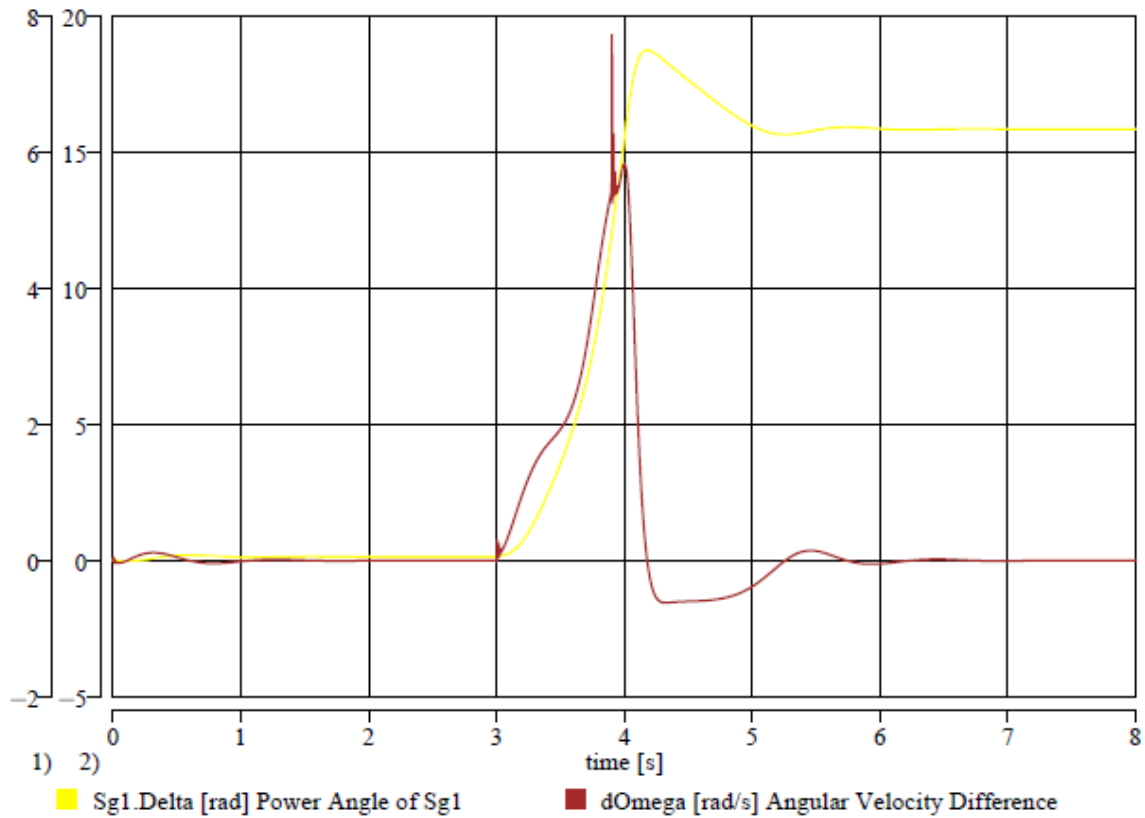
Již na první pohled je patrná doba vzniku zkratu v čase 3s i čas 3,9s v níž byl zkrat vypnut. Bohužel byl zkrat vypnut příliš pozdě. Došlo totiž k poklesu proudu, indikující proklouznutí stroje. Po vypnutí je patrný pokles statorových proudů, ten je způsoben zpomalením rotoru ( $\Delta\omega < 0$ ).





