



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektrických pohonů a trakce

Počítačová simulace stabilizace výkonu synchronních generátorů

Bakalářská práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

Jan Fišera

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektrických pohonů a trakce

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Jan Fišera**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Aplikovaná elektrotechnika

Název tématu: **Počítačová simulace stabilizace výkonu synchronních generátorů**

Pokyny pro vypracování:

1. Provedte rešerši způsobů stabilizace činného výkonu generátoru pomocí regulátoru buzení
2. Vyberte vhodný simulační program
3. Vytvořte matematický model pro analýzu regulačních dějů buzení
4. Provedte výpočty jednotlivých částí a celé soustavy se zadanými parametry generátoru, a regulátoru buzení.

Seznam odborné literatury:

- [1] IEEE Std 421.5-2005
- [2] Voženílek, P, Novotný, V., Mindl, P.: Elektromechanické měniče. Praha: ČVUT. 2015
- [3] Pavelka, J.: Elektrické pohony. Praha: ČVUT. 200

Vedoucí: Ing. Jan Bauer, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2016/2017



Ing. Jan Bauer, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2016

Anotace

Tato bakalářská práce je zaměřena na problematiku okolo synchronních generátorů a stabilizátorů výkonu. Nejdříve je věnována pozornost synchronním generátorům v obecnější rovině. Poté jsou popsány stabilizátory výkonu a následně je provedena počítačová simulace stabilizace výkonu a je ukázáno, jak stabilizátory výkonu příznivě ovlivní výstupní výkon z generátoru.

Annotation

This bachelor thesis is focused on problematic connected with synchronous generator and stabilisation of their power. Firstly it is given attention to synchronous generator in more general level. Then in this work are described power system stabilizers and then computer simulation of power system stabilization is made and is showed how power system stabilizers positively affect output power from generator.

Klíčová slova:

Synchronní generátor, Matlab, Simulink, stabilizace výkonu, PSS

Keywords:

Synchronous generator, Matlab, Simulink, power stabilization, PSS

Bibliografická citace

FIŠERA, J. Počítačová simulace stabilizace . Praha:
ČVUT, Fakulta elektrotechnická, 2016.

Vedoucí bakalářské práce Ing. Jan Bauer Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V dne

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Janu Bauerovi, Ph.D. za cenné rady při zpracovávání této bakalářské práce.

Dále bych chtěl poděkovat celé mojí rodině, která mě při studiu vždy podporovala a bez jejich podpory by tato práce nikdy nevznikla.

OBSAH

Seznam symbolů a zkratk	- 9 -
1. Úvod.....	- 11 -
2. Synchronní generátor	- 12 -
2.1. Úvod k synchronním generátorům	- 12 -
2.2. Turboalternátor	- 13 -
2.3. Hydroalternátor	- 13 -
2.4. Fázování synchronního alternátoru na síť	- 14 -
2.5 V-křivky synchronního generátoru.....	- 14 -
2.6. Statická stabilita	- 15 -
2.7 Dynamická stabilita	- 16 -
3. Matematický model synchronního generátoru	- 18 -
3.1 Model v osách abc.....	- 18 -
3.2 Parkova transformace	- 21 -
3.3 Model v osách dq0	- 22 -
4. Výkonové stabilizátory – PSS	- 24 -
4.1. PSS2B.....	- 24 -
4.2. Popis modelu PSS2B.....	- 25 -
5. Počítačová simulace	- 27 -
5.1. Simulační program	- 27 -
5.2. Model generátoru	- 27 -
5.3. Model budicího systému	- 28 -
5.4. Model stabilizátoru výkonu.....	- 29 -
5.5. Model celé soustavy	- 30 -
5.6. Výsledky simulace	- 31 -
6. Závěr.....	- 34 -
Seznam použité literatury:	- 35 -
Příloha 1:.....	1

Seznam symbolů a zkratek

A,B,C	Označení statorových vinutí	[-]
AVR	Automatický regulátor napětí	[-]
D	Průměr rotoru	[m]
D2	Budící vinutí	[-]
D3,Q3	Tlumící vinutí	[-]
f	Frekvence indukovaného napětí	[Hz]
H(s)	Přenos v laplaceově obraze	[-]
i_A, i_B, i_C	Proud fázemi A,B,C	[A]
I_b	Budící proud	[A]
i_{D2}, i_{D3}, i_{Q3}	Proud vinutími D2,D3,Q3	[A]
J	Moment setrvačnosti alternátoru	[kg.m ²]
K	Zesílení	[-]
l	Délka rotoru	[m]
L	Indukčnost	[H]
L_{AA}, L_{BB}, L_{CC}	Vlastní indukčnosti statorových vinutí	[H]
$L_{AB}, L_{AC}, L_{AD2}, L_{AD3}, L_{AQ3}$	Vzájemné indučknosti mezi vinutím A a ostatními	[H]
$L_{BA}, L_{BC}, L_{BD2}, L_{BD3}, L_{BQ3}$	Vzájemné indučknosti mezi vinutím B a ostatními	[H]
$L_{CA}, L_{CB}, L_{CD2}, L_{CD3}, L_{CQ3}$	Vzájemné indukčnosti mezi vinutím C a ostatními	[H]
$L_{D2A}, L_{D2B}, L_{D2C}, L_{D2D3}, L_{D2Q3}$	Vzájemné indukčnosti mezi vinutím D2 a ostatními	[H]
$L_{D3A}, L_{D3B}, L_{D3C}, L_{D3D2}, L_{D3Q3}$	Vzájemné indukčnosti mezi vinutím D3 a ostatními	[H]
$L_{Q3A}, L_{Q3B}, L_{Q3C}, L_{Q3D2}, L_{Q3D3}$	Vzájemné indukčnosti mezi vinutím Q3 a ostatními	[H]
L_{Q3Q3}, L_{D3D3}	Vlastní indukčností tlumících vinutí	[H]
L_1, L_3	Trvalé složky vlastních indukčností	[H]
L_2	Proměnná složka vlastních indukčností	[H]
M_a	Moment alternátoru	[Nm]
m_i	Vnitřní moment alternátoru	[Nm]
n	Otáčky rotoru	[min ⁻¹]
p	Počet pólů generátoru	[-]
p_p	Pól lead-lag kompenzátoru	[-]
P	Činný výkon	[W]
P_{mech}	Mechanický výkon přiváděný do gen.	[W]
PSS	Power system stabilizers	[-]
R_A, R_B, R_C	Odpory fáze A,B,C	[Ω]
$R_{D1}, R_{D2}, R_{D3}, R_{Q2}, R_{Q3}$	Odpory transformovaných d-q vinutí	[Ω]
t	Čas	[s]
$T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8$	Časové konstanty	[s]
$T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}$	Časové konstanty washout filtrů	[s]
U_A, U_B, U_C	Napětí fáze A,B,C	[V]
U_d, U_q	Složky d,q statorového napětí	[p.u]
$U_{D1}, U_{D2}, U_{D3}, U_{Q2}, U_{Q3}$	Napětí na transformovaných d-q vinutích	[V]
U_t	Napětí na statoru	[p.u]
V_f	Budící napětí	[p.u]
V_{PSS}	Výstupní signál stabilizátoru	[p.u]
V_{ref}	Referenční napětí AVR	[p.u]

V_t	Napětí statoru	[p.u]
x	Obecný vektor	[-]
x_d, x_q	Dq složky obecného vektoru	[-]
z	Nula lead-lag kompenzátoru	[-]
δ	Zátěžný úhel	[°]
ψ_A, ψ_B, ψ_C	Spřažené magnetické toky fází A,B,C	[Wb]
$\psi_{D1}, \psi_{D2}, \psi_{D3}, \psi_{Q2}, \psi_{Q3}$	Spřažené magnetické toky d-q vinutí	[Wb]
ω	Úhlová rychlost rotoru	[rads ⁻¹]
ω_s	Úhlová frekvence sítě	[rads ⁻¹]

1. Úvod

Již v 60. letech 20 století se poprvé začalo experimentovat se stabilizátory výkonu, jejichž hlavním cílem je zamezit elektromechanickým oscilacím synchronních generátorů, a tím zamezit oscilacím výstupního výkonu. V současné době jsou stabilizátory součástí napěťových regulátorů světových firem zabývajících se touto problematikou, jako jsou ABB, Mitsubishi, Siemens nebo Basler.

Cílem této bakalářské práce je objasnit a ukázat funkci stabilizátoru výkonu, jež je popsán v normě IEEE Std. 425, PSS2B (Power system stabilizer, typ 2 B). Tento typ stabilizátoru je ve výše jmenovaných firmách hojně využíván jako součást budících soustav synchronních generátorů po celém světě.

V této práci bude nejdříve probrán úvod k synchronním generátorům. Následně zde bude probrán klasický matematický popis synchronního generátoru a ukázáno použití Parkovy transformace, pro převod matematického popisu do os vhodného pro počítačovou simulaci.

K samotné počítačové simulaci bude použit program Matlab a jeho součást pro simulování – Simulink. Matlab byl zvolen, jelikož je to nejvíce používaný simulační program.

2. Synchronní generátor

2.1. Úvod k synchronním generátorům

Synchronní generátor je elektrický točivý stroj, který má za úkol generovat elektrickou energii. Nejčastěji pracuje jako trojfázový stroj. Takovému generátoru se říká **alternátor**. Alternátory jsou elektrické stroje, které se vyrábějí pro největší výkony. Nejsou výjimečné výkony přes 1000 MW.

Mezi největší výhody synchronních generátorů patří vysoká účinnost a nízké provozní náklady vztahené na jednotku výkonu.

