



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

ROZBOR A SIMULACE STATICKÉHO BUZENÍ PSS

ANALYSIS AND SIMULATION OF STATIC EXCITATION PSS

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Petr Kalandra

Bc. Ondřej Winkler

Praha 2014

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svojí diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, software, atd.) citované v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků

porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Praze dne

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval v první řadě vedoucímu práce panu **Ing. Kalandrovi**, který mě uvedl do tématu a tím pádem podhalil nové směry v elektrických sítích.

Dále obrovské poděkování patří firmě ELPK Praha spol. s.r.o. a konkrétně zaměstnancům p. Janečkovi a p. Ing. Sivákovi za představení PSS v praxi.

Děkuji i firmě TENEL spol. s.r.o. za seznam literatury zabývající se tématy PSS a konkrétních typů stabilizátorů i norem (viz. přílohy).

A samozřejmě největší zásluhu za umožnění studovat nejprestižnější školu v České republice a velkou psychickou podporu v mnohdy vypjatých školních situacích má rodina v čele s rodiči, kterým tímto mnohokrát děkuji.

Velké poděkování musí přijít i učitelům a profesorům z celé katedry elektroenergetiky, kteří nás svědomitě učili nejen novému poznání, ale i inženýrského pohledu na věci okolo nás.

ABSTRAKT

Současný rozvoj energetiky, jakožto nenahraditelného zdroje moderního života a běžného uživatele, se dostává mnohdy do patových situací, kdy sítě jsou přetěžovány nejen nestabilními odběry zákazníků v diagramu denního zatížení, ale i výkyvy dodávky výkonu z obnovitelných zdrojů nebo spojováním sítí s okolními státy. Mnohdy ovšem není tak jednoduché postavit nové páteřní trakční vedení, které by tento problém vyřešilo a musí nastoupit novější zařízení, které v našem případě představuje PSS. Tento stabilizátor nám z přenášeného výkonu odstraňuje nechtěné parazitní oscilace způsobené kmitáním zdrojů energie či odpínacími procesy sítě. V našem případě se bude jednat o frekvenční překmity v řádu 0,2-3,5Hz.

KLÍČOVÁ SLOVA

Síť, elektrická soustava, rozvoj energetiky, PSS, power system stabilizator, PSS2B, budící soustava, stabilizátor, útlum, překmit.

ABSTRACT

The current energy development, as an irreplaceable source of modern life, and the average user, often gets into deadlocks, when networks are overloaded not only unstable Subscriptions customers daily load diagram, but also fluctuations of supply of power from renewable sources or bonding networks with neighboring countries. Often, however, is not so easy to build new overhead lines backbone that would solve this problem and has to get on newer devices, which in our case is the PSS. The stabilizer us from the power transmitted removes unwanted parasitic oscillations caused by vibration energy sources or processes of a switching network. In our case it will be the frequency overshoot of the order of 0.2 to 3.5 Hz.

KEY WORDS

Network, electrical system, energy development, PSS, power system stabilizers, PSS2B, excitation system, stabilizer, damping, overshoot.

OBSAH

1	Úvod.....	11
1.1	Téma práce	11
2	Teoretický rozbor daného tématu.....	12
2.1	Synchronní alternátor	12
2.2	Budící soustavy - BS	12
2.2.1	Důležité pojmy a hodnotící kritéria	14
2.2.2	Teorie buzení synchronního generátoru	15
2.2.3	Základní elementy budícího systému	18
2.2.4	Typy budících systémů.....	19
2.3	Poruchové stavy buzení.....	25
2.3.1	Ztráta buzení.....	25
2.3.2	Ochrana proti přebuzení	26
2.3.3	Ochrana proti ztrátě stability (synchronismu)	27
2.4	Analýza ES (elektrické soustavy).....	30
2.4.1	Dynamická stabilita ES	32
2.5	Power System Stabilizer.....	40
2.5.1	Historie PSS	40
2.5.2	Definice PSS.....	40
2.5.3	Princip PSS.....	41
2.5.4	Základní principy při ladění PSS.....	43
2.5.5	Schopnost PSS účinně tlumit lokální a systémové výkyvy	44
2.5.6	Typy oscilací v přenosové soustavě	45
2.6	Typy PSS.....	47
2.6.1	PSS1A	47
2.6.2	PSS2B.....	48
2.6.3	PSS3B.....	49
2.6.4	PSS4B.....	50
2.7	Systémové služby	51
2.7.1	Udržování kvality elektřiny	51
2.7.2	Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase	51
2.7.3	Obnovení provozu	52
2.7.4	Dispečerské řízení	52
2.8	Zajištění stability přenosu.....	53
2.8.1	Požadavky na provoz elektrárenských bloků	54
3	Praktická část – Simulace PSS2B v programu MATLAB.....	57
3.1	Všeobecné informace	57
3.2	Postup	57
3.3	Schéma PSS2B v programu SIMULINK	59
3.4	Ovlivňování PSS konstantami	61
3.4.1	Studie 1.....	61

ROZBOR A SIMULACE STATICKÉHO BUZENÍ PSS

3.4.2	Studie 2.....	62
3.5	Reálná vstupní data do PSS2B	64
3.6	Výsledné nastavení pomocí metody Trial and Error	65
4	Závěr	68
5	Seznam bibliografických citací a zkratk.....	69
5.1	Seznam citací.....	69
5.2	Seznam zkratk.....	70
6	Přílohy	70

Seznam obrázků

Obrázek 1– Typy synchronních strojů – a) turboalternátor, b) hydroalternátor, c) invertovaný hydroalternátor.....	12
Obrázek 2 – Stanovení odezvy budiče [3]	15
Obrázek 3 – Doba odezvy napětí regulovaného alternátoru na skok žádané hodnoty	15
Obrázek 4 – Blokové schéma systému řízení buzení.....	18
Obrázek 5 – Stejnoseměrný budicí systém s rotačním zesilovačem napěťového regulátoru	20
Obrázek 6 - Amplidyn.....	21
Obrázek 7 – Řízení alternátorové pole pomocí usměrňovačů budicího systému	22
Obrázek 8 – Bezkartáčový budicí systém	23
Obrázek 9– Budicí systém s napěťovým zdrojem řízeným usměrňovači.....	24
Obrázek 10 – Budicí systém s kompaundním zdrojem s usměrňovači.....	25
Obrázek 11 – Dynamická stabilita, metoda ploch [5].....	28
Obrázek 12 – Náhradní obvod pro vyjádření kyvů generátoru v impedanční rovině [5].....	29
Obrázek 13 – Časový rozsah přechodných dějů v ES [převzato z 6]	31
Obrázek 14 – Rozdělení stability elektrizační soustavy	32
Obrázek 15 – Jednostrojový model soustavy [převzato z 6]	33
Obrázek 16 – Model výpadku jedné části vedení [převzato 6].....	34
Obrázek 17 –Časové průběhy zátěžného úhlu a skluzu generátoru [převzato z 6]	35
Obrázek 18 – Náhradní schéma a fázorový diagram [převzato z 6].....	36
Obrázek 19 – Zobrazení kývání činného výkonu při malé změně svorkového napětí.....	36
Obrázek 20 – Odchyšky frekvence v závislosti na velikosti výpadku výkonu [převzato z 6]	38
Obrázek 21 – Nosové křivky pro $E=1$ [převzato z 6]	39
Obrázek 22 – Model jednostrojového system s regulací napětí [4].....	41
Obrázek 23 – Fázorové diagramy s konstantním buzením, s napěťovou regulací a s regulací buzení + PSS [8].....	42
Obrázek 24 – Fázové zpoždění GEP a charakteristika PSS.....	43

Obrázek 25 – Inter Unit Oscillation	46
Obrázek 26 – Local Mode Oscillation	46
Obrázek 27 – Inter Area Oscillation	47
Obrázek 28 – Type PSS1A – jednovstupové PSS	47
Obrázek 29 – Type PSS2B s dvojitým.....	48
Obrázek 30 – Typ PSS3B s dvojitým vstupem.....	49
Obrázek 31 – PSS4B - mnohavstupové PSS	50
Obrázek 32 – Struktura a regulace U a Q v PS.....	53
Obrázek 33 – Přehled služeb a odpovídajících podpůrných služeb.....	54
Obrázek 34 – Schéma zapojení PSS2B- dle typu vstupu.....	58
Obrázek 35 – Schéma PSS2B vytvořené v programu Matlab- SIMULINK	7
Obrázek 36 - Jednotkový a pulzní generátor s konstantami 1	62
Obrázek 37 - Jednotkový a pulzní generátor s konstantami 2	63
Obrázek 38 - Reálný výstup z PSS2B.....	64
Obrázek 39 - Vstupní výkon do PSS	65
Obrázek 40 - Výstup z PSS naměřený ve Skotsku	66
Obrázek 41 - Výsledek napodobení metodou Trial and Error	66

1 Úvod

Systémy elektrické energie často operují v kritických situacích, které mohou vést k problémům se stabilitou elektrické sítě a v horších případech i k black-outu. Velké přerušení dodávky elektrické energie se občas vyskytují v elektrických sítích po celém světě a mohou vést až k panice ve společnosti. Z důvodu dnešních klimatických změn se Evropská unie rozhodla, že minimálně 20% celkové elektrické energie musí pocházet z obnovitelných zdrojů elektrické energie, tzv. OZE, do roku 2020 (známe také jako Cíl 20-20-20 [10]). Ke splnění těchto cílů musí být alternativní zdroje, kterými jsou například malé vodní elektrárny nebo větrné farmy, implementovány do přenosové sítě. Tato rozhodnutí ovšem sebou nesou i problémy se stabilitou sítě, která nemůže být využívána blízko maximálnímu limitu přenosové kapacity.

1.1 *Téma práce*

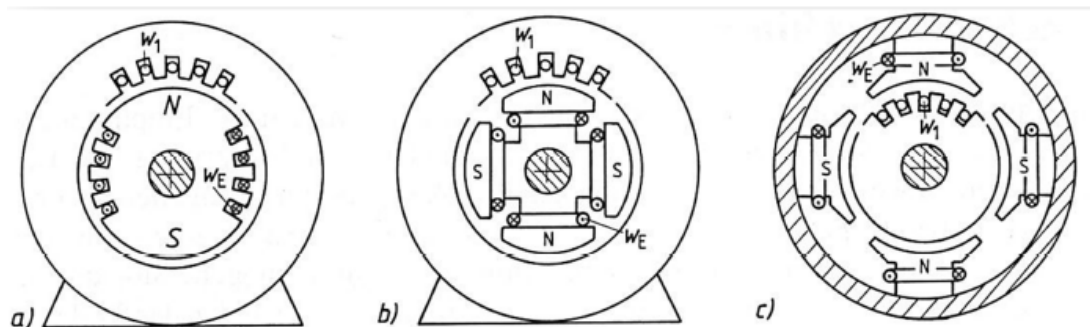
Práce bude rozdělena na dvě části a to teoretickou část a část praktickou. V teoretické části se seznámíme se synchronními stroji, jakožto zdroji elektrické energie. Dále se budeme zajímat o jednotlivé typy budících systémů v provozních a poruchových stavech. Dynamická stabilita elektrické sítě naváže na budící soustavy, kde si vysvětlíme například ztrátu synchronismu. Dostaneme se k nejdůležitější části s popisem, historií a principem PSS. Následně si popíšeme jednotlivé typy PSS a sepíšeme si i povinnosti a problémy přenosových soustav (PS). Druhá, navazující část, nám poodhalí, jak lze PSS2B nasimulovat. Vložíme skutečná naměřená data jako vstupy do nasimulovaného stabilizátoru a pokusíme se mu nastavit konstanty dle skutečnosti tak, aby výstupní signál byl maximálně efektivní a byl schopen utlumit oscilace sítě a generátoru samotného.

2 Teoretický rozbor daného tématu

2.1 Synchronní alternátor

Synchronní alternátor (SA) je elektrický točivý stroj, který mění mechanickou energii na energii elektrickou při využití točivého magnetického pole. Nejvyšší výkony těchto strojů dosahují například u dvou pólového generátoru zhruba 1200MVA při frekvenci 50Hz a napětí 21kV. U čtyřpólového se dosahuje 1700MVA při napětí 27kV. Největší vertikální hydrogenerátory ve vodních elektrárnách mají výkon kolem 800MVA.

Základní částí alternátoru je nepohyblivý stator a na hřídeli se otáčející rotor. Synchronní alternátor má na statoru trojfázové vinutí a na rotoru budící vinutí. Je-li pohybováno mechanickou silou lopatkami turbíny, které otáčí rotorem a v jeho budícím vinutí prochází stejnosměrný proud, vzniká točivé magnetické pole, které v trojfázovém vinutí statoru indukuje trojfázové střídavé napětí.



Obrázek 1– Typy synchronních strojů – a) turboalternátor, b) hydroalternátor, c) invertovaný hydroalternátor

Výhodou velkého využití synchronních alternátorů je, že pracují při konstantní rychlosti a s málo proměnným činným zatížením. Řízením jejich budícího proudu se potom udržuje energetikem výrobní elektrárny požadovaný účiník nebo jalový výkon.

2.2 Budící soustavy - BS

Budící systém je soubor zařízení, ústrojí, přístrojů a jednotek určených k buzení stejnosměrným proudem automaticky regulovaných turboalternátorů při normálních i havarijních provozních stavech **Error! Reference source not found.**

Dále si definujme pojem budič:

Budič – zařízení, které je součástí budicího systému, určené k napájení rotorového vinutí turboalternátoru stejnosměrným proudem, které je představováno stejnosměrným točivým strojem nebo polovodičovým měničem spolu se zdrojem střídavého napájecího proudu **Error! Reference source not found.**

Budicí systémy alternátorů zahrnují tyto komponenty:

- Systém zdrojů budicího proudu (*budič*)
- Systém regulace budicího proudu (*regulátor*)
- Systém odbuzování (*odbuzovač*)

Na budicí systémy jsou kladeny vysoké požadavky. Musí pracovat za všech okolností například při poruchových či přechodných dějích. Nároky na požadavky rostou s výkonem alternátoru a konstrukčními omezeními s ohledem na statickou a dynamickou stabilitu alternátoru.