**Obr. 4.23 Průběhy výkonů při zkratu na přívodním vedení, doba trvání zkratu 0,9s**

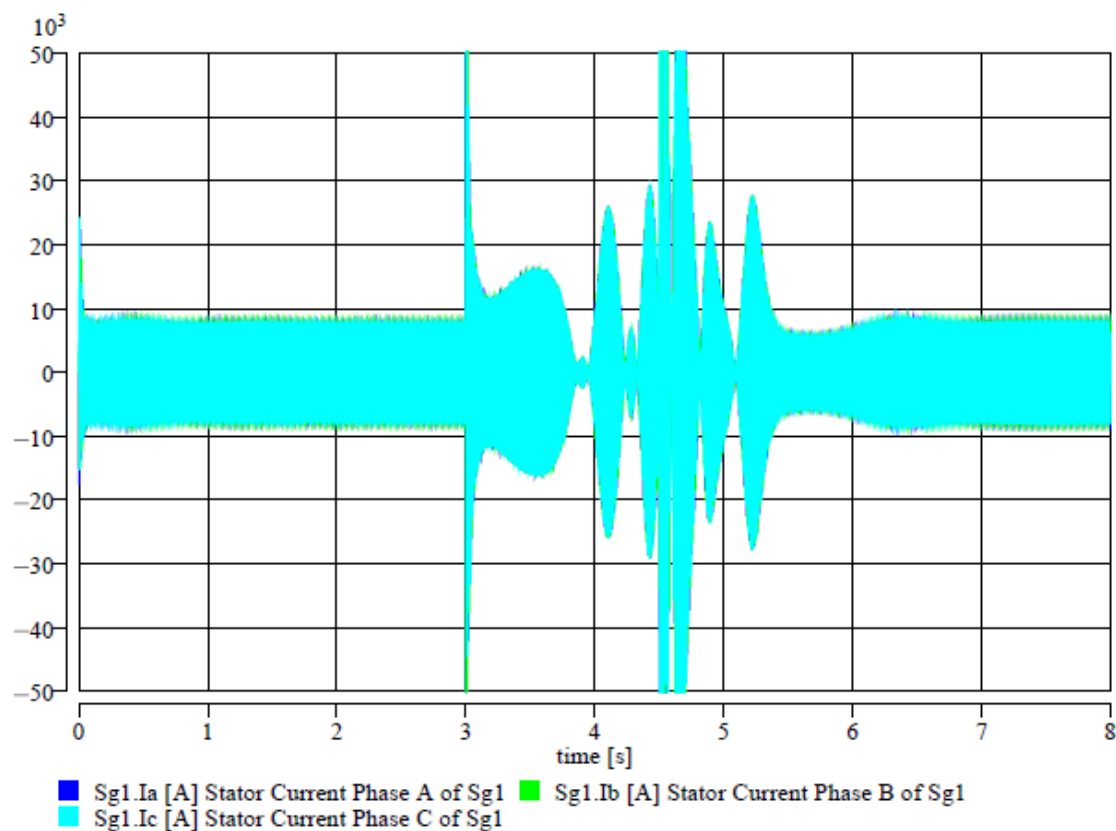
Zkrat způsobí přesun na nižší charakteristiky činného a jalového výkonu. Bohužel nebyl včas vypnut zkrat, proto došlo k dočasné ztrátě stability a následnému proklouznutí stroje. Toto proklouznutí nám indikuje nárůst jalového výkonu a pokles činného výkonu v úseku 3,5 až 4s. Vypnutí zkratu v čase 3,9s provede přesun na původní výkonové charakteristiky.



**Obr. 4.24 Průběhy zátěžného úhlu a diferenciální úhlové rychlosti při zkratu na  
přívodním vedení, doba trvání zkratu 0,9s**

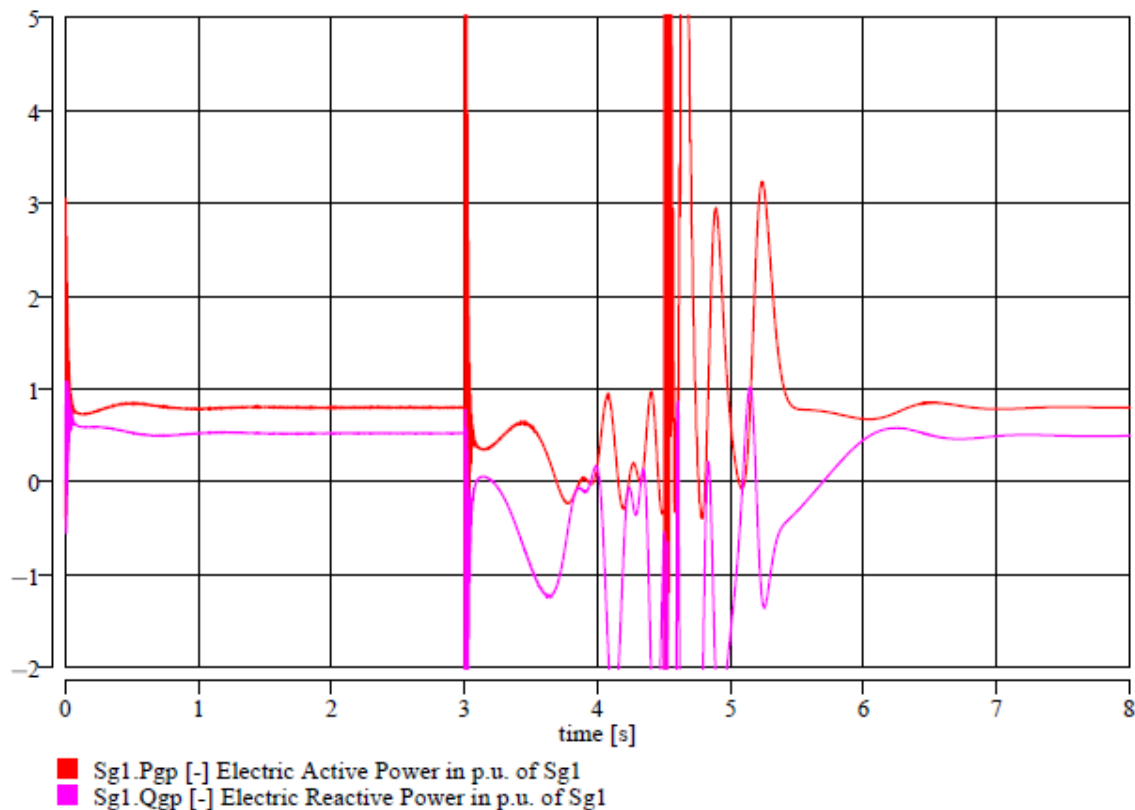
Při zkratu dochází k narůstání zátěžného úhlu a diferenciální úhlové rychlosti. K vypnutí zkratu dochází těsně po proklouznutí stroje, protože zátěžný úhel přesáhl násobek  $2\pi$  rychle, proto nedochází k proklouznutí stroje. Při vypnutí dojde ke skokovému navýšení diferenciální úhlové rychlosti, které je následně rychle sníženo přesunem na vyšší výkonovou charakteristiku, která způsobí rychlé zpomalení stroje. Poté se stroj stabilizoval.