Synchronní stroje mají dvě hlavní části, což jsou stator a rotor. Ve statoru je uloženo statorové vinutí, nejčastěji spojeno se sítí. V rotoru je uloženo rotorové vinutí, do kterého je vyvedeno buzení. V mnoha případech je v rotoru uloženo také tlumící vinutí pro zlepšení stability stroje.

Mezi základní vztahy pro synchronní stroje patří vztah mezi frekvencí indukovaného napětí a otáčkami rotoru :

$$f = \frac{p * n}{60} \quad (2.1)$$

Ze vztahu je zřejmé, že frekvence je přímo úměrná rychlosti otáčení rotoru.

V České Republice je frekvence síťového napětí 50 Hz, z toho můžeme vypočítat potřebnou rychlost otáčení rotoru pro počet pólových párů použitých v alternátoru.

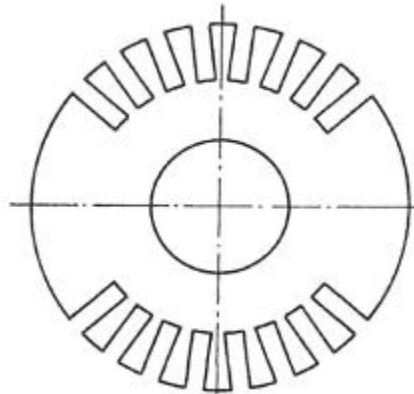
p	n
[-]	[min ⁻¹]
1	3000
2	1500
3	1000
4	750
5	600

Tab. 2.1: Rychlost otáčení rotoru v závislosti na počtu pólových párů

Synchronní generátory dělíme na dvě skupiny a to turboalternátory a hydroalternátory.

2.2. Turboalternátor

Turboalternátor, jak již z názvu vyplývá, je alternátor konstrukčně uzpůsobený vysokým otáčkám. Jeho rotor, který je vždy hladký, má malý průměr a je dlouhý. Je to z důvodu vysokých úhlových rychlostí.



Obr. 2.1: Řez rotorem turbostroje, převzato z [1]

Poměr mezi délkou a průměrem rotoru turboalternátoru je nejčastěji $l/D \cong 6$ [1]

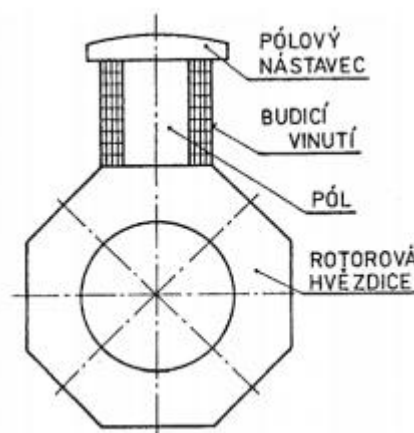
Rotor turbostroje bývá vyroben z ušlechtilé oceli. Stator pak z izolovaných plechů, ve kterých jsou drážky pro vinutí kotvy.

Nejčastější počet pólů turboalternátorů jsou dva. Výjimečně se používají i čtyřpólové, případně šestipólové.

Hlavní použití turboalternátorů najdeme v uhelných a jaderných elektrárnách, kde jsou poháněny parními turbínami.

2.3. Hydroalternátor

Hydroalternátor je používán pro menší otáčky, tudíž musí mít větší počet pólových párů, viz tab. 2.1. Rotor hydroalternátorů má vyniklé póly, jelikož při menších otáčkách nepůsobí tak veliké odstředivé síly.



Obr. 2.2: Řez rotorem s vyniklými póly, převzato z [1]

Na rozdíl od turboalternátoru má rotor hydroalternátoru velký průměr a menší délku. Poměr mezi délkou a průměrem rotoru hydroalternátoru bývá $l/D \cong 0,1 \div 0,2$ [1].

Rotor hydroalternátoru je z ušlechtilé oceli a póly z izolovaných plechů. Stator je z izolovaných plechů, ve kterých jsou drážky pro kotevní vinutí.

Hydroalternátor najde svoje použití převážně ve vodních elektrárnách, protože zde je vhodné pracovat v nižších otáčkách.

2.4. Fázování synchronního alternátoru na síť

Při připínání synchronního alternátoru k síti je nutné zajistit, aby nevznikaly proudové rázy, proto se alternátor musí přizpůsobit síti, na kterou je připínán. Přizpůsobení se zaručí 4.mi základními podmínkami:

1) Stejný sled fází

Alternátor musí mít stejný sled fází jako síť, na kterou se připíná. Tato podmínka se nejčastěji kontroluje přímo na spínacím prvku.

2) Shodná frekvence

Frekvence výstupního napětí musí být shodná s frekvencí sítě, na kterou se generátor připojuje.

3) Stejně veliké napětí

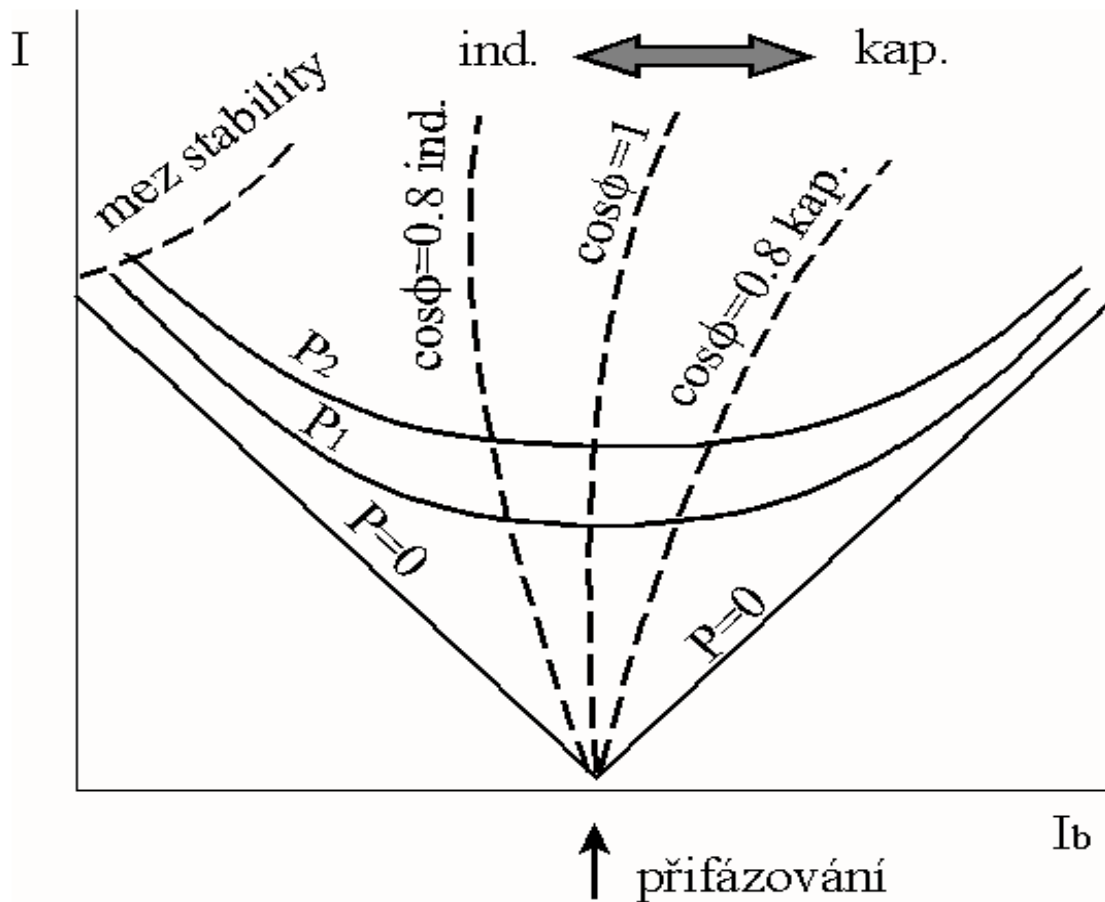
Napětí alternátoru se nastaví naprázdno na hodnotu přibližně stejně velikou, jako je napětí sítě.

4) Stejná fáze

Kontroluje se voltmetrem nebo synchronoskopem.

2.5 V-křivky synchronního generátoru

Základní regulační charakteristikou synchronního generátoru je tzv. V-křivka. Její název je odvozen z typického průběhu této charakteristiky. Je to závislost statorového proudu (I) na proudu budícím (I_b) při konstantním činném výkonu a konstantním napětí.



Obr. 2.3: V-křivky synchronní generátoru, převzato z [6]

Při podbuzení synchronní generátoru se chová generátor k síti jako indukčnost a odebírá jalový výkon na dobuzení. Větve v této části V-křivek jsou omezeny mezi statické stability, čímž je omezena velikost maximálního odebíraného jalového výkonu ze sítě.

Při přebuzení se chová generátor k síti jako kapacita a jalový výkon do sítě dodává.