Požadavky na budicí soustavy:

- Vysoká provozní spolehlivost (vyšší než-li vlastní alternátor) – většinou tedy obsahuje rezervní budič. Spolehlivost ovlivňuje zejména systém kroužkového sběracího ústrojí a zajištěnost buzení vlastního budiče
- Plynulá a rozsáhlá regulace budicího proudu a napětí pro zajištění celého provozního rozsahu alternátoru s rezervou stropu pro destabilizační přechodné děje (pro rotační budiče 1.6 až 1.8 U_{fN} a pro závislé až 2 U_{fN}).
- Dostatečná rychlost změny budicího napětí charakterizovaná tzv. odezvou budiče naprázdno – střední rychlost změny poměrného napětí budiče za prvních 0.5 sec. ($v=0.5$ až 2)
- Dostatečná rychlost odbuzení alternátorů při náhlém výkonovém odlehčení nebo poruše

Další požadavky na regulátory budicího proudu:

- Udržování žádané velikosti svorkového napětí alternátoru a dodávky jalového výkonu nezávisle na činném zatížení (včetně nouzových a poruchových stavů) minimálně pro spolehlivý chod vlastní spotřeby bloku
- Udržování rozdělení jalového zatížení u paralelně pracujících bloků
- Hlídní meze podbuzení, jako limitu statické stability chodu alternátoru

2.2.1 Důležité pojmy a hodnotící kritéria

Z knihy Regulační a budící systémy synchronních strojů [3].

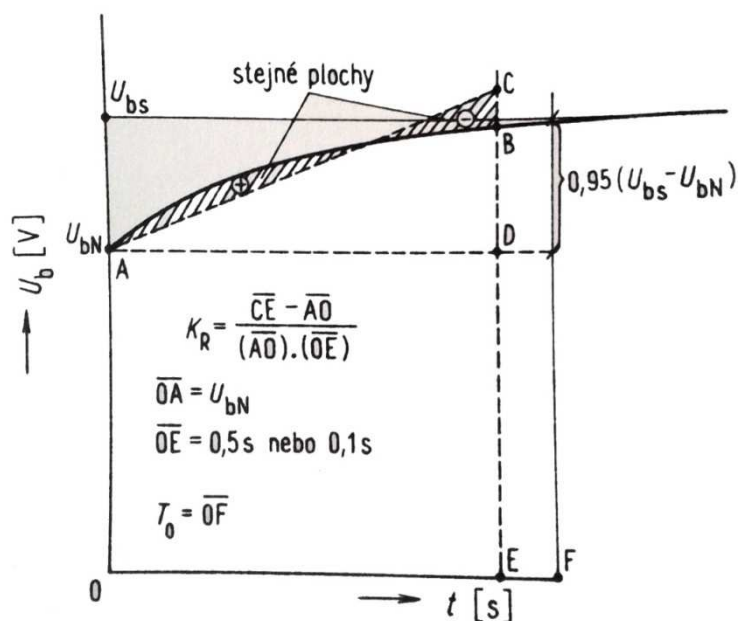
Stropní napětí U_{BS} (V) - je maximální hodnota stejnosměrného napětí na výstupu budiče zatíženého odporem stejným, jako je odpor budícího vinutí při jeho pracovní teplotě.

Poměrné stropní napětí K_S - je dáno vztahem $K_S = U_{BS}/U_{BN}$, kde U_{BN} je budící napětí na kroužkách rotoru pro jmenovité parametry stroje.

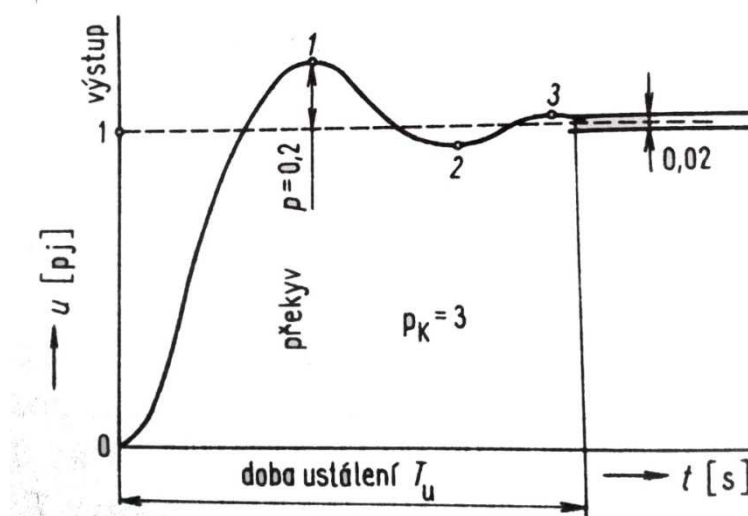
Odezva napětí K_R (s^{-1}) - je hodnota, kterou získáme vyhodnocením časového průběhu vzrůstu napětí na budiči podle návodu stanoveného na [Obr.2] v časovém intervalu 0 až 0,5 s, popř. 0 až 0,1 s. Pro budící soustavy mající dobu odezvy $T_0 \leq 0,1$ sekundy se měřený interval odezvy uvažuje do 0,1 sekundy, protože odezva pro 0,5 sekund již nevystihuje dobře jejich jakost. Pro rozlišení bude označena $K_{R0,1}$.

Doba stropního buzení T_S (s) - je doba, po kterou je na rotor synchronního stroje přiloženo stropní napětí.

Doba odezvy napětí T_0 (s) - je doba, kdy napětí na budiči dosáhne 95 % rozdílu mezi U_{BS} a U_{BN} [Obr.2]. Budící soustava s $T_0 \leq 0,1$ s se nazývá rychlá budící soustav.



Obrázek 2 – Stanovení odezvy budiče [3]



Obrázek 3 – Doba odezvy napětí regulovaného alternátoru na skok žádané hodnoty

Na obrázku 3 můžeme vidět typickou odezvu synchronního stroje vybaveného řízeným budícím systémem na skokovou změnu na vstupu. Máme zde několik veličin, kterými jsou - *překyv* p , *počet kyvů* p_j a *doba ustálení* T_u (s).

2.2.2 Teorie buzení synchronního generátoru

Abychom mohli blíže pochopit problematiku PSS, musíme vycházet ze základních principů motorů a jejich buzení. Zde budeme vycházet s poznatků Michaela

Faradaye, kdy experimentálně objevil skutečnost, že na vodiči, který se pohybuje v magnetickém poli, vzniká elektrické napětí a to s velikostí, která je přímo úměrná magnetické indukci B , délce vodiče a rychlostí, s níž se vodič pohybuje. Vzájemný vztah, který si upravíme na zjednodušený případ, vypadá takto:

$$U_i = B \cdot l \cdot v \quad (2-1)$$

kde:

U_i	-	Indukované napětí [V] = [m ² · kg s ⁻³ A ⁻¹]
B	-	Magnetická indukce [T] = [kg s ⁻² A ⁻¹]
l	-	Délka vodiče [m]
v	-	Rychlost pohybujícího se vodiče [m s ⁻¹]

Při opominutí určitých faktů, které by nám výpočet lehce ovlivnily, berme U_i jako svorkové napětí generátoru, l jako počet závitů statorového vinutí a v za úhlovou rychlost hřídele motoru. Za samotnou budící soustavu synchronního generátoru můžeme považovat magnetickou indukci B . Zdrojem magnetické indukce synchronního generátoru je stejnosměrný elektromagnet, provádíme změny velikostí budícího proudu.

Velikost magnetické indukce je přímo úměrná velikosti magnetického indukčního toku a nepřímo úměrná ploše, kterou magnetický tok prochází. Z toho nám vyjdou následující rovnice:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (2-2)$$

$$\Phi = L \cdot I \quad (2-3)$$

$$B = \frac{L \cdot I}{S} \quad (2-4)$$

kde:

Φ	-	Magnetický tok [Wb] = [m ² · kg s ⁻² A ⁻¹]
S	-	Plocha [V] = [m ²]
L	-	Indukčnost [H] = [m ² · kg s ⁻² A ⁻²]
I	-	Elektrický proud [A]

Plocha S a indukčnost rotorového vinutí L jsou konstanty dané konstrukcí rotoru, můžeme dále uvažovat:

$$\frac{L}{S} = \text{konst.} \quad (2-5)$$

Potom při konstantních otáčkách generátoru:

$$k \cdot \Delta I_b = \Delta U_i \quad (2-6)$$

Touto úpravou jsme došli k vyjádření, že je zde lineární závislost mezi budícím proudem I_b a výstupním napětím U_i .

Při zapínání zdroje stejnosměrného napětí na cívku rotorového vinutí se proud postupně zvětšuje z nulové hodnoty a za nějaký čas dosáhne ustáleného stavu. Při růstu proudu se současně vytváří magnetické pole cívky. Magnetický indukční tok roste s proudem lineárně dle vztahu (2.3) a na cívce se indukuje napětí opačné polarity. Pro vznik proudu v cívce je nutno vykonat práci na překonání indukovaného napětí:

$$-U_i = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (2-7)$$

Celkové množství energie je dáno součinem proudu a napětí za čas:

$$W_b = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} \cdot I = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad (2-8)$$

kde: W_b - Spotřebovaná energie buzení $[J] = [m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}]$

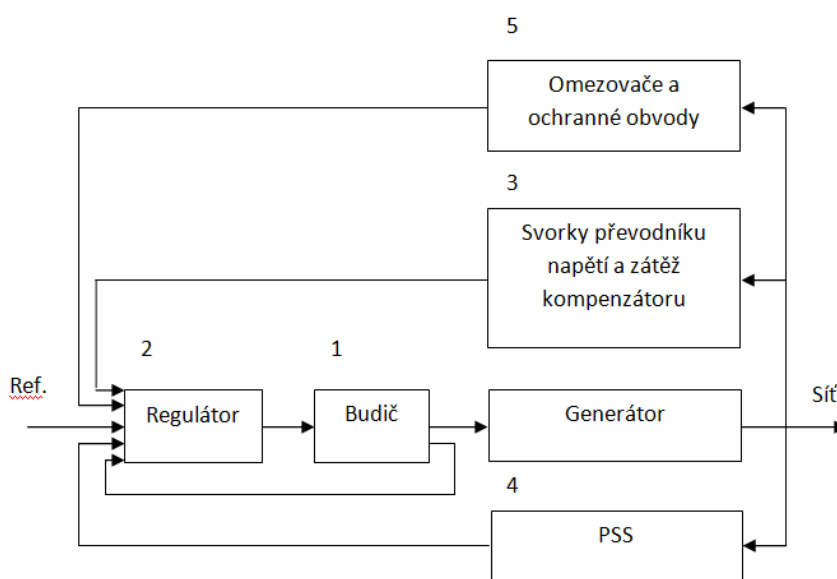
Vztahy (2.7) a (2.8) naznačují, že spotřeba energie buzení je jen v době, kdy dochází k nárůstu budícího proudu. Stejně rovnice samozřejmě platí i v případě klesání budícího proudu, jen se energie vrací zpět do zdroje.

V případě ideální indukčnosti budícího vinutí generátoru docházíme k poznatku, že v průběhu provozu by pro budící vinutí nebylo zapotřebí žádné další energie kromě té, která by se spotřebovala při startu.

Ve skutečnosti se budící vinutí generátoru nechová jako ideální indukčnost a tudíž určitou energii nutně vyžaduje k jejímu provoznímu stavu. V praxi je tento příkon okolo 1% jmenovitého výkonu generátoru.

2.2.3 Základní elementy budícího systému

Na obrázku 4 vidíme funkční blokové schéma typického řízeného budícího systému pro velké synchronní generátory. Dále je uveden stručný popis obrázku. **Error! Reference source not found.**



Obrázek 4 – Blokové schéma systému řízení buzení

- (1) Budič – Poskytuje stejnosměrný proud pro pole vinutí synchronního stroje, tvoří napájecí fázi budícího systému
- (2) Regulátor – Zpracovává a zesiluje vstupní signál na řídicí úroveň a tvar tak, aby byl vhodný pro hladinu budiče. Zajišťuje oboje jak pro regulaci, tak i pro stabilizační funkce budícího systému (rychlost zpětné vazby nebo pro derivačně integrační kompenzátor)
- (3) Svorky převodníku napětí a zátěže kompenzátoru – Snímání svorek generátorového napětí, usměrňuje a filtruje do stejnosměrné úrovně a porovnává s referenční hodnotou, která je reprezentována požadovaným napětím na svorkách. Navíc může poskytnout kompenzaci zátěže, pokud je

žádoucí udržení konstantního napětí na stejném bodu elektricky vzdáleného od svorek generátoru (například někde uprostřed zvyšovacího transformátoru).

- (4) Power system stabilizator – Představuje přidání vstupní signál pro regulátory utlumení systémových oscilací. Mezi některé obyčejné vstupní signály například patří odchylka rychlosti rotoru od zadané hodnoty, úhlové zrychlení a odchylka frekvence
- (5) Omezovače a ochranné obvody – Zajišťuje širokou řadu kontrolních a ochranných funkcí, které dále zajišťují kapacitní limity budiče a synchronního generátoru tak, aby nebyly překročeny. Některé z běžně užívaných funkcí jsou omezovač budicího proudu, omezovač svorkového napětí, ochrana a regulátor - “U/f“ a omezovač podbuzení.