#### 4.4.3 Doba trvání zkratu 1,5s



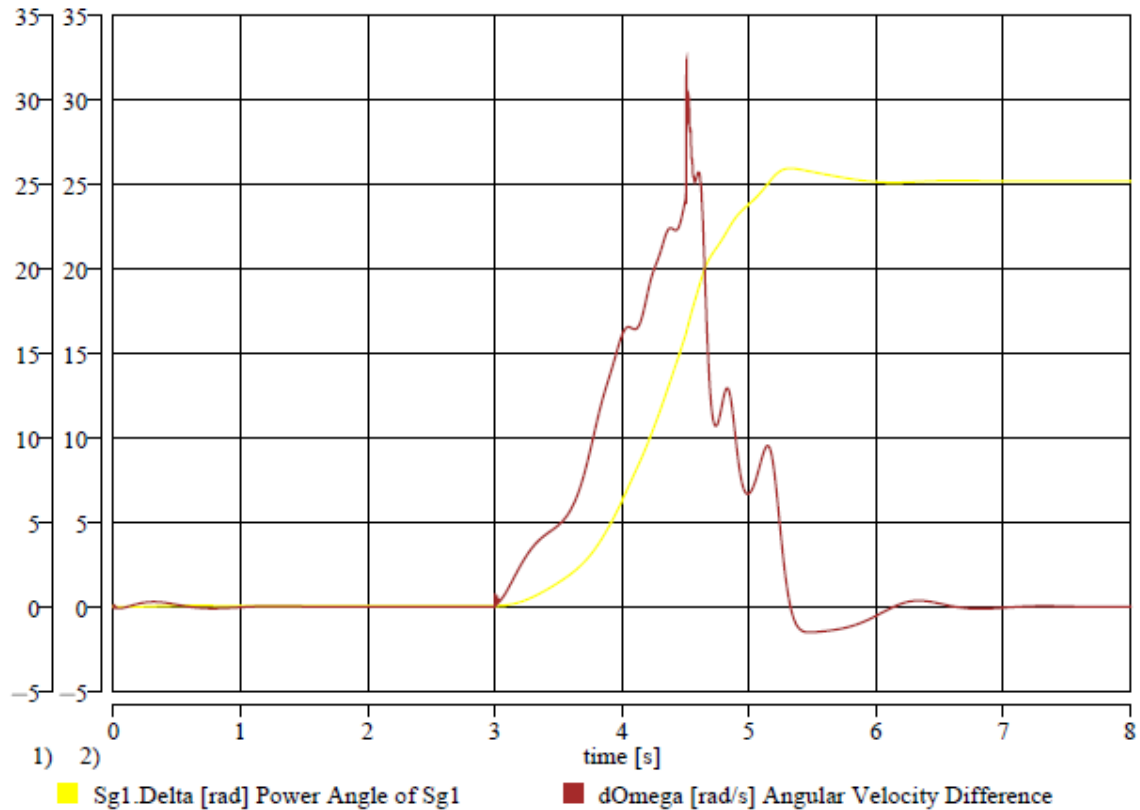
**Obr. 4.25** Statorové proudy při zkratu na přívodním vedení, doba trvání zkratu 1,5s

Z dvou poklesů proudu před vypnutím vyplývá, že došlo ke dvěma prokluzům. Po vypnutí zkratu dochází k dalším poklesům znamenajícím další dvě proklouznutí.