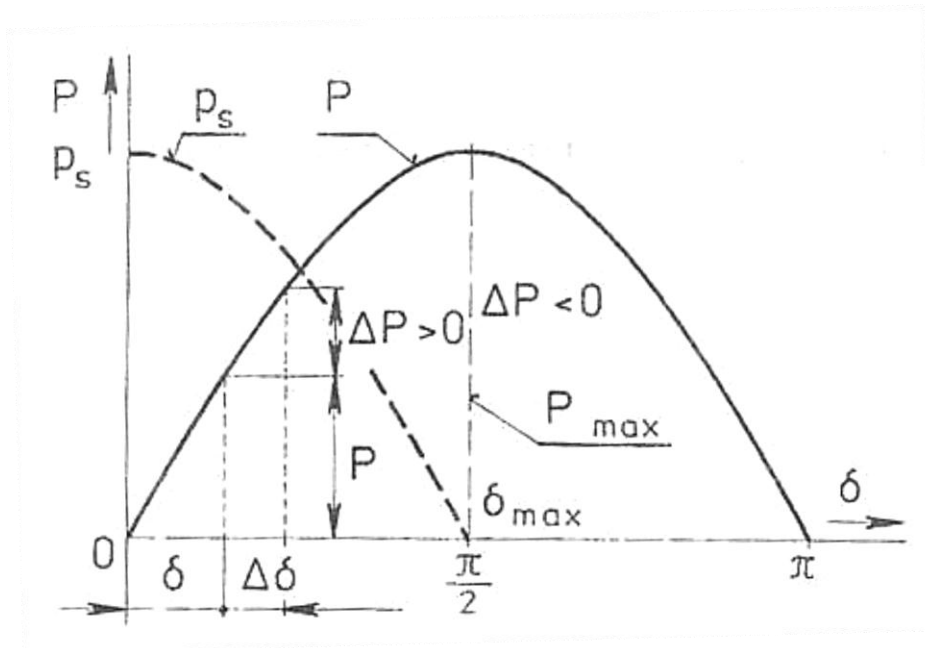
2.6. Statická stabilita

Statická stabilita alternátoru udává, o kolik můžeme zvýšit točivý moment pohonu při konstantním buzení, aniž by alternátor vypadl ze synchronního chodu.

Při zvětšení točivého momentu pohonu, se zvětší zátěžný úhel δ o $\Delta\delta$ a zároveň výstupní činný výkon P o ΔP . Tím se zvětší i moment alternátoru, který působí proti momentu pohonu na hodnotu

$$M_a = \frac{P + \Delta P}{\omega_1} \quad (2.2)$$

což zapříčiní zpomalení rotoru. Než dojde k rovnováze mezi momentem pohonu a momentem alternátoru, bude probíhat přechodný děj, při kterém zátěžný úhel bude periodicky měnit svou hodnotu na nový zátěžný úhel.



Obr. 2.4: Závislost výkonu na zátěžném úhlu, převzato z [4]

Alternátor po změně točivého momentu pohonu zůstane stabilní, bude-li

$$\frac{dP}{d\delta} > 0 \quad (2.3)$$

Mezi statické stability pak bude hodnota, při které se derivace výstupního činného výkonu podle zátěžného úhlu bude rovnat nule. Tomu odpovídá maximální činný výkon alternátoru P_{max} a maximální zátěžný úhel $\delta=90^\circ$.

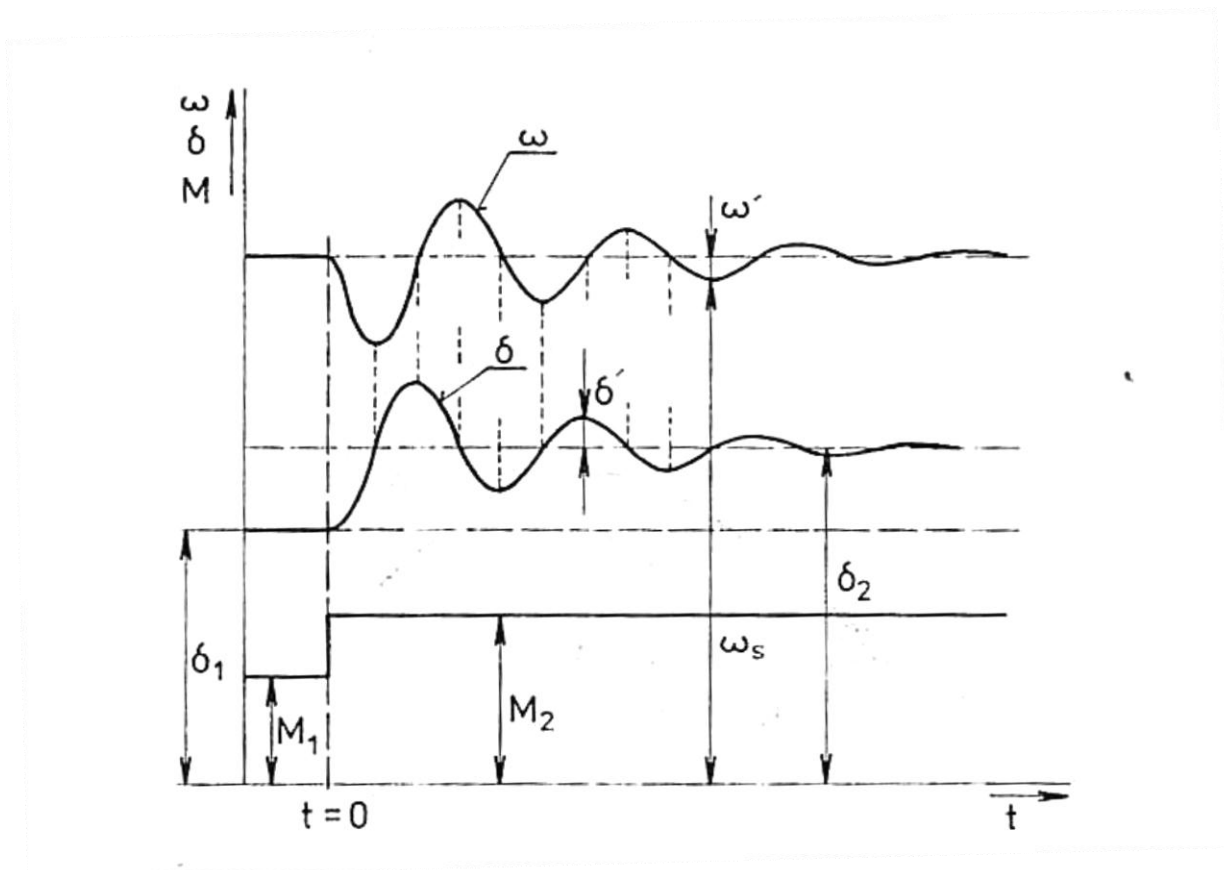
2.7 Dynamická stabilita

Při změně zátěžného úhlu přechází synchronní stroj na nový zátěžný úhel tlumeným periodickým dějem. Opět se zde řeší problematika vypadnutí ze synchronizmu při tomto dynamickém ději. Na rozdíl od statické stability, která řeší ustálené stavy, dynamickou stabilitou rozumíme, aby stroj nevypadl ze synchronizmu při již zmíněném přechodovém ději.

Na počátku děje vznikne nedostatek elektrického výkonu, který musí pokrýt energie rotujících setrvačných hmot a tím se začne rotor zpomalovat. Toto pokrytí musí trvat až do první půlperiody přechodového děje. Druhou půlperiodou se naopak rotor musí zrychlit, aby stroj zůstal v synchronních otáčkách. Vzniklý přebytek elektrického výkonu musí být tak velký, že při jeho absorpci setrvačnými hmotami, rotor opět urychlí. Tento děj se opakuje, dokud se nedosáhne ustálených synchronních otáček a tím nového ustáleného úhlu.

Z toho tedy plyne, že má-li být neporušen stabilní chod, musí při prvním kyvu při přechodovém ději existovat takový přebytek elektrického výkonu, který je schopen obrátit relativní směr točení rotoru vzhledem ke statorovému točivému poli.

Dynamický děj, při kterém probíhá periodická změna na nový zátěžný úhel, se nazývá **kývání synchronní stroje** [4]. Příklad takového kývání je na obr. 2.5.

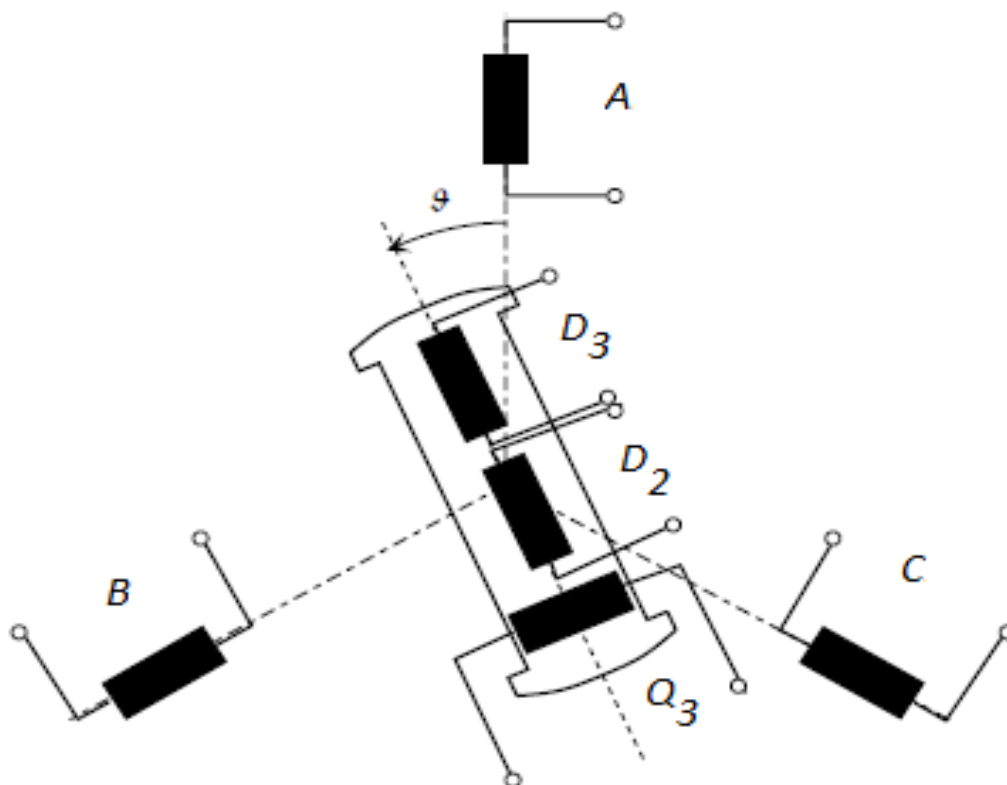


Obr. 2.5: Kývání synchronního stroje, převzato z [4]