2.2.4 Typy budících systémů

Budící systémy mají mnoho různých typů, které se odvíjí od rozvoje nových a stále výkonnějších technologií. Celkově můžeme v dnešní době dělit tyto formy do následujících tří kategorií, založených na různých typech budících zdrojů:

- Stejnoseměrné budící systémy (DC)
- Střídavé budící systémy (AC)
- Statické budící systémy

Další možnost rozdělení budících systémů:

- Závislá soustava – je soustava, která potřebuje pro vlastní chod budící energii přímo ze sítě napájející daný stroj. Dále se přes usměrňovače transponuje ze střídavého proudu na proud stejnosměrný.
- Nezávislá soustava – je soustava opačná k soustavě závislé, tj. zdrojem buzení je stejnosměrný či střídavý točivý budič, jenž je poháněn hřídelí stroje.

A třetí možnost dělení:

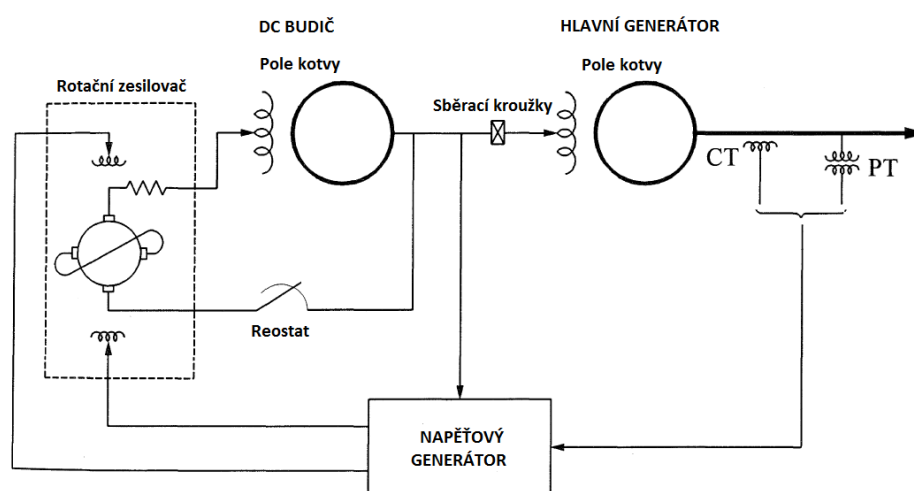
- Kartáčová soustava – budící proud do budícího vinutí je přiváděn skrze kartáče a sběrací kroužky
- Bezkartáčová soustava – budící proud je přiváděn rovnou z usměrňovačů umístěných na společné hřídeli s budícím vinutím a zdrojem energie buzení.

Nyní si blíže rozeberme základní fungování jednotlivých typů napájecí kategorie.

2.2.4.1 Stejnoseměrné budící systémy (DC)

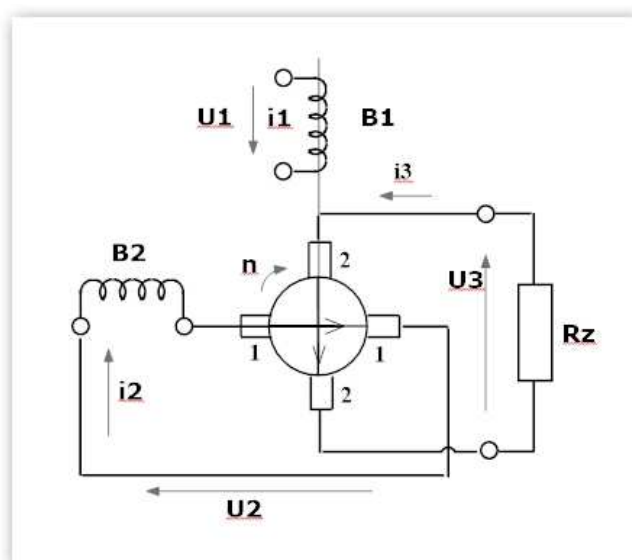
Jak již samotný název uvádí, jedná se o budící systém z kategorie využívající zdroje stejnosměrného výkonu k poskytování proudu rotorovému vinutí synchronního stroje skrze sběrací kroužky. Budič může být poháněn vlastním motorem, jenž bude mít vlastní buzení, tj. buzení sériové, nebo separované, tj. s cizím buzením, nebo otáčející se hřídelí generátoru. Jestliže využijeme možnosti s cizím buzením, pole budiče je napájeno pomocným budičem, který obsahuje generátor s permanentními magnety.

Stejnoseměrné budící systémy jsou již spíše archaickou technickou možností. Používaly se převážně v letech 1920 až 1960. Po sedmdesátých letech začaly být tyto systémy nahrazovány střídavými budícími systémy nebo statickými. Stále je však mnoho jednotek tohoto typu, které stále vyžadují další stabilní vývojové studie.



Obrázek 5 – Stejnoseměrný budící systém s rotačním zesilovačem napěťového regulátoru

Na zjednodušeném obrázku 5 vidíme klasický DC budící systém s amplidynem napěťovým regulátorem. Obrázek obsahuje komutátorový budič, který dodává stejnosměrný proud do hlavního generátorového pole skrze sběrací kroužky. Budící pole je kontrolováno a řízeno amplidyem. Amplidyn, tj. rotační zesilovač, je speciálním typem zesilovače se dvěma stupni zesílení v jednom soustrojí (motor-generátor). Pracuje tak, že střídavý motor při konstantní rychlosti je mechanicky spárován se stejnosměrným generátorem fungujícím jako zesilovač s velkým zesílením. V tomto rotačním zesilovači (dynamu) působí změna budícího výkonu zesílení odebraného elektrického výkonu až 10 000 krát, takže malý elektrický signál o výkonu 1W může řídit velký alternátor s příkonem 10 kW.



Obrázek 6 - Amplidyn

Budící proud i_1 [Obr.6] vytváří v otáčející se kotvě magnetický tok Φ_1 , který v ní indukuje napětí u_2 na kartáčích 1. K tomuto napětí je připojeno další budící vinutí B_2 , v němž vlivem proudu i_2 vznikne magnetický tok Φ_2 . Tento tok indukuje v téže kotvě napětí u_3 na kartáčích 2, které jsou umístěny kolmo ke směru indukčního toku. Zátěží R_z pak protéká proud i_3 . Výstupní výkon $P_3 = U_3 * I_3 \approx 10\,000 P_1 = U_1 * I_1$ (několik desítek kilowattů), přičemž je získána z motoru a signál řídicího výstupního výkonu je dán budícím proudem.

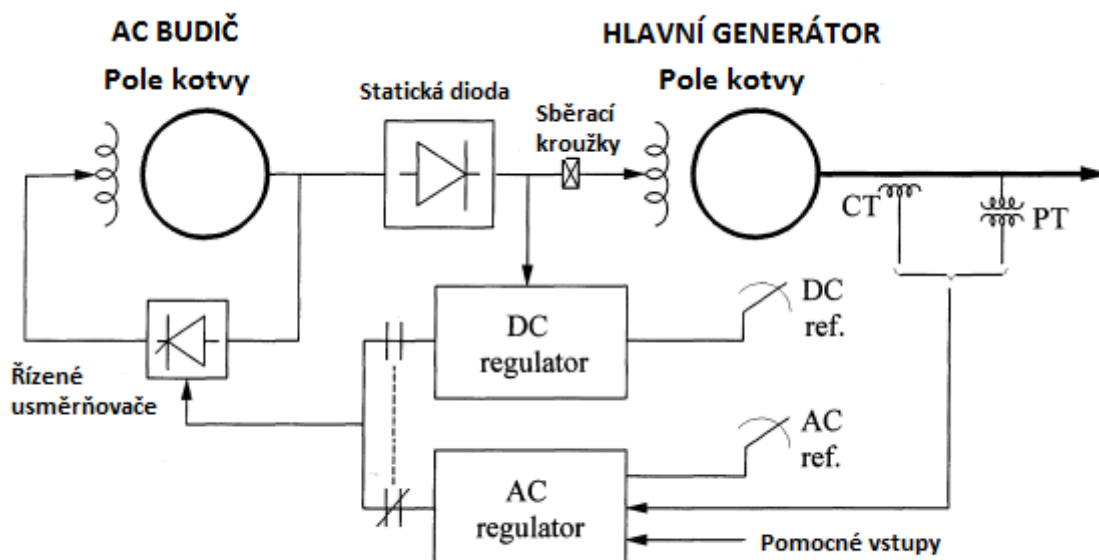
2.2.4.2 Střídavé budící systémy (AC)

Budící systémy této kategorie se užívají ve střídavých (AC) alternátorech jako zdroje hlavní generátorové budící síly. Obvykle je toto buzení na stejné hřídeli jako turbína generátoru. Střídavý výstup z budiče je usměrněn buďto řízeným nebo neřízeným usměrňovačem, který tak převádí střídavý proud na stejnosměrný, potřebný pro generátorové pole. Dříve budící systémy využívaly kombinaci magnetických a rotačních zesilovačů jako regulátorů. V dnešní době jsou již nahrazovány elektronickými zesilovacími regulátory.

Jednotlivé typy:

Střídavý budící systém se statickými usměrňovači

U statických usměrňovačů je výstupní stejnosměrný proud předáván skrze sběrací kroužky ke generátoru. Jestliže jsou užívány neříditelné usměrňovače, regulátor kontroluje pole střídavého budiče, který si kontroluje své výstupní napětí. Představme si celý způsob systému na obrázku 7.



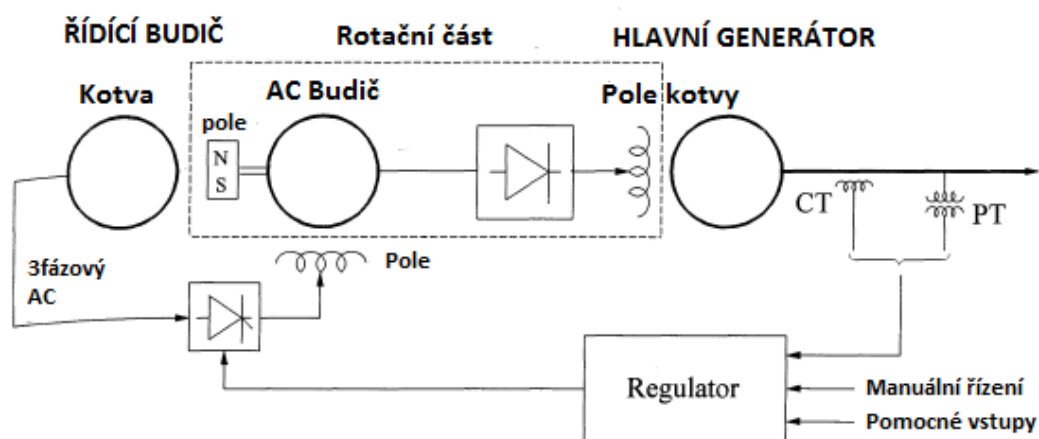
Obrázek 7 – Řízení alternátorové pole pomocí usměrňovačů budícího systému

Budič alternátoru je řízen z hlavního rotoru generátoru. Budič je samobudící s energií získanou skrze tyristorové usměrňovače. Jakmile jsou tyristorové usměrňovače pod napětím, regulátor přímo řídí stejnosměrné výstupní napětí budiče. Napěťový regulátor kontroluje a řídí otevírání tyristorů. Budič alternátoru je samobudící a tím pádem užívá nezávislého statického napěťového regulátoru k udržování výstupního napětí.

Skrze tyristory přímo řízené výstupem budiče, systém poskytuje vysokou počáteční odpověď, tj. malá doba odezvy. AC regulátor automaticky udržuje napětí na svorkách statoru generátoru na požadované zadané referenční hodnotě. DC regulátor udržuje konstantní napětí v poli generátoru předepsané referenční zadanou hodnotou na DC ref. Regulátor DC nebo manuální řídicí mód je vhodný zejména při situacích, kdy AC regulátor je vadný nebo potřebuje být vypnut z důvodů poškození.

Střídavý budicí systém s rotačními usměrňovači

U střídavých budicích systémů s rotačními usměrňovači nejsou sběrací kroužky ani kartáče a stejnosměrný výstup jde přímo do hlavního pole generátoru.



Obrázek 8 – Bezkartáčový budicí systém

Jak je vidět na obrázku 8, kotva střídavého budiče a diodových usměrňovačů rotují s hlavním polem generátoru. Malý řídicí budič s permanentním rotorovým magnetem (N S na obrázku) rotuje s kotevním budičem a diodovými usměrňovači. Usměrněný výstup řídicího usměrňovače spíná stacionární pole AC budiče. Napěťový regulátor řídí pole AC budiče a řídí pole hlavního generátoru.