**Obr. 4.26 Průběhy výkonů při zkratu na přívodním vedení, doba trvání zkratu 1,5s**

Zkrat způsobí přesun na nižší charakteristiky činného a jalového výkonu. Bohužel nebyl včas vypnut zkrat, proto dvakrát došlo k proklouznutí stroje, před vypnutím zkratu. Stroj ztratil příliš mnoho energie, proto následně ještě dvakrát proklouzl. Tato proklouznutí nám indikuje prudký nárůst jalového výkonu a výrazný pokles činného výkonu. Vypnutí zkratu v čase 4,5 provede přesun na původní výkonové charakteristiky.



**Obr. 4.27 Průběhy zátěžného úhlu a diferenciální úhlové rychlosti při zkratu na  
přívodním vedení, doba trvání zkratu 1,5s**

Při zkratu dochází k navýšení zátěžného úhlu a diferenciální úhlové rychlosti. Zkrat je vypnut až po dvou proklouznutích. Po vypnutí zkratů ještě dochází k dalším dvěma prokluzů. Počet prokluzů odpovídá přesažení násobku  $2\pi$  zátěžného úhlu. Po čtveřici proklouznutí se stroj dostává do stabilního stavu.

## **5 Zhodnocení modelu**

V této kapitole si zhodnotím a popíši vlastnosti modelu vzhledem k věrohodnosti výsledků. Také je samozřejmě nutné zohlednit a zmínit uživatelskou přístupnost. V poslední řadě je vhodné zmínit i výpočetní výkon modelu.

### **5.1 Vlastnosti a kvalita modelu**

Vlastnosti primárně vyplývají z úrovně modelu. Jedná se o model třetího řádu, tedy je sestaven na základě pouze tří primárních diferenciálních vztahů pro vnitřní systémové proměnné alternátoru (dostačující pro řešení elektromechanických přechodných dějů). Model zvládá jak ustálený chod, tak přechodné děje. V tomto modelu jsou zanedbány veškeré elektromagnetické náhradní obvody v ose  $q$ . Veškeré rotorové vlivy jsou soustředěny pouze do budícího vinutí a tedy umístěny do osy  $d$ . Model je tím pádem použitelný jen pro ty režimy, kdy můžeme zanedbat tlumič a reaktance v ose  $q$  všeobecně. Model je zatím určen pro řešení elektromechanických dějů a přechodné části dějů elektromechanických. Svou jasnou strukturou je současně vhodný pro názorné výukové ukázky, nakonec je třeba zmínit, že prvotní identifikace parametrů byla provedena s ohledem na starší výuková skripta. Předpokládá se implementace i dalších identifikací parametrů a rozšíření o komponenty vyšších řádů nutné pro řešení plných rázových elektromagnetických dějů. Značná otevřenost modelu.

### **5.2 Věrohodnost modelu**

Porovnáním výstupů simulace stroje jak s analytickým řešením ustálených chodů uvedeným ve skriptech Přechodné jevy v elektrizačních soustavách: cvičení ČVUT [10], ze kterých byly využity parametry synchronního stroje, tak s předpokládaným průběhem veličin v dějích přechodných [13] docházíme k závěru, že vytvořený model lze považovat za věrohodný. Model je však pochopitelně schopen dávat smysluplné detailní výstupy pouze do úrovně dějů, kdy můžeme snadno zanedbat vliv tlumiče a veškeré reaktance v ose  $q$ .

### **5.3 Uživatelská přístupnost modelu**

Samotný model je přehledný. Pro uživatele znalého základů problematiky dynamické stability alternátoru a práce v simulačním nástroji DYNAST je značně uživatelsky přístupný. Dle mé zkušenosti výrazněji uživatelsky přístupnější než například modely v SimPowerSystems, popř. nástrojích EMTP-AT, MODES a dalších.

### **5.4 Výpočetní výkon modelu**

Výpočetní výkon vytvořeného modelu v simulačním nástroji DYNAST, je dostačující. Při testování a realizaci netriviálních příkladů nikdy nepřekročil dobu výpočtu 20s.