3. Matematický model synchronního generátoru

3.1 Model v osách abc

Synchronní stroj má rozložení vinutí dle obr 3.1. Obvykle mívá tři vinutí na statoru (A,B,C), budící vinutí na rotoru (D2) a tlumící vinutí (D3,Q3)



Obr. 3.1: Náhradní vinutí SG s vyniklými póly, převzato z [7]

Sestavení napěťových rovnic:

$$u_A = R_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \quad (3.1)$$

$$u_B = R_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \quad (3.2)$$

$$u_C = R_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \quad (3.3)$$

$$u_{D2} = R_{D2} i_{D2} + \frac{d\psi_{D2}}{dt} \quad (3.4)$$

$$u_{D3} = R_{D3}i_{D3} + \frac{d\psi_{D3}}{dt} \quad (3.5)$$

$$u_{Q3} = R_{Q3}i_{Q3} + \frac{d\psi_{Q3}}{dt} \quad (3.6)$$

Sestavení rovnic pro spřažené magnetické toky:

$$\psi_A = L_{AA}i_A + L_{AB}i_B + L_{AC}i_C + L_{AD2}i_{D2} + L_{AD3}i_{D3} + L_{AQ3}i_{Q3} \quad (3.7)$$

$$\psi_B = L_{BA}i_A + L_{BB}i_B + L_{BC}i_C + L_{BD2}i_{D2} + L_{BD3}i_{D3} + L_{BQ3}i_{Q3} \quad (3.8)$$

$$\psi_C = L_{CA}i_A + L_{CB}i_B + L_{CC}i_C + L_{CD2}i_{D2} + L_{CD3}i_{D3} + L_{CQ3}i_{Q3} \quad (3.9)$$

$$\psi_{D2} = L_{D2A}i_A + L_{D2B}i_B + L_{D2C}i_C + L_{D2D2}i_{D2} + L_{D2D3}i_{D3} \quad (3.10)$$

$$\psi_{D3} = L_{D3A}i_A + L_{D3B}i_B + L_{D3C}i_C + L_{D3D2}i_{D2} + L_{D3D3}i_{D3} \quad (3.11)$$

$$\psi_{Q3} = L_{Q3A}i_A + L_{Q3B}i_B + L_{Q3C}i_C + L_{Q3Q3}i_{Q3} \quad (3.12)$$

Je zřejmé, že vzájemné indukčnosti vinutí, které jsou vzájemně otočeny o $\pi/2$ jsou rovny nule, proto nejsou v rovnicích pro spřažené magnetické toky uvedeny.

Jelikož synchronní generator pracuje s periodickým signálem, v drtivé většině, sinusovým, je zřejmé, že vzájemné indukčnosti mezi vinutími na rotoru a statoru závisí na relativní poloze rotoru. Vzájemná indukčnost bude maximální, jestliže osy vinutí, mezi kterými nás vzájemná indukčnosti zajímá, budou splývat. Minimální naopak budou-li osy vinutí kolmé. Tomuto popisu odpovídá funkce kosinus a bude platit :

$$L_{AD2} = L_{D2A} = L_{sf} \cos v \quad (3.13)$$

$$L_{BD2} = L_{D2B} = L_{sf} \cos\left(v - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.14)$$

$$L_{CD2} = L_{D2C} = L_{sf} \cos\left(v + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.15)$$

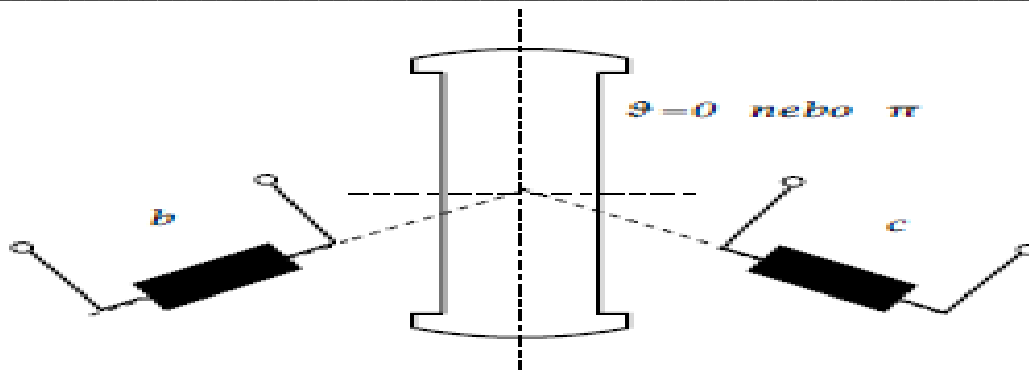
Vlastní indukčnost statorových vinutí je opět závislá na poloze rotoru. Tady indukčnost bude maximální, když osa vinutí splývá s osou pólů. Poloha maximální vlastní indukčnosti se často nazývá poloha maximální vodivosti. Minimální vlastní vodivost pak bude při pootočení os o $\pi/2$. Bude tedy platit:

$$L_{AA} = L_1 + L_2 \cos 2v \quad (3.16)$$

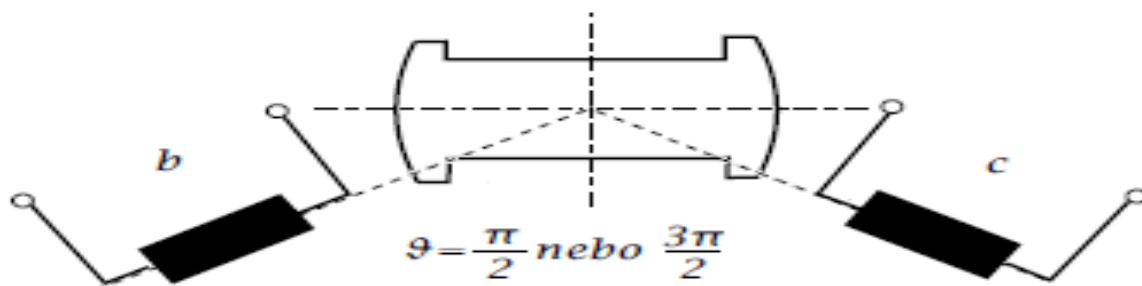
$$L_{BB} = L_1 + L_2 \cos 2\left(v - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.17)$$

$$L_{CC} = L_1 + L_2 \cos 2\left(v + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.18)$$

Vzájemná indukčnost statorových vinutí je vidět z obr. 3.2 a 3.3.



Obr.3.2: Poloha minimální vzájemné indukčnosti, převzato z [4]



Obr. 3.3: Poloha maximální vzájemné indukčnosti, převzato z [4]

Vzájemnou indukčnost statorových vinutí poté můžeme popsat:

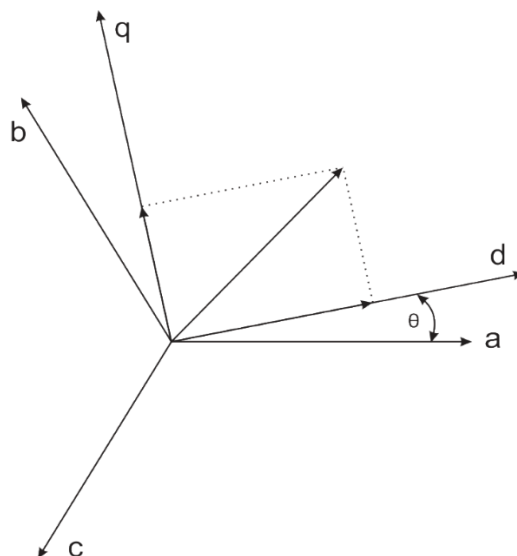
$$-L_{BC} = L_3 - L_2 \cos 2\nu \quad (3.19)$$

$$-L_{CA} = L_3 - L_2 \cos 2\left(\nu - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.20)$$

$$-L_{AB} = L_3 - L_2 \cos 2\left(\nu - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3.21)$$

3.2 Parkova transformace

Jedna z nejvíce používaných metod pro modelování točivých strojů je **Parkova transformace**. Použitím této transformace se vytvoří soustava diferenciálních rovnic, které jednoznačně určují chování modelu daného točivého stroje. Použitím Parkovy transformace převedeme model ze soustavy os abc do soustavy dq0. Soustava dq0 má tu výhodu, že hodnoty v ose 0 můžeme považovat za nulové, jelikož vinutí jsou spojena do nevyvedeného uzlu. Parkovou transformací tedy převedeme tři statorová vinutí na dvě fiktivní v osách dq. Fiktivní vinutí se pak otáčí stejnou rychlostí jako vinutí rotoru a tím nedochází k časovým změnám vzájemné indukčnosti. V případě synchronního generátoru bude rychlost otáčení os dq shodná s rychlostí otáčení rotoru.