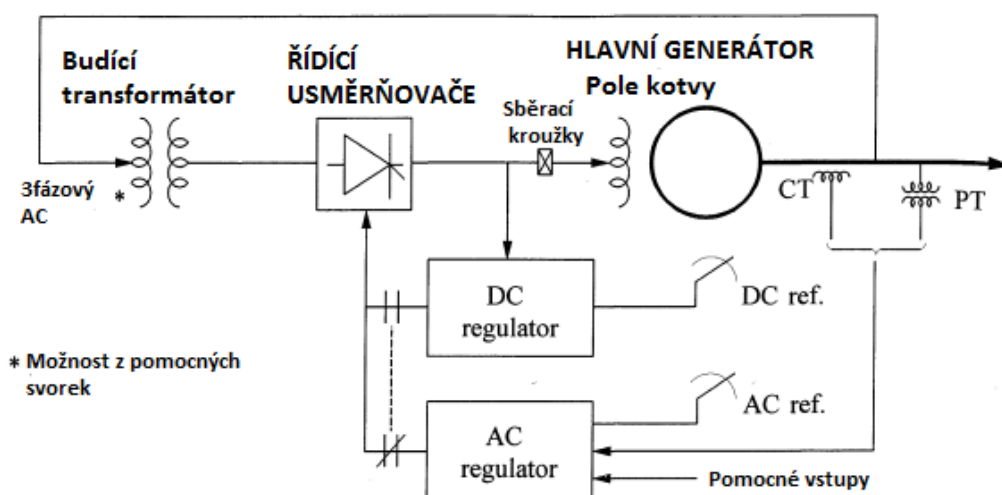
2.2.4.3 Statické budicí systémy

Statické budicí systémy jsou třetí a poslední kategorií, která je využívána k buzení synchronních strojů. Jak již samotný název napovídá, neobsahuje žádné rotační části. V dobách, kdy se začaly nasazovat výkonové polovodiče, se tento systém začal

hojně užívat jakožto regulovatelný zdroj proudu pro budící vinutí, namísto dosavadních derivačních dynam. Využívání tohoto typu je převážně u generátorů pracujících pouze v paralelním provozu s distribuční sítí elektrického vedení. Transformátor budící jednotky je napájen skrze samostatné odbočky sítě vlastní spotřeby, tj. generátor neumí startovat ze tmy a neumí pracovat v ostrovním provozu.

Napěťový zdroj s řízenými usměrňovači

Tento způsob pracuje tak, že budící energie je dodávána z transformátoru z generátorových svorek nebo z pomocných svorek vlastní spotřeby a řízena usměrňovači. V dnešní době je tento princip znám také jako transformer-fed statický systém.

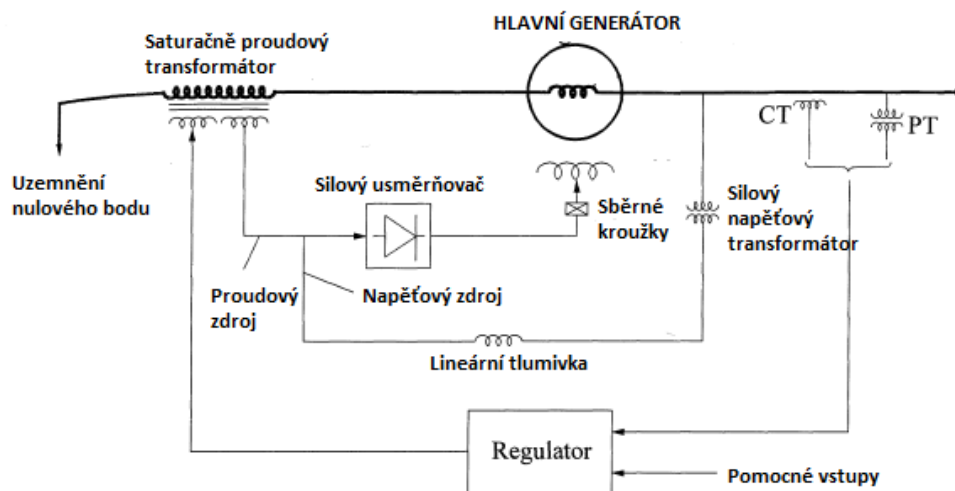


Obrázek 9– Budící systém s napěťovým zdrojem řízeným usměrňovači

Systém má velmi malou časovou odezvu. Maximální budící napětí je závislé na vstupním střídavém napětí. Proto při poruchovém stavu systému způsobuje změnu generátorového napětí na svorkách a dostupný budící napěťový limit je redukován. Tento systém je levný a snadno udržovatelný.

Kompaundní zdroj s řízenými usměrňovači

Budící systém využívá energie v tomto případě využíváním proudu a napětí hlavního generátoru. Toho může být docíleno skrze silový potencionální transformátor, tj. PPT (power potential transformer) a saturačně proudového transformátoru, tj. SCT (source-current transformer).



Obrázek 10 – Budicí systém s kompaundním zdrojem s usměrňovači

Regulátor řídí budicí výstupy skrze řízenou saturaci budícího transformátoru. Jakmile není na generátor přiváděna zátěž, proud kotvy je nulový a napěťový zdroj zásobuje celý budicí výkon. V zatíženém stavu se část budicí energie odebírá z generátorového proudu. Během stavu, kdy se vyskytne systémová chyba, velmi poklesne svorkové napětí generátoru, proudový vstup umožňuje budiči poskytovat vysokou schopnost buzení pole.

2.3 Poruchové stavy buzení

2.3.1 Ztráta buzení

Ztrátou buzení synchronního generátoru rozumíme stav, kdy dojde k výpadku napájení, poškození budiče nebo zkratu na budícím vinutí. Ač už je závada jakéhokoliv typu, představuje velké riziko od poškození až po úplné zničení generátoru. Dojde-li k výpadku buzení, proud budícího vinutí klesá k nule exponenciálně s časovou konstantou vinutí. Úměrně této změně klesá vnitřní elektromotorické napětí stroje a elektromagnetická vazba statoru a rotoru. Na svorkách generátoru bude docházet ke snižování jalového výkonu k mezi podbuzení, kde je elektromagnetická vazba natolik slabá, že dojde ke ztrátě synchronismu. Tomuto stavu se obecně říká, že synchronní generátor přešel do asynchronního chodu.

Jak se generátor může do takového stavu dostat:

- Přetížení statoru vlivem značného odběru jalového výkonu ze sítě (0,4 až 1,9 S_n)
- Oteplení rotorového vinutí vlivem indukovaných proudů
- Značné rázy činného výkonu a elektrického momentu, který přechod do asynchronního režimu doprovázejí

Samotná ochrana funguje na principu dvouzónové distanční ochrany. Obecně máme tyto zóny ochrany zapsány v impedanční rovině jako kružnice s poloměrem

$$R = \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{x_d} + \frac{1}{x_s} \right) \quad (2-9)$$

kde: x_d - Podélná synchronní reaktance stroje
 x_s - Vnější reaktance sítě

A středem v bodě

$$C = -j * \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{x_d} - \frac{1}{x_s} \right) \quad (2-10)$$

První zóna (s kratším časem) musí být nastavena s ohledem na maximální přetížení vlivem odběru jalového výkonu v asynchronním chodu, je-li odebíraný jalový výkon $Q_g \geq S_n$ a proto $x_d = 1$ p.u., doba vybavení se nastavuje s ohledem na přetížení statoru (špičkové hodnoty proudu mohou dosahovat až $2,5 I_n$) a rotoru a řádově dosahuje desetin až jednotek sekund. [5]

Druhá zóna se nastavuje s ohledem na překročení meze podbuzení v oblasti statické stability (případně povolené oteplení čelních konstrukcí stroje) a proto se volí skutečná hodnota x_d . Doba vybavení se pohybuje v časech 10s až 1min. [5]

2.3.2 Ochrana proti přebuzení

Tento typ ochrany se využívá u elektrických strojů s magnetickým obvodem (transformátory a generátory) z důvodu možnému přesycení v železe. Magnetický tok se vypočítá:

$$\Psi = \frac{\sqrt{2} * U}{2 * \pi * f * N} \approx \frac{U}{f} \quad (2-11)$$

Tohoto podílu napětí a frekvence se využívá jakožto kritéria chránění. Mezi nechtěné negativní důsledky přebuzení jsou převážně tepelné účinky na magnetický obvod. Přesycování začalo být blíže zkoumáno a chráněno až s optimalizací výroby velkých elektrických strojů.

Charakteristika této ochrany je kombinace časové závislé (obsahuje tepelný model stroje) a časové nezávislé (max. podíl U/f se nejčastěji pohybuje od 120 do 140 %). Pro nastavení je také důležitý maximální trvalý podíl U/f v magnetickém obvodu, který se spočítá ze jmenovité frekvence a nejvyšší hodnoty maximálního provozovacího napětí (např. u generátorů 105 %, u transformátorů 110 %). Charakteristika musí být taková, aby ochrana falešně nezapůsobila při dovolených provozních stavech. Proto musí být její minimum větší než $(U/f)_{\max} + \text{chyba PTN} + \text{chyba ochrany (měření } U/f) + \text{bezpečnostní pásmo}$, čemuž vyhovuje dodatečných 10 %. [5]

2.3.3 Ochrana proti ztrátě stability (synchronismu)

Za normálních běžných podmínek mají točivá magnetická pole synchronních alternátorů stejnou frekvenci jako elektrizační soustava. Magnetické póly rotoru jsou závislé na točivém poli statoru elektromagnetickou vazbou. Jedná se zde o vazbu elastickou, která je schopna pokrývat běžné malé skoky systémových veličin jako je kmitání úhlu mezi rotorem a točivým polem (zátěžný úhel). Při problému, kdy je vazba velmi slabá nebo změny veličin soustavy natolik velké, že je překročena mez dynamiky, dojde k natočení úhlu rotoru vůči poli statoru a dochází k prokluzu rotoru o 360° . Dále díky setrvačnosti následuje jeden prokluz za druhým. Dochází k celkové ztrátě stability, tj. vypadnutí ze synchronismu. Statická charakteristika elektrického výkonu na zátěžném úhlu je:

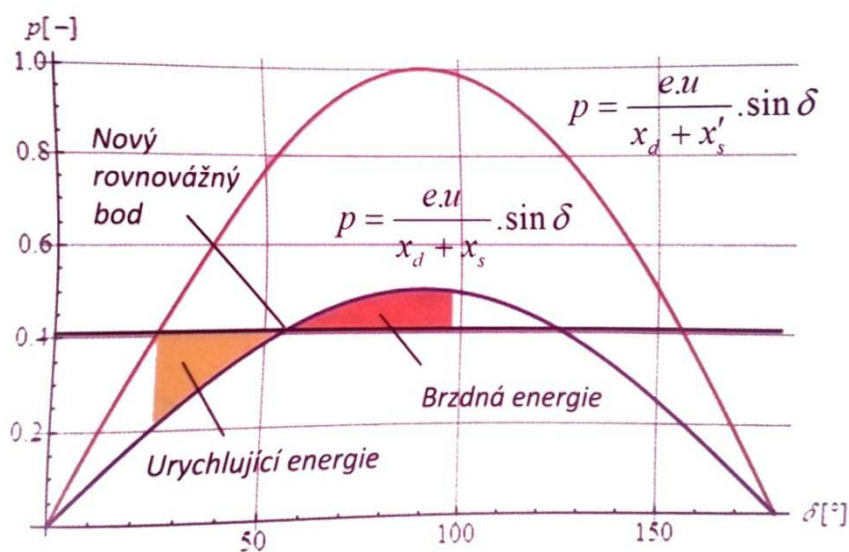
$$p = \frac{e * u}{x_d + x_s} * \sin\varphi \quad (2-12)$$

kde: x_d - Podélná synchronní reaktance stroje
 x_s - Vnější reaktance sítě

Nastane-li v soustavě porucha, při které jsme nuceni odpojit například jednu paralelní větev ze dvou vedoucí k elektrárně, vzroste reaktance soustavy na hodnotu x_s' . Statická charakteristika se změní na nový stav, který popisuje následující rovnice:

$$p = \frac{e \cdot u}{x_d + x_s'} \cdot \sin \varphi \quad (2-13)$$

Reakcí turbíny po změně stavu, kdy před poruchou dodávala výkon p_m , stále dodávala tento výkon i těsně po poruše. V charakteristice je ale rovnováha dosažena pro jinou hodnotu úhlu δ . Dochází tak k dynamickému ději, kdy je rotor nejdříve urychlován (mechanický výkon je větší než elektrický) a poté bržděn (elektrický výkon je větší než mechanický). Jestliže bude brzdná energie ke zpomalení motoru větší než energie urychlení, rotor začne kmitat kolem nového rovnovážného bodu. Pokud se tak nestane, dochází ke ztrátě stability. Brzdným a urychlovacím energiím odpovídají plochy na následujícím obrázku [Obr.11]. Mezi této dynamické stability je kritický úhel δ_k (musí vždy platit $\delta_k \leq 180^\circ$).

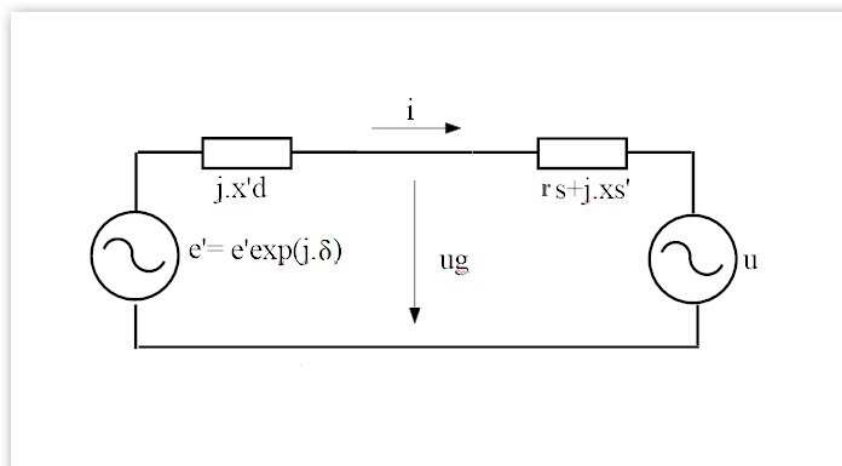


Obrázek 11 – Dynamická stabilita, metoda ploch [5]

Princip této ochrany pracuje na způsobu monitorování kyvů a zjišťování hodnoty kritického úhlu. Jelikož odezva ochrany spadá do pomalejších dynamických dějů (v řádech sekund), ochrana musí počítat s přechodnými veličinami generátoru

$$p' = \frac{e' * u}{x_d' + x_s'} * \sin\varphi \quad (2-14)$$

kde: x_d' - Podélná přechodná reaktance stroje
 e' - Přechodné vnitřní elektromotorické napětí stroje



Obrázek 12 – Náhradní obvod pro vyjádření kyvů generátoru v impedanční rovině [5]

Z následujícího obrázku 12 vidíme, že zanedbáme-li odporovou složku, statorový proud bude

$$\hat{i} = \frac{e' * e^{j\varphi} - u}{j(x_d' + x_s')} \quad (2-15)$$

a napětí statoru

$$\hat{u} = e' * e^{j\varphi} - jx_d' * \hat{i} = e' * e^{j\varphi} - jx_d' * \frac{e' * e^{j\varphi} - u}{(x_d' + x_s')} \quad (2-16)$$

označíme-li poměr n

$$n = \frac{e'}{u} \quad (2-17)$$

bude změřená impedance na statoru

$$\hat{z}_g = \frac{\hat{u}_g}{\hat{i}} = j(x_{d'} + x_s) * n \frac{(n - \cos\delta) - j\sin\delta}{(n - \cos\delta)^2 - \sin^2\delta} - jx_{d'} \quad (2-18)$$

Pro bezpečný chod generátoru se předpokládá, že hodnota $\delta \leq 120^\circ$.