## **Závěr**

Statická a dynamická stabilita alternátoru a elektrizační soustavy jsou esenciální podmínky, které musí být bezpodmínečně splněny pro bezpečný chod energetických sítí. Statická stabilita je spíše vlastnost soustavy, protože není vyvolána poruchou, zatímco dynamickou stabilitu lze chápat jako reakci na rozruch. Význam statické a dynamické stability v dnešní době ještě více narůstá ruku v ruce s rozsáhlou integrací obnovitelných zdrojů.

Pro synchronní dodávku výkonu do elektrizační soustavy bylo potřeba definovat potřebné výpočtové vztahy pro systémové proměnné, jakými jsou například činný popřípadě jalový výkon dodávaný do elektrizační soustavy. Současně byla určena pracovní oblast alternátoru.

V současné době se považují za nejvhodnější k tvorbě modelů alternátorů modely sestavené na základě převodu statorových rovnic z ABC souřadného systému na rotorový souřadný systém v podélné a příčné ose ( $d, q, 0$ ). Tento systém modelování byl v rámci této práce využit a realizován v nástroji DYNAST.

V takto vytvořeném modelu jsou řešeny některé základní úlohy a následně výsledky porovnány s výstupy získanými využitím modelů knihovny SimPowerSystems (nástroje MATLAB, Simulink). Dále jsou řešeny komplexnější netriviální úlohy, které se objevují v praxi. Například zkrat na jednom z paralelních vedení připojujících alternátor s blokovým transformátorem na elektrizační soustavu.

Model je určen pro řešení převážně elektromechanických přechodných dějů, tedy je sestaven na základě pouze tří primárních diferenciálních vztahů pro vnitřní systémové proměnné alternátoru, nicméně je využitelný i pro řešení základních přechodných dějů elektromagnetických. Praktické zkušenosti ukázali, že výpočet probíhá přibližně dvojnásobnou rychlostí oproti SimPowerSystems.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MÁŠLO, Karel. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. Praha: Asociace energetických manažerů, 2013. ISBN 978-80-260-4461-1.
- [2] Dvorský, Emil. MR- MRpr01[online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné také z: <https://portal.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=139462>
- [3] Dvorský, Emil. MR- MRpr02[online]. [cit. 2018-04-26]. Dostupné také z: <https://portal.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=139463>
- [4] NOHÁČ, Karel. E2- Elektrarny2-cast10-v1[online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné také z: <http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast10-v1.pdf>
- [5] NOHÁČ, Karel. PJS- Přednáška\_stabilita\_PJS[online]. [cit. 2018-02-09]. Dostupné také z: [http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/Prednasky/Prednaska\\_stabilita\\_PJS.pdf](http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/Prednasky/Prednaska_stabilita_PJS.pdf)
- [6] TROJÁNEK, Zdeněk, Josef HÁJEK a Pavol KVASNICA. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1987.
- [7] NOHÁČ, Karel. E2- Elektrarny2-cast05-v4[online]. [cit. 2018-05-02]. Dostupné také z: <http://home.zcu.cz/~nohac/E2/Elektrarny2-cast05-v4.pdf>
- [8] NOHÁČ, Karel. Vliv vyvedení výkonu a přenosové soustavy na provozní podmínky alternátoru. Prezentováno během: [369. Vědecké rozpravě; 2018-05-10; Plzeň, Česká Republika]
- [9] NOHÁČ, Karel. Vizualizace Parkovy transformace-Indukčnosti 02[online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné také z: <http://home.zcu.cz/~nohac/PJS/VizualizaceParkTransformace/IndukčnostiSynchronníhoStroje.pdf>
- [10] TROJÁNEK, Zdeněk, Miloslava CHLADOVÁ. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách: cvičení/ Zdeněk Trojánek, Miloslava Chladová*. Praha: ČVUT, 1989.
- [11] MILANO, Federico. PSAT: Power System Analysis Toolbox. [online]. [cit. 2018-05-21]. Dostupné z: <http://faraday1.ucd.ie/psat.html>
- [12] MANN, Heřman, Michal ŠEVČENKO. Snadné modelování dynamických soustav, Příručka k internetovému kurzu a simulačnímu systému DYNAST[online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné také z: <http://doczz.cz/doc/165755/podrobn%C3%BD-n%C3%A1vod-k-syst%C3%A9mu-dynast---web-based-and-on>

- [13] Hájek, Josef. *Přechodné jevy v elektrizačních soustavách - skriptum*. Plzeň: VŠSE, 1983.