Obr. 3.4: Převod z abc do dq, převzato z [5]

Parkova transformace pro obecný vektor x ve složkách abc do dq0 – převod střídavých veličin na stejnosměrné:

$$x_d = \frac{2}{3} \left[x_a * \sin(\omega * t) + x_b * \sin\left(\theta * t - \frac{2\pi}{3}\right) + x_c * \sin\left(\theta * t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.22)$$

$$x_q = \frac{2}{3} \left[x_a * \cos(\omega * t) + x_b * \cos\left(\theta * t - \frac{2\pi}{3}\right) + x_c * \cos\left(\theta * t + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \quad (3.23)$$

$$x_0 = \frac{1}{3} [x_a + x_b + x_c] \quad (3.24)$$

$$X_a = \sqrt{x_d^2 + x_q^2} \quad (3.25)$$

Zpětná Parkova transformace z dq0 do abc – převod stejnosměrných veličin na střídavé:

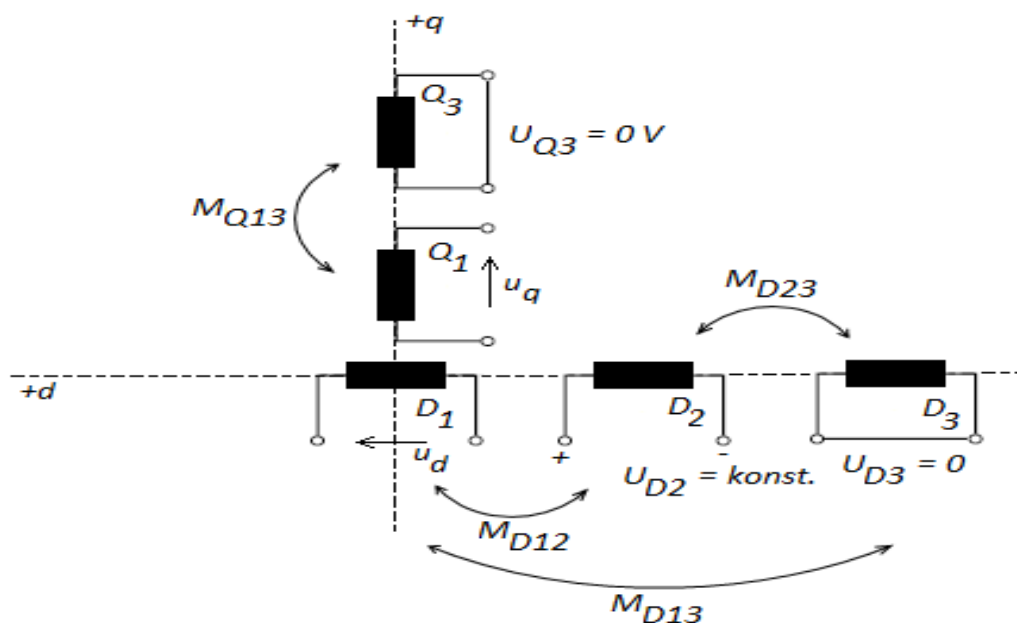
$$x_a = x_d * \sin(\theta * t) + x_q * \cos(\theta * t) + x_0 \quad (3.26)$$

$$x_b = x_d * \sin\left(\theta * t - \frac{2\pi}{3}\right) + x_q * \cos\left(\theta * t - \frac{2\pi}{3}\right) + x_0 \quad (3.27)$$

$$x_c = x_d * \sin\left(\theta * t + \frac{2\pi}{3}\right) + x_q * \cos\left(\theta * t + \frac{2\pi}{3}\right) + x_0 \quad (3.28)$$

3.3 Model v osách dq0

Na obrázku 5.6 můžeme vidět rozložení vinutí po transformaci z os abc do dq0. D1, Q1 reprezentují hlavní vinutí. D3, Q3 reprezentují tlumící vinutí a D2 reprezentuje budící vinutí.



Obr. 3.5: Prostorové rozložení vinutí v osách dq, převzato z [7]

Napěťové rovnice:

Osa d:

$$u_{D1} = R_{D1}i_{D1} + \frac{d\psi_{D1}}{dt} - \omega\psi_{Q1} \quad (3.29)$$

$$u_{D2} = R_{D2}i_{D2} + \frac{d\psi_{D2}}{dt} \quad (3.30)$$

$$u_{D3} = R_{D3}i_{D3} + \frac{d\psi_{D3}}{dt} \quad (3.31)$$

Osa q:

$$u_{Q1} = R_{Q1}i_{Q1} + \frac{d\psi_{Q1}}{dt} - \omega\psi_{D1} \quad (3.32)$$

$$u_{Q3} = R_{Q2}i_{Q3} + \frac{d\psi_{Q3}}{dt} \quad (3.33)$$

Rovnice magneticky spřažených toků:

$$\psi_{D1} = L_{D1}i_{D1} + M_{D12}i_{D2} + M_{D13}i_{D3} \quad (3.34)$$

$$\psi_{D2} = L_{D2}i_{D2} + M_{D21}i_{D1} + M_{D31}i_{D3} \quad (3.35)$$

$$\psi_{D3} = L_{D3}i_{D3} + M_{D31}i_{D1} + M_{D32}i_{D2} \quad (3.36)$$

$$\psi_{Q1} = L_{Q1}i_{Q1} + M_{Q13}i_{Q3} \quad (3.37)$$

$$\psi_{Q3} = L_{Q3}i_{Q3} + M_{Q31}i_{Q1} \quad (3.38)$$

Pro namodelování synchronního stroje, potřebujeme dosadit rovnice spřažených toků do napěťových rovnic. Tlumící vinutí představují kotvu nakrátko, tudíž platí, že napětí tlumících vinutí $U_{Q3} = 0$, $U_{D3} = 0$.

Výsledné rovnice získáme dosazením magnetických spřažených toků (3.34 – 3.38) do napěťových rovnic (3.29-3.33):

$$u_{D1} = R_{D1}i_{D1} + \frac{d(L_{D1}i_{D1} + M_{D12}i_{D2} + M_{D13}i_{D3})}{dt} - \omega(L_{Q1}i_{Q1} + M_{Q13}i_{Q3}) \quad (3.39)$$

$$u_{D2} = R_{D2}i_{D2} + \frac{d(L_{D2}i_{D2} + M_{D21}i_{D1} + M_{D31}i_{D3})}{dt} \quad (3.40)$$

$$0 = R_{D3}i_{D3} + \frac{d(L_{D3}i_{D3} + M_{D31}i_{D1} + M_{D32}i_{D2})}{dt} \quad (3.41)$$

$$u_{Q1} = R_{Q1}i_{Q1} + \frac{d(L_{Q1}i_{Q1} + M_{Q13}i_{Q3})}{dt} - \omega(L_{D1}i_{D1} + M_{D12}i_{D2} + M_{D13}i_{D3}) \quad (3.42)$$

$$u_{Q2} = R_{Q2}i_{Q2} + \frac{d(L_{Q3}i_{Q3} + M_{Q31}i_{Q1})}{dt} \quad (3.43)$$

Rovnice je třeba doplnit pohybovou rovnicí:

$$m_i = J \frac{d\omega_m}{dt} + m_A \quad (3.44)$$

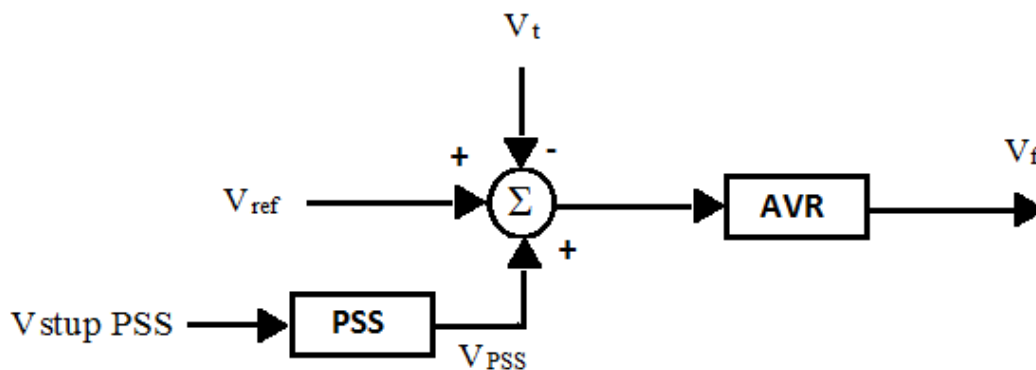
A také rovnicí pro vnitřní moment stroje:

$$m_i = p(\psi_{D1}i_{Q1} - \psi_{Q1}i_{D1}) \quad (3.45)$$

4. Stabilizátory výkonu – PSS

Power system stabilizers (PSS) neboli stabilizátory výkonu jsou doplňková součást budících systémů, která slouží k tlumení elektromechanických oscilací generátoru a tím chrání součásti generátoru jako je hřídel.

Výstupní signál z výkonového stabilizátoru V_{PSS} vstupuje do automatického napěťového regulátoru (AVR – Automatic voltage regulator), kde se přičítá k žádané referenční hodnotě V_{ref} . Od tohoto součtu se odečítá skutečná hodnota statorového napětí V_t . Následně hodnota vstupuje do AVR, který generuje budící napětí. Princip zapojení je vidět na obr 4.1.