2.4 Analýza ES (elektrické soustavy)

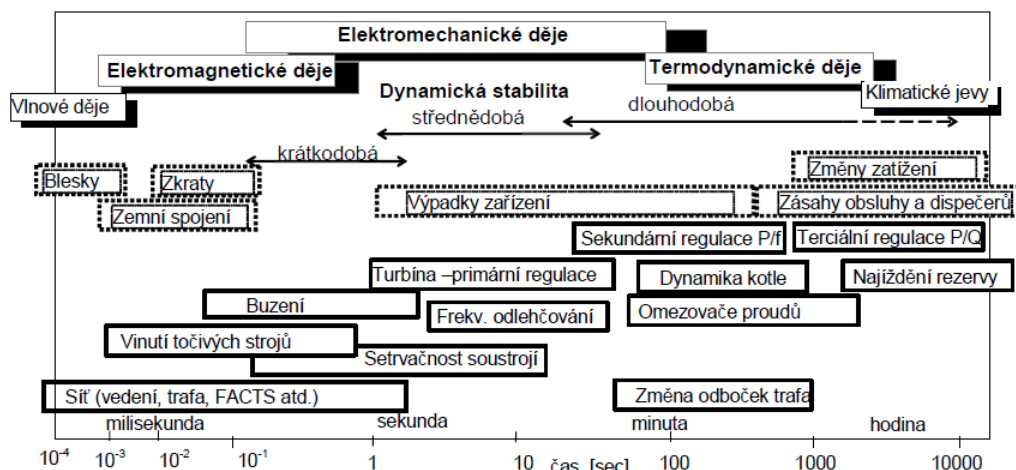
Elektrizační soustava (dále jen ES) je počítána jako rozlehlý systém kybernetického typu převážně díky tomu, že jsou přidávány jednotlivé prvky do soustavy a právě tyto prvky nabývají vlastností, které samy předtím neměly. V ES musí být naprostá rovnováha mezi výrobou elektrické energie a její spotřebou, to převážně proto, že uchovávání elektrické energie je v dnešní době velmi neefektivní. ES má více typů přechodných dějů, které lze rozdělit takto:

- Velmi rychlé rázové (vlnové) a elektromagnetické děje
- Rychlé děje elektromechanické
- Pomalé děje termodynamické

Důležitým prostředkem pro analýzu ES je statický výpočet chodu sítě. Definiuje se zde ustálený provoz ES. Jako základní vlastnost přechodných dějů bereme dobu trvání a tyto stavy můžeme rozdělit na tři skupiny:

- Vlnové přechodné děje, které jsou považovány za nejrychlejší, tj. trvají v řádech mikrosekund až milisekund. Při nastalém ději probíhá tak rychle, že nelze zanedbávat rychlost šíření elektromagnetických vln v jednotlivých prvcích ES a tyto prvky musíme nahrazovat modely s rozprostřenými parametry.
- Elektromagnetické přechodné děje jsou druhou skupinou s dobou trvání od milisekund až po několik desítek sekund. U těchto dějů zanedbáváme šíření elektromagnetických vln v prvcích ES a můžeme zde použít model se soustředěnými parametry. Dále zde můžeme zanedbat změny otáček točivých strojů a jejich úhlové rychlosti stanovit jako konstanty.
- Elektromechanické přechodné děje jsou poslední skupinou, jejichž doba se mění v širokých mezích od desetin sekund až po desítky sekund.

Abychom lépe pochopili rozdělení, zobrazme si je na následujícím obrázku 13. Vodorovná osa nám udává časový horizont, který je vyšetřován. Můžeme zde vidět, že ve spodní části máme naznačené zařízení, které tyto jevy způsobují. Střední část nám vyobrazuje tečkovaně příčiny způsobující tyto stavy. Horní část ukazuje přímě rozdělení dějů.



Obrázek 13 – Časový rozsah přechodných dějů v ES [převzato z 6]

Poslední ze tří skupin, tj. Elektromechanické přechodné děje, mohou být dále děleny na krátkodobou, střednědobou a dlouhodobou dynamiku a to takto:

- **Krátkodobá dynamika** v řádech několika sekund vyšetřuje vliv poruch typu zkratů na stabilitu synchronních a asynchronních strojů. Tyto výpočty budou postačovat na vymodelování pasivní sítě, modely točivých strojů a jejich budících systémů (budičů a jejich regulátorů včetně přídatných zařízení)
- **Střednědobá dynamika** v řádech několika desítek sekund souvisí s činnostmi primární regulace frekvence a regulace otáček až po vzniku deficitu činného výkonu výpadkem bloků nebo přechodem části ES do ostrovního režimu (hrozba frekvenčního kolapsu)
- **Dlouhodobá dynamika** v řádech několika desítek minut souvisí jednak s činnostmi sekundární regulace činného výkonu a frekvence po vzniku deficitu právě činného výkonu a jednak s činnostmi automatické změny odboček transformátoru a omezovačů proudů regulátorů buzení

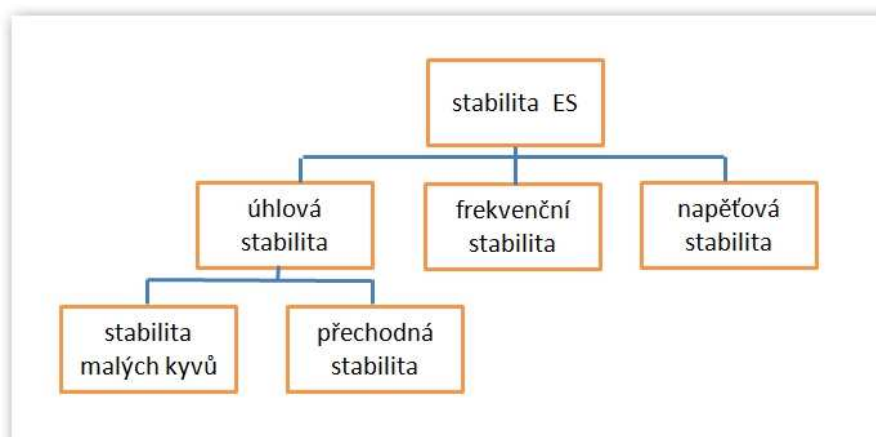
generátorů po vzniku deficitu jalového výkonu změnami zatížení, výpadky vedení nebo bloků (hrozba napěťového kolapsu)

2.4.1 Dynamická stabilita ES

Problematikou dynamické stability se začala nejvíce zabývat skupina CIGRE (*Profesní světová asociace elektroinženýrů*) a IEEE, kdy navrhly definici takto: *Jestliže dojde v soustavě k rozruchu, musí se soustava vrátit do rovnovážného stavu s veličinami v dovolených mezích a soustava jako celek zůstane nedotčena.* [7] Kde si můžeme rozruch představit jako mnoho změn:

- Provozního charakteru jako například změna odebíraného nebo dodávaného výkonu
- Poruch zařízení způsobených skrytými vadami
- Poruch způsobených klimatickými vlivy jako například silný vítr, blesk či vysokou teplotou
- Poruch způsobených lidským faktorem

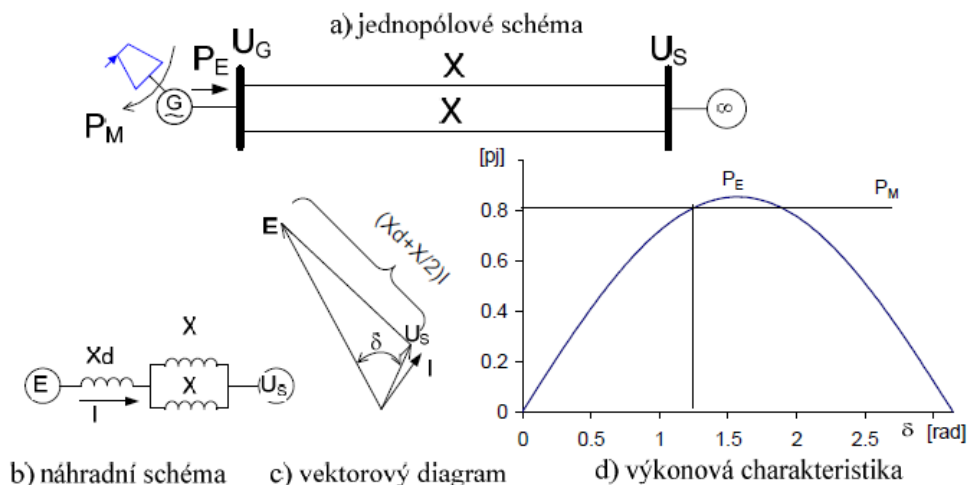
Jelikož je ES složitým systémem s neustálými zásahy jak zevnitř, tak i zvnějšku, musíme zkoumání odolnosti soustavy rozdělit do několika elementárních problémů. To nám umožní zjednodušit určité vztahy a vlastnosti soustavy pro analytické metody. Na následujícím obrázku 14 můžeme toto rozdělení vidět.



Obrázek 14 – Rozdělení stability elektrizační soustavy

2.4.1.1 Úhlová stabilita přechodná

Úhlová stabilita souvisí s pohybem rotorů synchronních strojů, které jsou nejčastěji používány jako zdroje pro výrobu elektrické energie. Je to tedy schopnost synchronních strojů zůstat v synchronním provozu se zbytkem ES po nějakém rozruchu.



Obrázek 15 – Jednostrojový model soustavy [převzato z 6]

Na obrázcích 15 můžeme vidět:

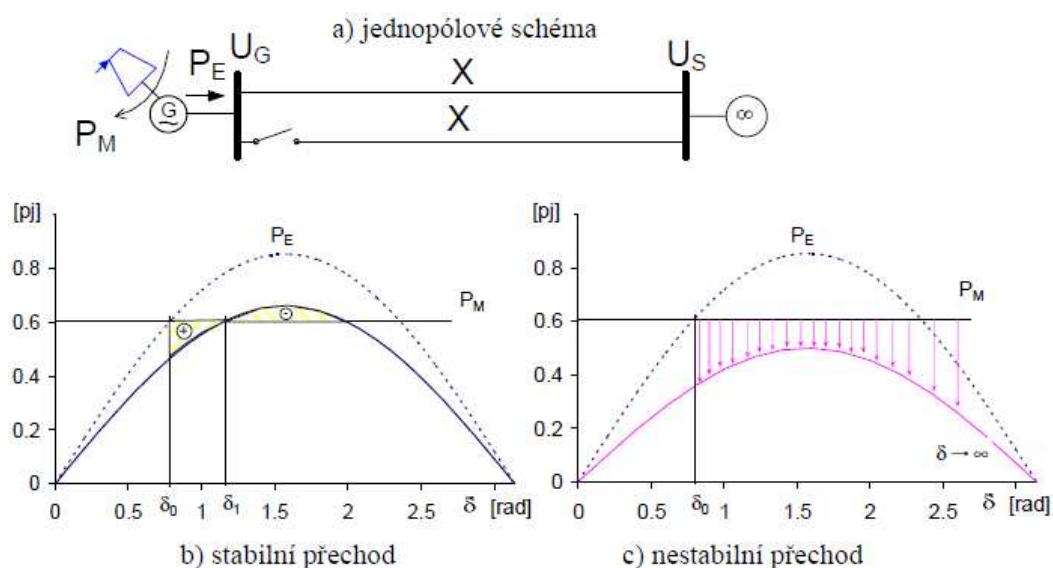
- Zobrazuje nám základní uspořádání modelu, kdy synchronní generátor je poháněn parní turbínou a dodává nám elektrický výkon P_E skrze redundantní vedení o reaktanci X do tvrdé sítě s konstantním napětím U_S . V ustáleném stavu $P_E = P_M$, kde P_M je mechanický výkon turbíny (zanedbány mechanické a elektrické ztráty).
- Ve schématu jsme si nahradili synchronní generátor elektromotorickým napětím E a synchronní reaktancí X_d . Z tohoto schématu si již můžeme odvodit vektorový diagram
- Zde již můžeme vidět zátěžný úhel δ , který nám svírá fázory elektromotorického napětí E a napětí soustavy U_S . Abychom si mohli vyjádřit činný výkon, použijeme následující vzorec:

$$P_E = \frac{E * U_S}{X_{\Sigma}} * \sin\delta \quad (2-19)$$

Kde X_{Σ} je sumární reaktance.

- d) Na posledním obrázku můžeme vidět výkonovou charakteristiku ve tvaru sinusovky. Je zakreslena v poměrných hodnotách vztahených na jmenovitý zdánlivý výkon generátoru. Amplitudu dostaneme při součinu obou napětí E a U_S a je nepřímo úměrná sumární reaktanci. V případě, že se jedná o tvrdou síť a dlouhé vedení, je amplituda charakteristiky v porovnání s velikostí mechanického výkonu P_M malá. První průsečík této sinusovky s přímkou nám určuje stabilní pracovní bod $\delta = 1,24$ rad).

Pokud oproti výchozímu stavu nasimulujeme výpadek jedné části větve, nastane přechodný děj, který nám změní charakteristiky takto.



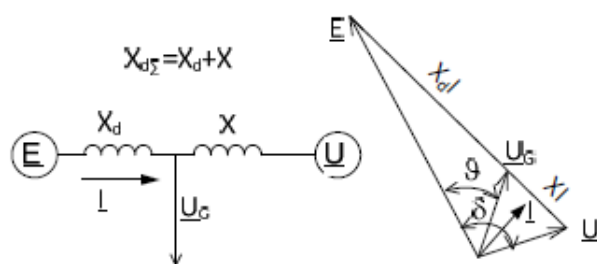
Obrázek 16 – Model výpadku jedné části vedení [převzato 6]

Pokud poměr reaktancí vedení vzhledem k synchronní reaktanci bude dostatečně malý, nastane stabilní přechodný děj, kdy tečkovaná výkonová charakteristika se skokově změní na novou. Zátěžný úhel δ se začíná měnit podle diferenciální pohybové rovnice

$$\frac{T_M}{\omega_{MS}} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_M - M_E \approx P_M - P_E \quad (2-20)$$

2.4.1.2 *Stabilita malých kyvů*

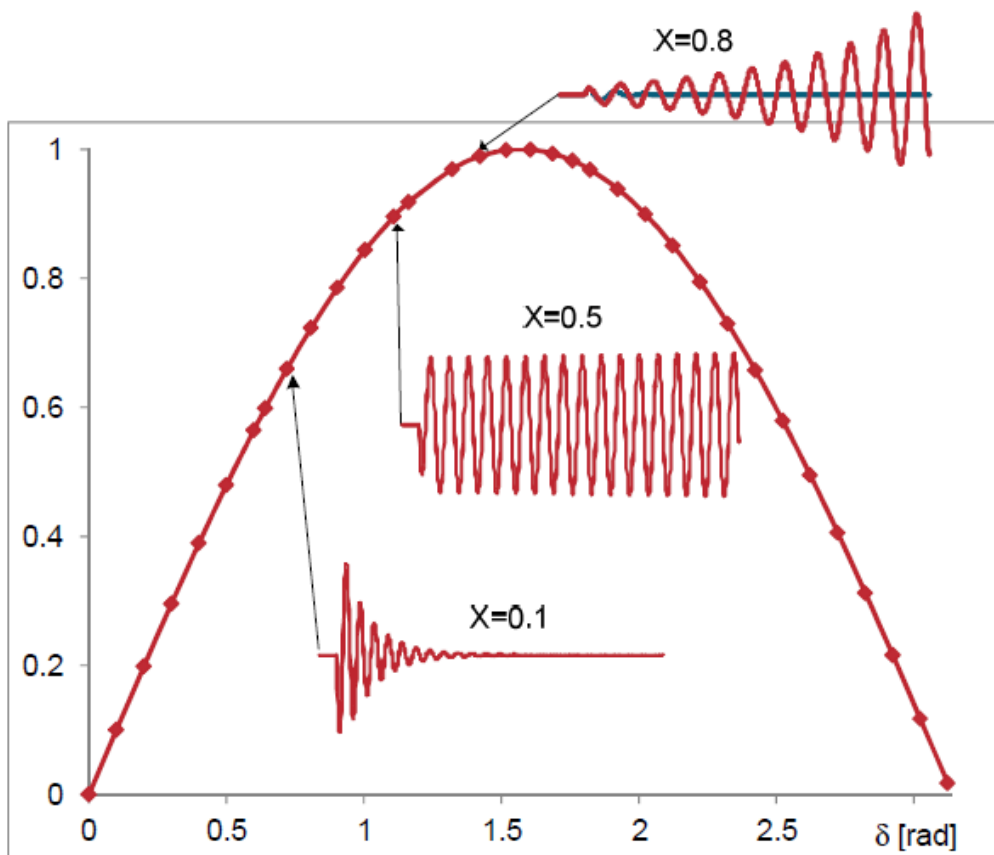
K následující stabilitě malých kyvů si zobrazme jednostrojový model.



Obrázek 18 – Náhradní schéma a fázorový diagram [převzato z 6]

Kde symbolem ϑ značíme vnitřní zátěžný úhel mezi fázorem svorkového napětí U_G a fázorem vnitřního indukovaného napětí \underline{E} . $X_{d\Sigma}$ je rozšířená reaktance pro satorové rovnice.

Abychom pochopili blíže Stabilitu malých kyvů, ukážeme si vše na následujícím obrázku.



Obrázek 19 – Zobrazení kývání činného výkonu při malé změně svorkového napětí

Z obrázku je zřejmé, že v závislosti na růstu zátěžného úhlu klesá jak tlumení kyvů, tak i frekvence. V horní části obrázku vidíme modrou čáru, která nám symbolizuje zavedení zpětné vazby od skuzu, kdy plnému útlumu dochází po dvou kmitech (při $X=0,8$). Analyzované kmity patří mezi lokální kyvy s frekvencí od 0,7 do 2 Hz. Nižší kyvy o frekvenci 0,2 až 0,7 se vyskytují v mnohastrojové soustavě a nazývají se kyvy systémovými.

2.4.1.3 Frekvenční stabilita

Frekvenční stabilita nám udržuje rovnováhu mezi činnými výkony jednotlivých zdrojů a spotřebičů. K nerovnováze dochází při změnách dodávaného výkonu (výpadek zdroje) nebo při změnách odebíraného výkonu (připnutí zátěže).

Předpoklad, že v i -tém uzlu dojde k výpadku zdroje skokovou změnou, tzv. ráz činného výkonu. Máme k -tý uzel, který je uzel pro nás měřený. Potom dostáváme rovnici:

$$\Delta P_k = \Delta P \frac{K_k}{\sum K_i} \quad (2-21)$$

Kde ΔP_k jsou příspěvky generátorů, ΔP je celkový výpadek a K jsou výkonová čísla.

Tato rovnice nám vyjadřuje primárními regulátory rozdělení rázu činného výkonu. V případě, že se podíváme do modelu [6, str. 97] vidíme, že jako proměnné zde figurují přírůstky Δf , výkonu turbíny P_{turb} a výkonu generátoru P_{el} .- skládá se z výpadku výkonu ΔP a regulačního efektu zátěže v $K_{\text{load}} * \Delta f^2$. Regulační efekt zátěže závisí na jednotlivých závislostech výkonů odebíraného spotřebiči na frekvenci napájecího napětí. Zde spotřebiče dělíme na tři skupiny:

- Nezávislé na frekvenci (odporová zátěž – žárovky, topení)
- Závislé lineárně na frekvenci (motorická zátěž – dopravní stroje, pístová čerpadla)
- Závislé na druhé mocnině nebo vyšší frekvence (odstředivá čerpadla, ventilátory)

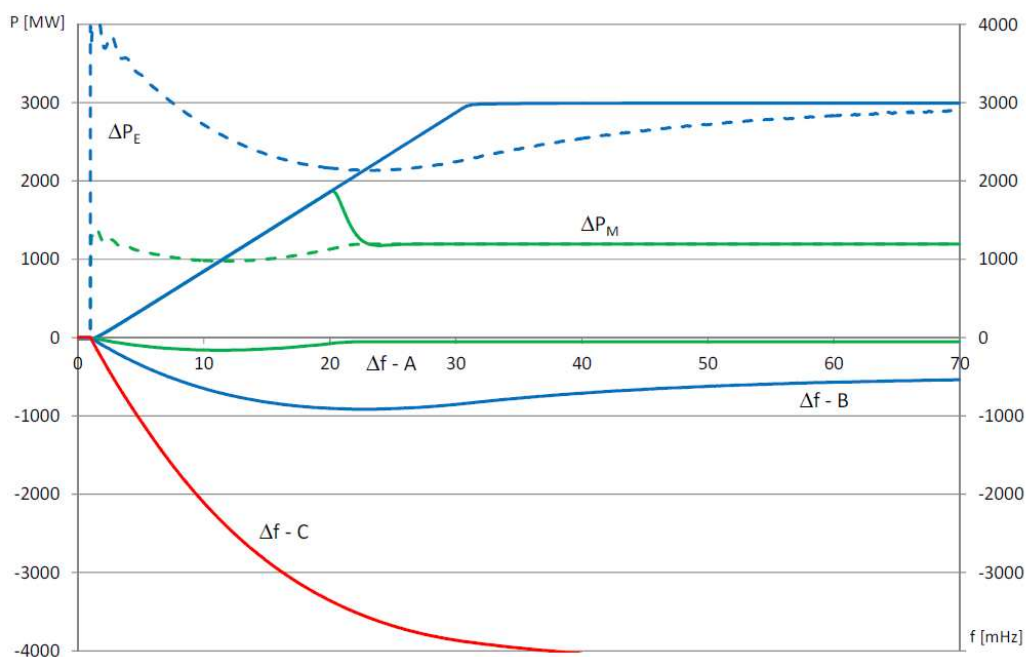
Abychom lépe viděli jednotlivé závislosti, opět využijeme grafu, který nám tyto vlastnosti lépe představí. Prvně si zvolíme tři velikosti výpadku a to:

- A. kde $\Delta P = 1300\text{MW}$ – výpadek největšího bloku v soustavě

B. kde $\Delta P = 3000\text{MW}$ – největší projektový výpadek

C. kde $\Delta P = 1200\text{MW}$ – nadprojektový výpadek vedoucí k frekvenčnímu kolapsu

Výkon soustavy $P_{\text{sys}}=200\text{GW}$, regulační efekt zátěže $K_{\text{load}}=1\%/Hz$, mechanická konstanta $T_{\text{sys}}=10\text{s}$.

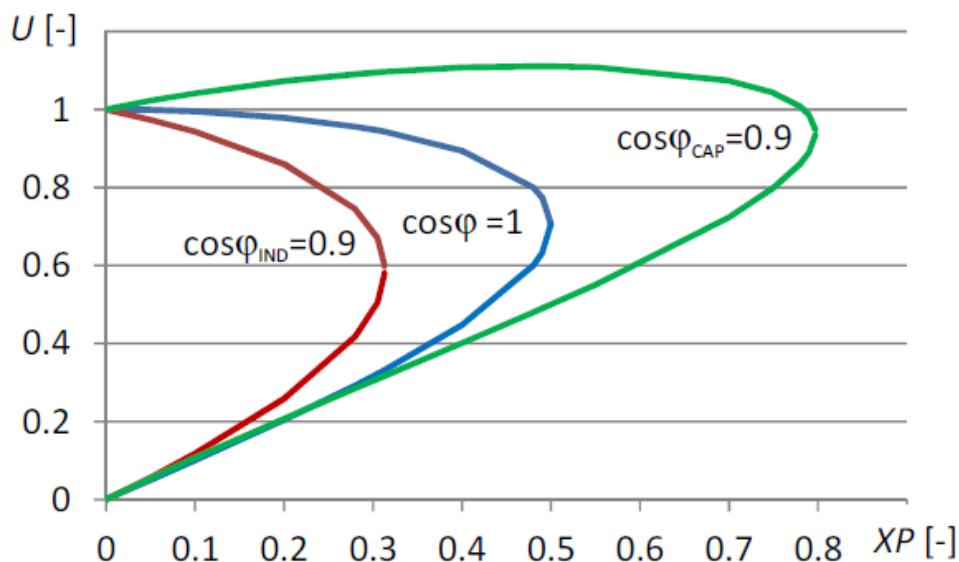


Obrázek 20 – Odchyly frekvence v závislosti na velikosti výpadku výkonu [převzato z 6]

Na obrázku jsou zachyceny odchyly frekvence v závislostech na velikosti výpadku výkonu. V horní části jsou zakresleny mechanické výkony turbíny ΔP_M dané lineárním nárůstem výkonu v první části regulačního děje a poté čárkovaně změny elektrického výkonu generátoru ΔP_E . Na obrázku je také zachycen ráz činného výkonu na generátor v čase $t=1$. Při běžných výpadech v grafu označených zelenou barvou nesmí frekvence překročit odchyly -200mHz . V případě B můžeme vidět, že rezerva je vyčerpána a měla by být uvolněna do 25 sekund. Výpadek byl zvládnut díky činnosti primární regulace. U bodu C zákonitě dochází ke kolapsu frekvence, jelikož výpadek je natolik velký, že ani primární regulace nestačí udržet frekvenci ve stanovených limitech a zanedlouho dosahuje odchylka kritické meze. Po dosažení této meze by měly být stroje vypnuty ochranami a dojit k black-outu.

2.4.1.4 Napěťová stabilita

Napěťovou stabilitu si zobrazíme na tzv. nosových křivkách, které nám určí maximální přenositelný činný výkon skrze vedení.



Obrázek 21 – Nosové křivky pro $E=1$ [převzato z 6]

Výkon, který lze přenést přes reaktanci X vedení je rovný $P=1/X$. Modrá čára nám zobrazuje průběh při účinnku rovnému jedné. Jestliže máme konstantní napětí na začátku a odběr výkonu nezávislý na napětí, může být přenesena maximálně polovina výkonu. V přenosové soustavě se s tímto typem dlouhého vedení takřka nesetkáme, takže nám napěťová stabilita souvisí převážně s přepínáním odboček síťových transformátorů nebo například s činností omezovačů rotorového a statorového proudu v budících systémech strojů.