Obr. 4.1: Blokové schéma připojení PSS k AVR

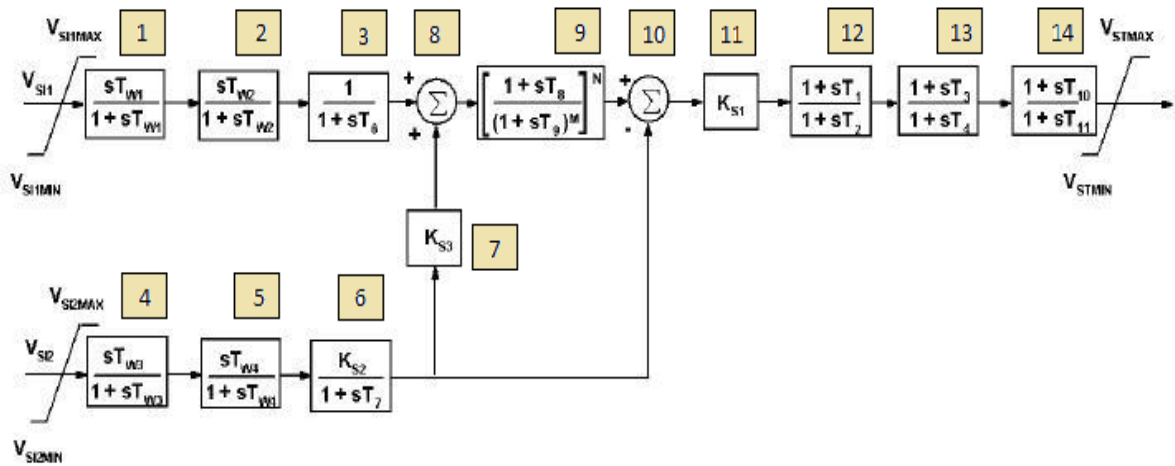
Norma IEEE Std. 421.5 rozlišuje 4 druhy PSS modelů:

- 1) PSS1A
- 2) PSS2B
- 3) PSS3B
- 4) PSS4B

Zde se budu podrobněji zabývat stabilizátorem PSS2B.

4.1. PSS2B

Tento stabilizátor využívá jako vstupů kombinaci výkon/frekvence nebo výkon/otáčky a jeho základní schéma jak ho popisuje již zmíněná norma, je na obr 4.1.

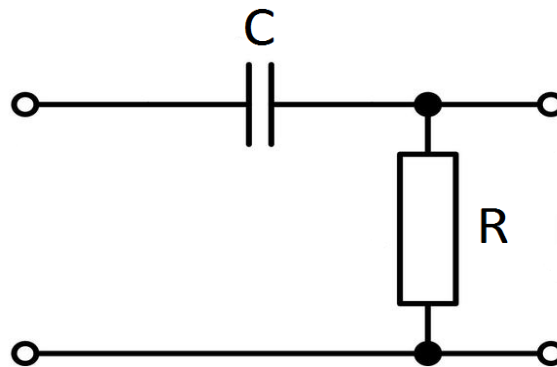


Obr. 4.1: Model stabilizátoru PSS2B, převzato z [3]

4.2. Popis modelu PSS2B

Horní propust – bloky 1,2,4,5

Horní propust je frekvenční filtr, který nepouští nízké frekvence podle nastavení. Jinými slovy propouští vyšší než nastavené frekvence. Elektronický ekvivalent horní propusti je derivační článek, neboli CR kombinace, viz obr 4.2.



Obr. 4.2: Ekvivalent horní propusti ve formě elektronických součástek:

Popis v Laplaceovi transformaci:

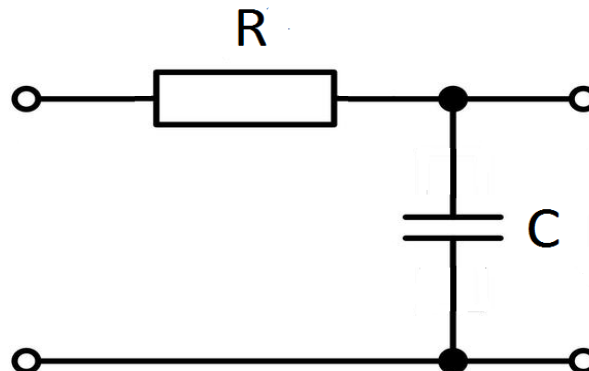
$$H(s) = \frac{sT}{1 + sT} \quad (4.1)$$

Horní propust zde plní funkci na odfiltrování stejnosměrné složky, jelikož PSS by měli reagovat pouze na změny.

Dolní propust – bloky 3,6

Dolní propust nepropouští nižší frekvence než je nastavená mez tohoto filtru.

Elektronický ekvivalent dolní propusti je integrační článek, neboli RC kombinace, viz obr 4.3.



Obr. 4.3: Ekvivalent dolní propusti ve formě elektronických součástek

Popis v Laplaceově transformaci:

$$H(s) = \frac{1}{1 + sT} \quad (4.2)$$

Ramp-tracking filter blok 9

Detekuje rampy, neboli rychlé změny hodnoty v čase a ty nepropustí.

Popis v Laplaceově transformaci:

$$H(s) = \left[\frac{1 + sT_1}{(1 + sT_2)^M} \right]^N \quad (4.3)$$

Zesílení – bloky 7,11

Slouží k zesílení signálu na vstupu do tohoto bloku K-krát, kde K je požadované zesílení.

Popis v Laplaceově transformaci:

$$H(s) = K \quad (4.4)$$

Sumátor – bloky 8,10

Sečte, resp odečte signály vstupující do tohoto bloku a na výstupu je výsledný signál.

Phase-lead – bloky 12,13,14

Slouží ke změně fáze vstupního signálu. Na výstupu změní fázi podle nastavení konstant bloku a tím se docílí posunu přibližně o 180° oproti vstupnímu signálu.

Popis v Laplaceově transformaci:

$$H(s) = \frac{s - z}{s - p_p} \quad (4.5)$$

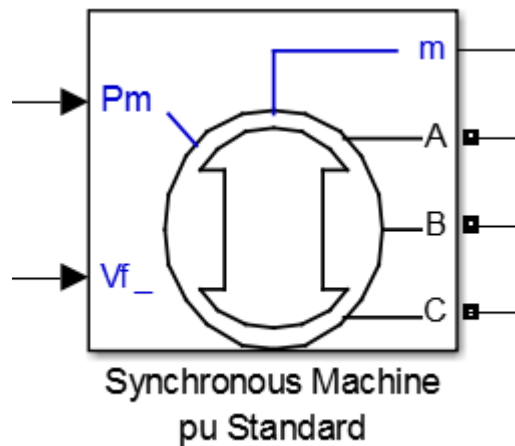
5. Počítačová simulace

5.1. Simulační program

K počítačové simulaci je pro potřeby této práce využít program Matlab a jeho součást pro simulování Simulink. Výběr toho programu byl nasnadě, jelikož je pro potřeby studentů ČVUT volně přístupný.

5.2. Model generátoru

Jako model generátoru byl zvolen předvytvořený blok Synchronous Machine pu Standard, který je vhodný pro simulaci dynamických dějů.

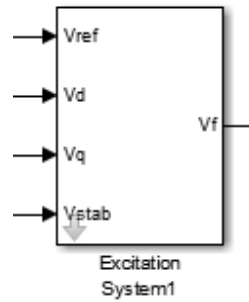


Obr. 5.1: Model synchronního generátoru

Jako vstupní parametr do modelu slouží mechanický výkon P_m a budící napětí V_f . Model je dále připojen na 3-fázovou síť ABC a má vyvedeny všechny potřebné parametry výstupem m .

5.3. Model budícího systému

Jako budící systém byl zvolen předvytvořený model z Matlabu, viz obr 5.2, který vyhovuje potřebám pro simulaci stabilizace výkonu. Jako vstupní veličiny používá referenční hodnotu satorového napětí, satorové napětí v ose d, satorové napětí v ose q a výstupní hodnotu ze stabilizátoru výkonu. Celkové schéma zapojení budícího systému je uvedeno v příloze.