2.5 *Power System Stabilizer*

2.5.1 *Historie PSS*

V době okolo 1950 až 1960 většina nových generátorových jednotek byla přidávána do sítě a vybavena nepřetržitě působícími napěťovými regulátory. Když již počet strojů takto vybavených tvořil velkou většinu, začalo být zřejmé, že činnost napěťových regulátorů má negativní vliv na stabilitu, lépe řečeno na ustálený stabilní stav elektrizační soustavy. Oscilace malých rozměrů a malé frekvence často přetrvávaly po dlouhou dobu a v některých případech se dostávaly na hranici schopnosti přenosu energie. Výkonové systémové stabilizátory (PSS) byly vyvinuty k utlumení těchto oscilací jakožto součást budícího systému generátoru. Cílem PSS je rozšíření limitu úhlové stability systému díky poskytování doplňujícího tlumení oscilací rotoru synchronního stroje skrze generátorové buzení. Tyto oscilace se běžně pohybují v řádech 0,1-2,5 Hz. K útlumu těchto oscilací musí stabilizátor poskytovat složku elektrického momentu na rotoru, která je ve fázi s rychlostní složkou.

2.5.2 *Definice PSS*

“PSS, tj. systémový stabilizátor je kompenzační zařízení budící soupravy generátoru většího výkonu, jehož hlavním cílem je zajistit zlepšené tlumení lokálních kyvů (1-2,5 Hz) a účinně se podílet na tlumení kyvů systémových (0,1-1Hz). Nedostatečné tlumení těchto oscilací může omezovat schopnost stabilně přenášet výkon v přenosové soustavě.“ [4]

Power system stability smí být také definován jako součást elektrizační soustavy, která mu umožňuje zůstat ve stavu provozní rovnováhy za normálních provozních podmínek a získat přijatelný stav rovnováhy při nastalé poruše.

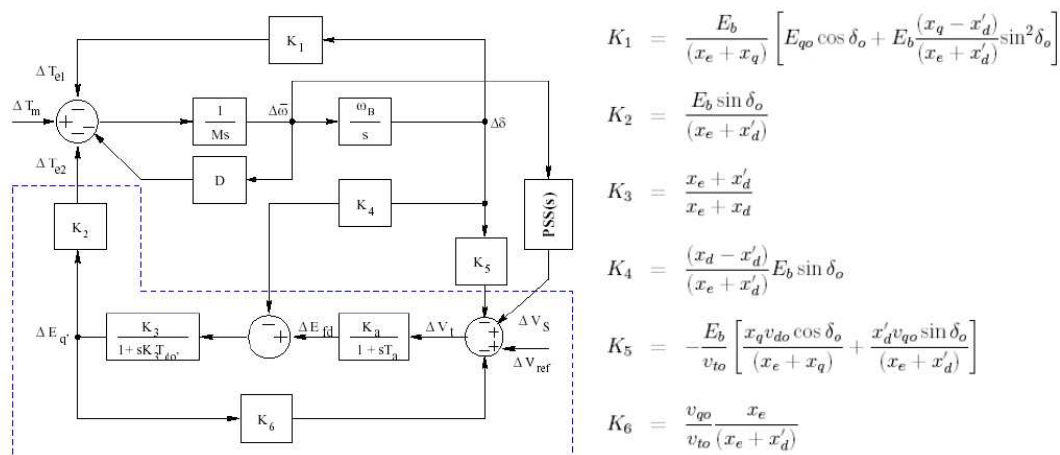
Z obecných definic zjistíme, že jsou zde dvě kategorie stability a to small-signal stabilita a přechodná stabilita. Stabilita small-signal je schopnost systému navrátit normální provozní stav po několika malých překmitech. Vyšetření týkající se tohoto problému stability obvykle zahrnuje analýzu stavového prostoru rovnice, která definuje výkon dynamičnosti systému. Přechodná stabilita je schopnost systém navrátit se do normálního pracovního stavu po několika překmitech, jakými jsou jedno nebo vícefázové zkraty nebo ztráty generátor.

2.5.3 Princip PSS

Pro vysvětlení principu funkce PSS využijeme jednoduchého linearizovaného modelu jednostrójového systému s regulací napětí. Jedním z nejdůležitějších prvků je prvek součtového členu moment, který nám vyplývá z pohybové rovnice. Na motor nám působí celkem 4 složky momentu (lépe řečeno odchylky moment od rovnovážného stavu):

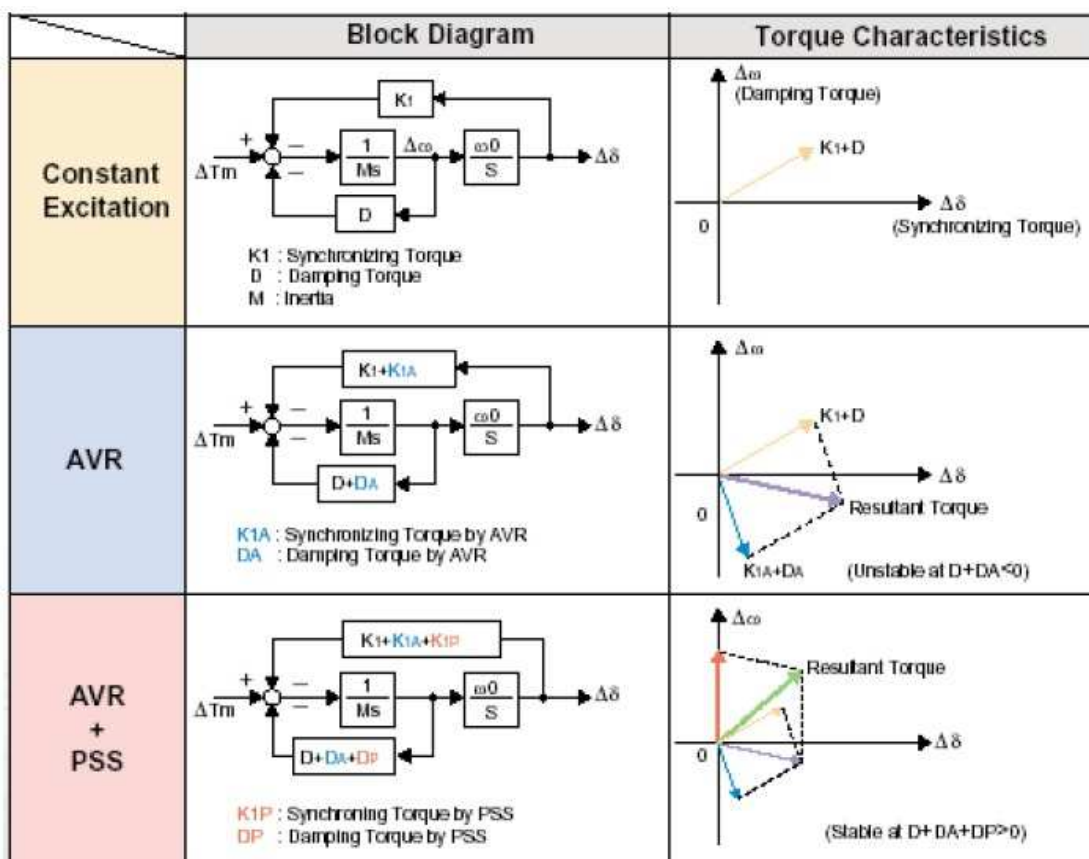
- ΔT_{Dv} - Tlumící moment převážně vytvářený od indukovaných proudů v tlumících vinutích (ve fázi s $\Delta\omega$)
- ΔT_{e1} - Synchronizační moment (ve fázi s $\Delta\delta$)
- ΔT_m - Mechanický moment (dán turbínou a jejím regulátorem)
- ΔT_{e2} - Moment vytvářený vnuceným proudem do budícího vinutí

Jejich součet nám určí výsledný akcelerační moment T_s .



Obrázek 22 – Model jednostrójového systému s regulací napětí [4]

Jak si tedy můžeme PSS představit. Na obrázku 22 můžeme vidět, jak moment vytvářený budícím proudem regulátoru buzení způsobuje natočení výsledného momentu do nestabilní oblasti. Aby na generátor nepůsobil záporný tlumící moment, musí být vytvořena složka momentu s kladným tlumícím účinkem a to dostatečně velká, abychom moment drželi v určitých přínosných mezích.

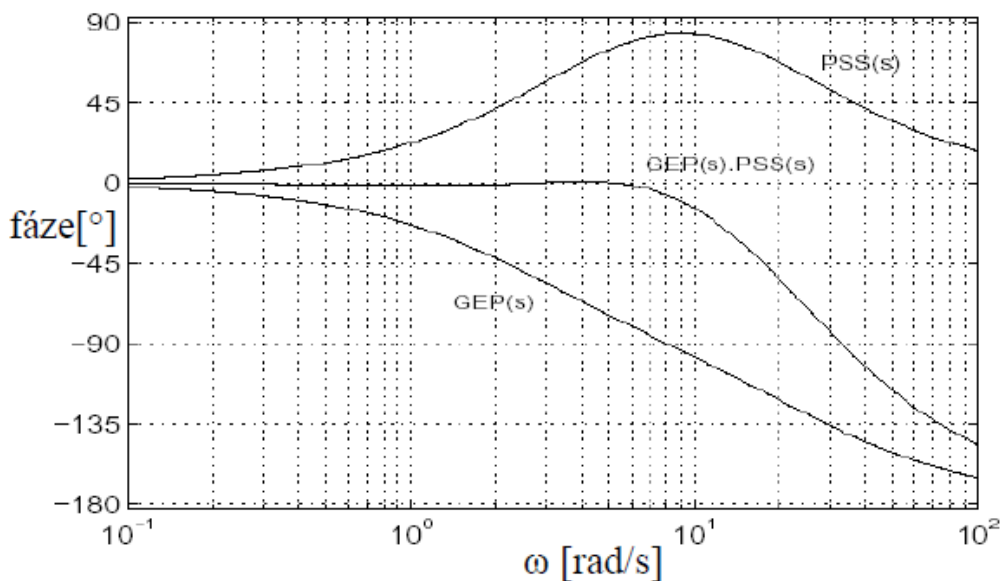


Obrázek 23 – Fázorové diagramy s konstantním buzením, s napěťovou regulací a s regulací buzení + PSS [8]

Aby byla složka momentu ΔT_{e2} od PSS ve fázi s $\Delta\omega$, musí PSS kompenzovat fázové zpoždění od součtového členu regulátoru ke složce momentu ΔT_{e2} . Toto fázové zpoždění nám určí přenos, který je vyznačen čárkovaně na obrázku 23, který nám zahrnuje jednotlivé dílčí přenosy budící soustavy, budícího obvodu generátoru a parametry soustavy obecně označované jako GEP (generator + excitation system + power system), kde $GEP(s) = \Delta T_{e2}/V_{ref}$. [4]

Co nám dále vyplývá z obrázku 23 je, že přenos $GEP(s)$ je proporcionálně úměrný přenosu uzavřené smyčky regulace napětí, což vyplývá z následujícího vzorce:

$$GEP(s) = \Delta T_{e2}/V_{ref} \approx K2/K6 * \Delta V_t/V_{ref} \quad (2-22)$$



Obrázek 24 – Fázové zpoždění GEP a charakteristika PSS

Protože, jak jsme si psali v úvodu, se pohybujeme zhruba v rozmezí od 0,1 Hz až cca 3 Hz, můžeme na Obr. 3 vidět, toto: Spodní GEP křivka nám představuje přenosovou funkci regulátoru buzení, generátoru samotného a přenosové soustavy. Horní PSS křivka nám zobrazuje natočení fáze v závislosti na úhlové frekvenci a pomáhá nám s natočením výsledného úhlu.

Máme zde ovšem tři závislosti GEP funkce:

- Zesílení GEP roste se zatížením generátoru
- Zesílení GEP roste tím více, čím je vnější síť tvrdší
- Fázové zpoždění GEP roste tím více, čím je vnější síť tvrdší

2.5.4 Základní principy při ladění PSS

Důležitými kritérii pro optimální nastavení PSS v oblasti lokálních módů s maximálním utlumením v oblasti módů systémových, vycházejí z fázové charakteristiky analýzy otevřené regulační smyčky PSS. Důležité body pro nastavování:

- V oblasti systémových kyvů má být systém mírně podkompenzovaný a fázové zpoždění udržovat v rozmezí 0° - 45° (optimálně 20° - 40°)
- V oblasti lokálních kyvů je doporučeno udržovat zpoždění menší než 45°
- V co největším rozsahu kmitočtů (optimum 3-3,5 Hz) je doporučeno udržte fázové zpoždění menší jak 90° . Před předchozím bodem se tento bod upřednostňuje.

Co se týká nastavení horní propusti, tj. washout, musí být nastavena tak, aby odfiltrovala ustálenou složku vstupních signálů (P , f a ω). Standardně se T_w pohybuje v intervalu 1 až 10 sekund kvůli účinnému odstranění nízkých kmitočtů pod 0,1 Hz. Tento parametr T_w způsobuje v nízkých kmitočtech přídatný fázový předstih vůči celkové kompenzaci PSS a snižuje celkové zesílení. Oproti tomu snižuje vliv interakce PSS s regulátory turbíny při rychlé změně výkonu.

V další části dochází k zesílení signálu. Optimální zesílení signálu by mělo být na takové hodnotě, kdy se systém již dostává do nestability. Závislost mezi tímto stavem nám udává následující vzorec:

$$K_{PSS_{opt}} = 1/K_{PSS_{nest}} \quad (2-23)$$

Z tohoto vzorce nám vychází, že pro bezpečné nastavení zesílení PSS, kdy dojde k trojnásobnému zesílení PSS, nesmí dojít k trvalé nestabilitě. Při nastavování PSS nesmí být zesílení nastavováno během času, kdy je síť oslabená a je nízké zatížení generátorů, jelikož je celkové zatížení při těchto podmínkách maximální.