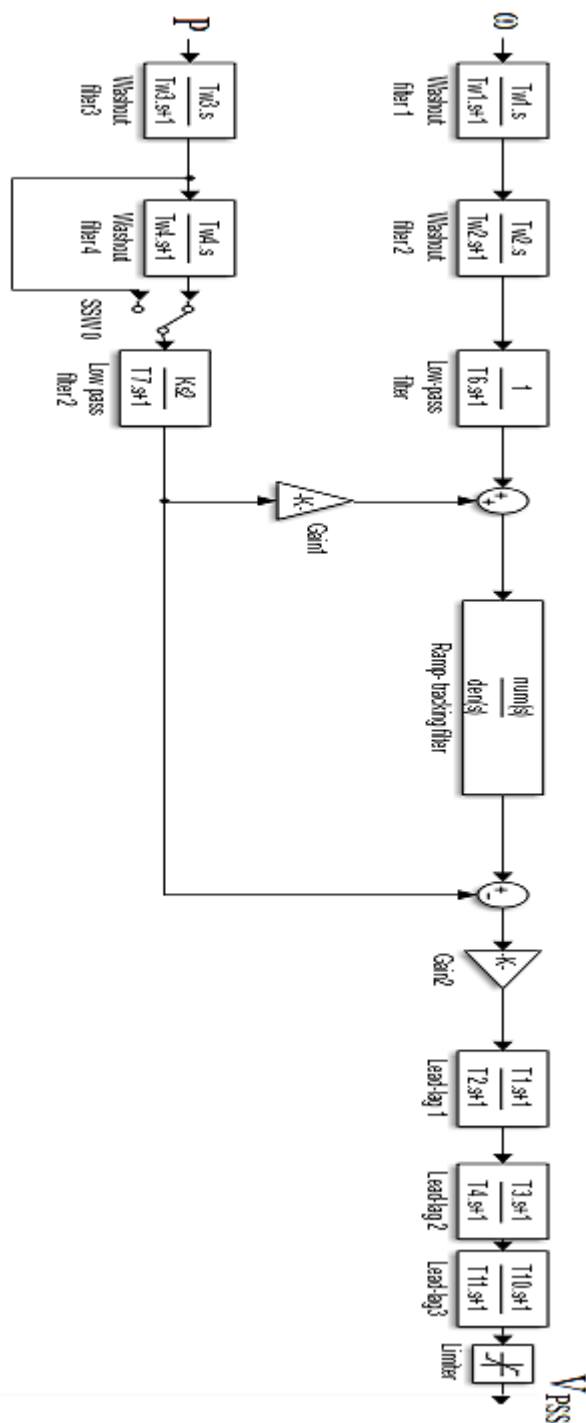


Obr. 5.2: Budící systém

Přepočítání d,q složek satorového napětí na celkové napětí satoru

$$u_t = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (5.1)$$

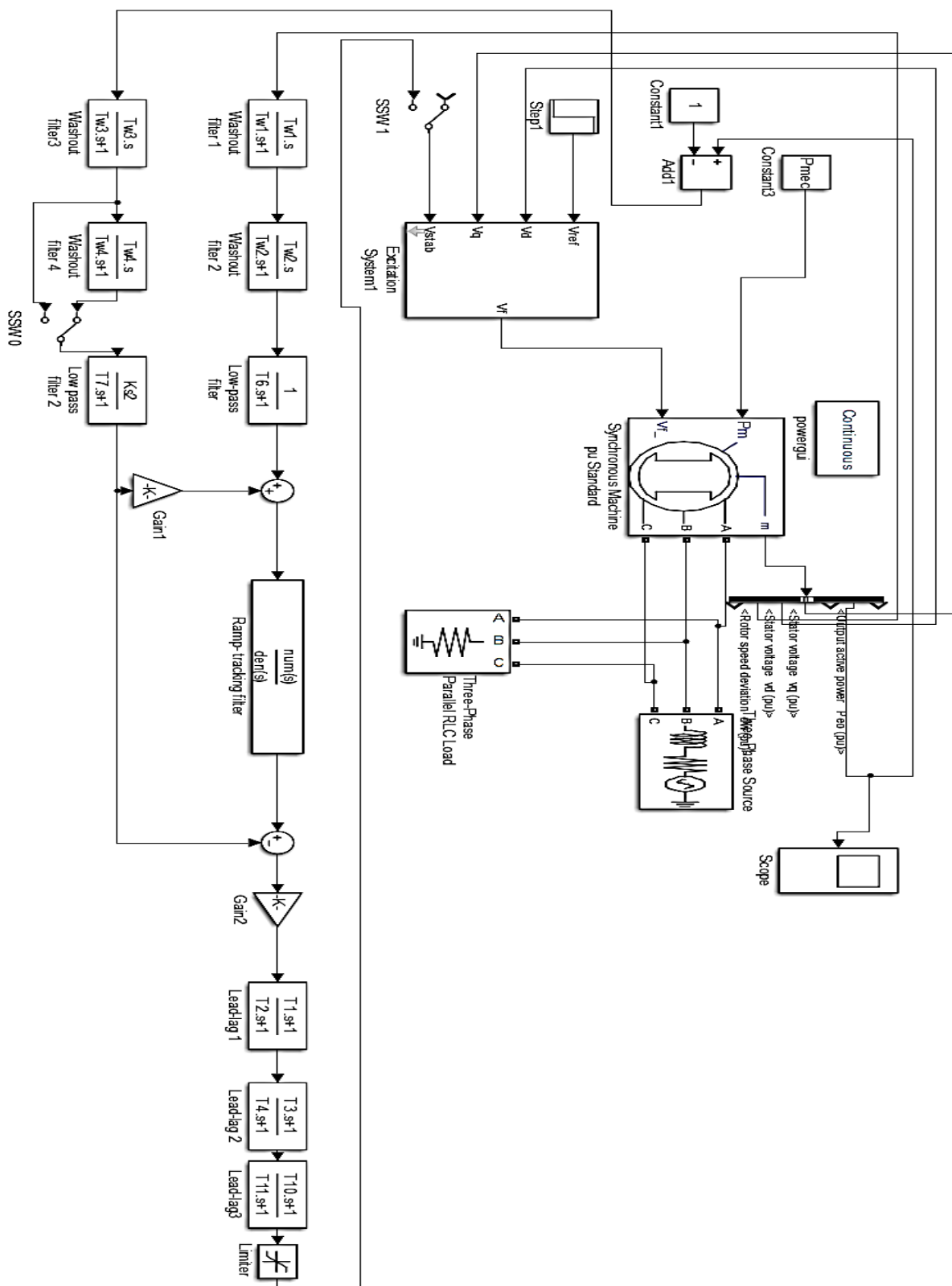
5.4. Model stabilizátoru výkonu



Obr. 5.3: Model stabilizátoru PSS2b

Jako vstup do stabilizátoru vstupují otáčky rotoru ω a výstupní výkon P . Výstupní signál V_{PSS} poté slouží k potlačení kývání činného výkonu generátoru.

5.5. Model celé soustavy



Obr. 5.4: Kompletní soustava pro simulaci z MATLABu

5.6. Výsledky simulace

Parametry simulace:

Parametry generátoru : viz. Příloha A

Nastavení parametrů PSS:

a) Washout filtry:

Chceme stabilizovat frekvence od 0,1 Hz, tomu odpovídá úhlová frekvence:

$$\omega = 2\pi f \cong 0,63 \quad (5.2)$$

Časové konstanty washout filtrů T_w pak budou:

$$T = \frac{1}{\omega} \cong 1,6 \quad (5.3)$$

b) Low-pass filtry:

Dolní propustit chceme odfiltrovat frekvence vyšší než 10 Hz, pak musí konstanty T být:

$$\omega = 2\pi f \cong 62,83 \quad (5.4)$$

$$T = \frac{1}{\omega} \cong 0,0016 \quad (5.5)$$

c) Ramp tracking filtry

Bylo použito doporučené nastavení z [3]

d) Zesílení

Zesílení před lead-lag filtra Ks1 bylo dolazeno metodou opakované simulace.

Zesílení Ks2 se obvykle nastavuje jako podíl časové konstanty low-pass filtru T a konstanty setrvačnosti H

$$K_{s2} = \frac{T_7}{2H} \quad (5.6)$$

A nakonec zesílení Ks3 se obvykle nastavuje rovno jedné.

e) Lead-lag filtry

Bylo použito nastavení z [9] a metodou opakované simulace dolazeno podle potřeby pro co nejlepší výsledek.

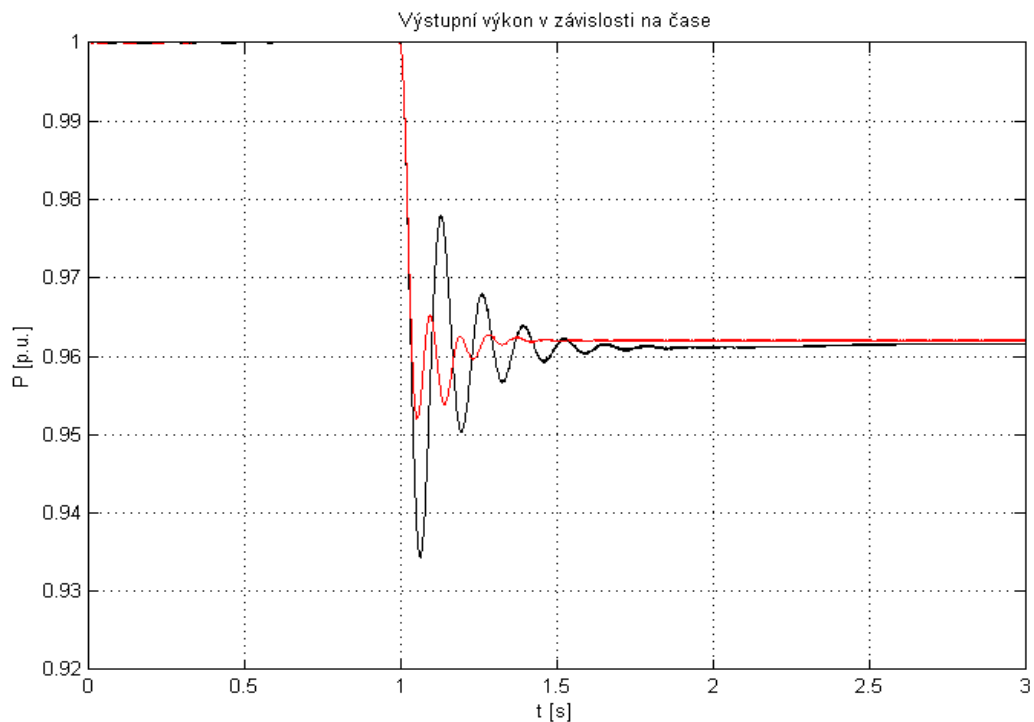
Parametr	Popis	Hodnota
Tw1,Tw2,Tw3,Tw4	Časové konstanty horních propustí(Washout filter)	2
Ks1	Zesílení před lead-lag filtra	5
Ks2	Zesílení dolní propusti	5,7
Ks3	Zesílení před sečtením signálů	1
T1	Časová konstanta lead-lag filteru 1	0,2
T2	Časová konstanta lead-lag filteru 1	0,04
T3	Časová konstanta lead-lag filteru 2	0,36
T4	Časová konstanta lead-lag filteru 2	0,12
T10	Časová konstanta lead-lag filteru 3	0,18
T11	Časová konstanta lead-lag filteru 3	0,01
H	Konstanta setrvačnosti	0,175
T6	Časová konstanta dolní propusti 1	0,02
T7	Časová konstanta dolní propusti 2	2
T8	Časová konstant ramp-tracking filteru	0
T9	Časová konstant ramp-tracking filteru	1
M	Stupeň ramp-tracking filteru	5
N	Stupeň ramp-tracking filteru	1

Tab. 5.1: Konstanty stabilizátoru výkonu

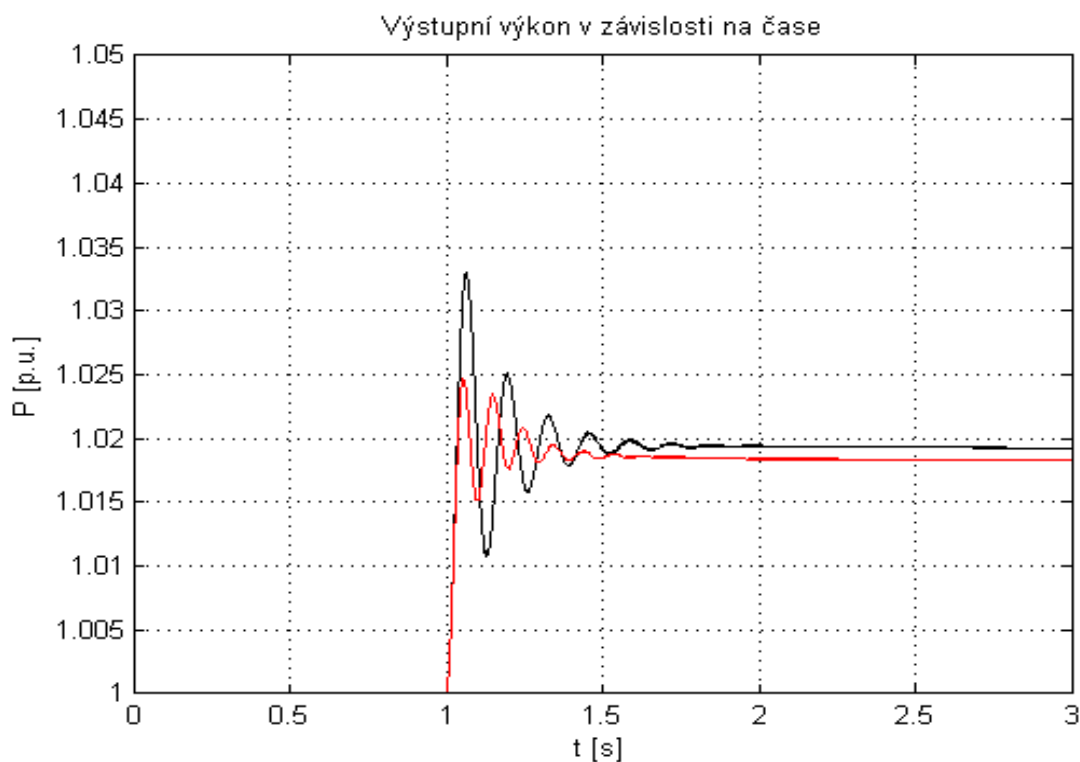
Simulace začíná na jmenovitých hodnotách všech veličin a v čase $t=0$ je generátor již připojen k síti.

Byla nasimulovaná skoková změna mechanického výkonu ze 100% na 96%. Činný v závislosti na čase je na obr. 5.5. ,kde černá čára reprezentuje výstupní činný výkon bez PSS a červená čára s připojeným PSS.

Následně byla nasimulována skoková změna mechanického výkonu ze 100% na 103%. Činný v závislosti na čase je na obr. 5.6. ,kde černá čára reprezentuje výstupní činný výkon bez PSS a červená čára s připojeným PSS.



Obr. 5.5. Výstupní činný výkon v závislosti na čase při snížení P_{mech}



Obr. 5.6. Výstupní činný výkon v závislosti na čase při zvýšení P_{mech}

6. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo namodelovat a ověřit funkčnost stabilizátorů výkonu. Jelikož se stabilizátory výkonu používají pro práci synchronních alternátorů na síti, byly nejprve popsány základy k synchronním generátorům. Následně byl proveden matematický popis, kde pro popsání modelu vhodného pro simulace, tj d-q model, bylo využito Parkovy transformace.

Dále jsem se zabýval samotnými stabilizátory a funkcí jednotlivých bloků v něm použitých. Vycházel jsem z normy [3], která popisuje základní typy stabilizátoru výkonu a dále jsem se zabýval jen jedním, často v praxi používaným, stabilizátorem PSS2B.

Bylo ověřeno, že MATLAB je vhodný program na simulování dynamických soustav. Pro simulaci bylo využito již implementovaných bloků, které odpovídají matematickému popisu. Nastavení parametrů stabilizátoru výkonu je velmi náročná činnost a pro každý generátor se musí volit jinak. Pro tuto práci byly částečně využity doporučené parametry firmy ABB, částečně parametry voleny odhadem pro dosažení co nejlepších výsledků.

Z naměřených výsledků můžeme vidět, že stabilizátory výkonu příznivě ovlivňují dynamickou stabilitu, jelikož snižují amplitudu kývání synchronního generátoru a zároveň snižují dobu ustálení.

Seznam použité literatury:

- [1] Voženílek, P. Novotný, V., Mindl, P.: Elektromechanické měniče. Praha: ČVUT. 2015, ISBN 978-80-01-04875-7
- [2] Pavelka, J.: Elektrické pohony. Praha: ČVUT. 2007, ISBN 978-80-01-03588-7
- [3] IEEE 421.5: Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., USA, New York 2005
- [4] Měříčka, J. Hamata, V. Voženílek, P.: Elektrické stroje. Praha: ČVUT. 2000, ISBN 80-01-02109-2
- [5] Pavelka, J. Zdeněk, J.: Elektrické pohony a jejich řízení, ISBN 978-80-01-04642-5
- [6] Autor neznámý. Synchronní stroje [online]. [vid. 2016-07-04]. Dostupný na [www: <http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/SG.pdf>](http://www.spse.dobruska.cz/download/sokol/SG.pdf).
- [7] CHROBÁK, P. *Dynamický model a odbuzení bezkartáčového synchronního generátoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 61 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
- [8] Kamentsky. M, Filtered audio demo [online] [vid. 2016-04-04]. Dostupný na [www: <https://stanford.edu/~boyd/ee102/conv_demo.pdf>](https://stanford.edu/~boyd/ee102/conv_demo.pdf).
- [9] Dokumentace firmy ABB, Simplified computer representation for Power System Stability Studies, 2010
- [10] Webová stránka [vid 2016-04-03]:
<<http://lib.convdocs.org/docs/index-121449.html?page=5>>

Příloha 1 – Parametry generátoru použitého pro simulaci

Three-Phase Synchronous Generator with Salient Pole Rotor (Laminated Pole)

Nominal data		Type	1FC2 353 - 4
Output	S_n	400 kVA	Standard IEC 60034
Voltage	U_n	400 V	Marine classification ---
Frequency	f_n	50 Hz	Ex-Protect ---
Power factor	p.f.	0,8	Ex-Standard ---
Current	I_n	577 A	Cooling system IC01
Speed	n_n	1500 min ⁻¹	Ambient temperature 40 °C
Torque	M_n	2,5 kNm	Cooling water temperature --- °C
Winding pitch 2/3		no	Installation altitude 1000 m
Excitation	brushless with AVR and auxiliary winding		Insulation class 155 (F)
Mounting			Stator Winding Temperature <= 145 °C (R)
Enclosure			Field Winding Temperature <= 145 °C (R)

Operating data		Generator driven by: -		
	Apparent output	Electrical output	Mechanical input	Shaft input torque
Power factor 0,80	400 kVA	320 kWe	340 kWm	2,17 kNm
Power factor 1,00	400 kVA	400 kWe	421 kWm	2,68 kNm

Reactances and time constants				Z_n	0,400 Ω
	unsat.	sat.	unsat.	sat.	
X_d		220,3 %	X_q	117,1 %	T_{d0}' 1,879 s
X_d'		16,5 %	X_q'	117,1 %	T_d' 0,141 s
X_d''		14,1 %	X_q''	17,9 %	T_d'' 0,017 s
X_2		16,0 %	X_0	7,1 %	T_a 0,026 s

Efficiencies						
S/S _n		25	50	75	100	110 %
Power factor 0,80					94,0	%
Power factor 1,00					95,0	%

Short circuit data		
I_k''	4,09 kA	Initial short circuit current (3 ~)
I_s	10,40 kA	Max. peak current (3 ~)
I_k ≥	1,73 kA	Sustained short circuit current
k_c	0,45	Short circuit ratio
M_{k2}	23 kNm	Initial short circuit torque (2~)
M_{k3}	18 kNm	Initial short circuit torque (3~)

Other data	
AVR type	Not supply SEM
* In case of non-locating bearings this will have effect on the shaft end.	

Remarks			

Change -	Note issued	DATE 12.08.2015	NAME Frei	Electrical Data Sheet		Project No.	Project Code TENEL
				SIEMENS		Job No.	Document No.
						Type 1FC2 353 - 4	Sheet 1 of 2