Výstupní omezení PSS je omezeno hodnotou 5-10% jmenovitého napětí generátoru.

2.5.5 Schopnost PSS účinně tlumit lokální a systémové výkyvy

Vybuzení lokálních kmitů není náročné, jelikož jsou dány vlastními kyvy stroje a proto vliv PSS na tlumení je dostatečně silný. Naopak ověřování tlumení systémových módů je dosti náročné a musí být užito simulačních programů. Jelikož samotný generátor tyto systémové kyvy ovlivňují jen částečně, smí je generátor utlumit pouze úměrně svému výkonu.

2.5.5.1 *Měření ve frekvenční oblasti*

Měření frekvenční odezvy $\Delta P = \Delta U_{\text{ref}}(f)$

Tento typ má vliv převážně na tlumení lokálních kyvů a částečně na kyvy systémové. Musíme dbát na rozkmit nízkých kmitů výkonu. Dále je důležité dohlížet na linearitu signálu mezi vstupním a výstupním signálem.

Velmi rychlé (statické) budící soustavy signály jsou zdrojem větších rozkmitů P, na druhou stranu jejich reakce a vliv v časovém horizontu je velký. Pokud je budící soustava naopak pomalejšího typu, způsobí menší rozkmit P.

Měření frekvenční charakteristiky $\Delta U_G = \Delta U_{\text{ref}}(f)$

Vyhodnocuje celkový vliv PSS na fázovou a amplitudovou kompenzaci

Přímé měření frekvenční charakteristiky $\Delta U_G = \Delta U_{\text{PSS,in}}(f)$

Vyhodnocuje celkový vliv PSS na fázovou a amplitudovou kompenzaci

2.5.5.2 *Měření v časové oblasti*

Odezva na skokovou změnu žádané hodnoty napětí

Měříme rozdíl mezi velikostí relativního tlumení a počtem půlvln do tlumení průběhu. Ověřujeme pouze účinnost tlumení lokálních kyvů. Vše se měří dle průběhu P jako odezvy na skokový impulz na žádanou hodnotu napětí.

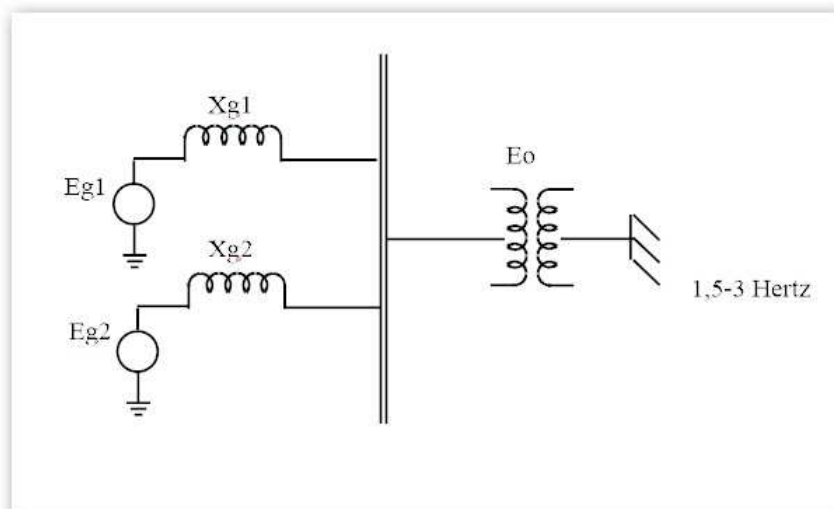
Ustálené systémové kyvy

V ustáleném provozním stavu jsou naměřeny parametry U_G a ω v časovém intervalu 30 minut. Během tohoto času budou vznikat pomalé odchylky ve frekvenčním pásmu.

2.5.6 *Typy oscilací v přenosové soustavě*

2.5.6.1 *Inter Unit Oscillation - Kyvy v rámci jedné oblasti*

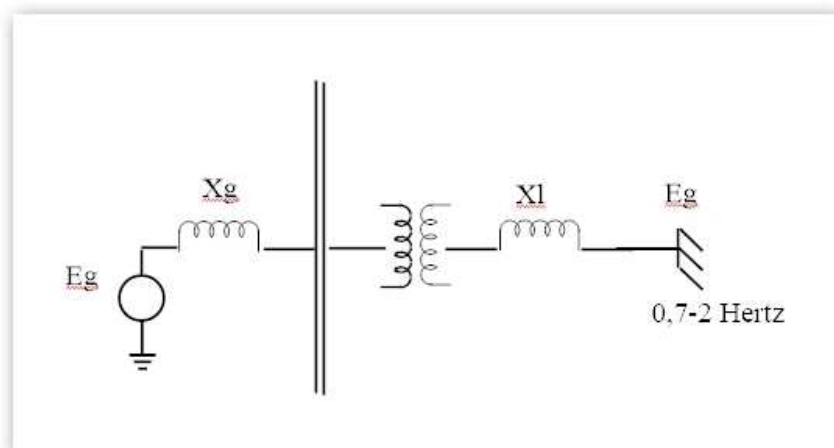
Vznikají běžně při paralelní práci dvou nebo více strojů jedné elektrárny nebo elektráren blízkých. Jednotlivé stroje oscilují vůči sobě ve frekvenčním pásmu 1,5-3 Hz.



Obrázek 25 – Inter Unit Oscillation

2.5.6.2 Local Mode Oscillation

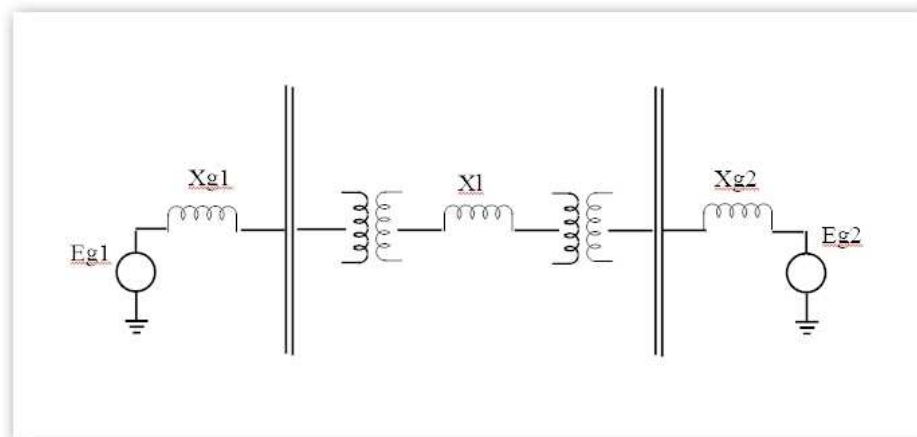
Vzniká při výkyvech jednoho nebo více strojů současně vůči tvrdé síti. Kyvy způsobují velké problémy převážně v případech, kdy je stroj pod velkým zatížením a přenáší energii na síť, která je buď oslabená, nebo velmi dlouhá. Oscilace vznikají v pásmu 0,7 až 2 Hz.



Obrázek 26 – Local Mode Oscillation

2.5.6.3 Inter Area Oscillation

Převážně při kývání velkých generátorických oblastí vůči sobě. Frekvenční pásmo 0,1 až 0,7 Hz.

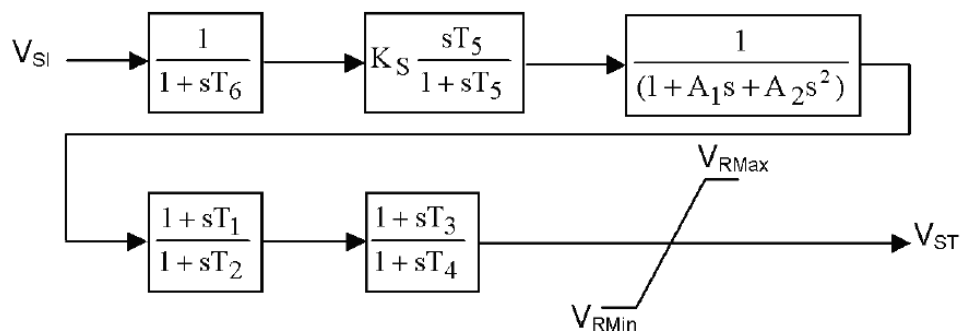


Obrázek 27 – Inter Area Oscillation

2.6 Typy PSS

2.6.1 PSS1A

Na následujícím obrázku je vyobrazen model tohoto typu PSS s jedním vstupem. Mezi běžné vstupy do PSS1A je frekvence, rychlost a výkon.



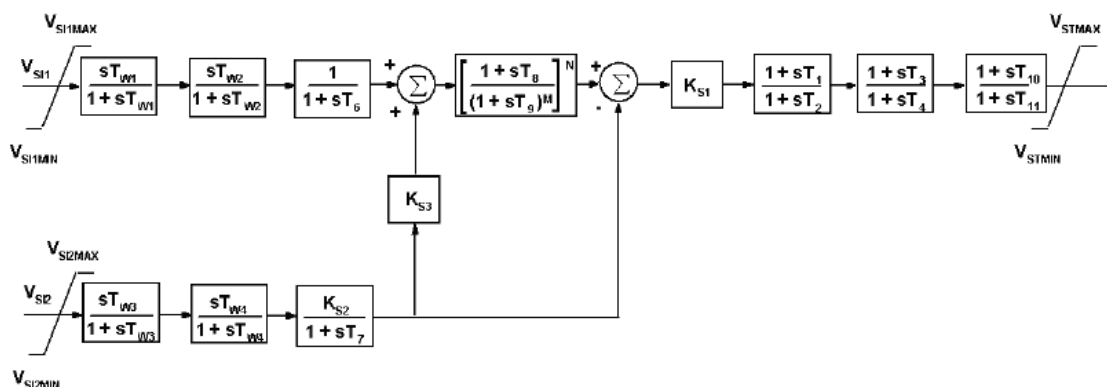
Obrázek 28 – Type PSS1A – jednovstupové PSS

T_6 smí být zastoupeno převodníkovou časovou konstantou. Stabilizátor zesílení je nastavován K_s parametrem a signálem washout propusti je nastavována konstanta T_5 . V dalším regulátoru jsou parametry A_1 a A_2 , které povolují některým nízkofrekvenčním signálům ovlivnit signály vysokofrekvenční na torzní filtry. V případě, že není k tomuto účelu použit, blok bude pomáhat k získání tvaru a fázových

charakteristik stabilizátoru. Další dva bloky nám povolují dva stupně kompenzace lead-lag nastavené konstantami T1 až T4. Výstup ze stabilizátoru smí být omezován různými cestami. Tento jednoduchý model má na výstupu V_{STMAX} a V_{STMIN} . [9]

2.6.2 PSS2B

Tento typ stabilizátoru je vytvořen tak, že má dvojitý vstup, kde můžeme kombinovat vstupy výkonu, frekvence nebo otáček rotoru.



Obrázek 29 – Typ PSS2B s dvojitým

Konkrétní použití tohoto modelu může být rozděleno na dva typy:

- Takové stabilizátory, které ve frekvenčním rozsahu kmitů systému pracují jako vstupní elektrický výkon stabilizátorů. Zde se využívá jako vstupních veličin rychlost a frekvence ke generování signálu mechanické energie. Tento typ přímo využívá rychlost otáčení, tj. bez kompenzace, a předává signál přímo úměrný elektrické energii pro dosažení požadovaného tvaru stabilizačního signálu.
- Takové stabilizátory, které využívají kombinaci parametrů rychlosti (nebo frekvence) a elektrické energie

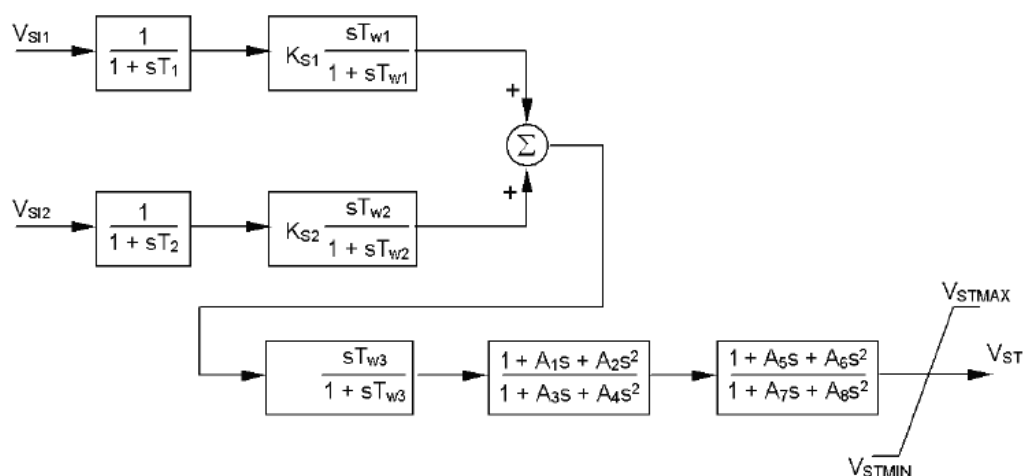
Ač se jedná o jeden z těchto dvou typů stabilizátorových typů vstupů, pokaždé je na ně vytvořen totožný model, který ovšem bude při různých vstupech mít naprosto odlišné výstupy. Pro každý vstup, dvě horní propusti (T_{w1} až T_{w4}) s převodníkem nebo integrátorem časových konstant (T_6 , T_7). Pro první typ stabilizátoru K_{S3} bude obvykle 1 a K_{S2} se rovná $T_7/2H$, kde H je setrvačnostní konstanta synchronního stroje. V_{ST1} bývá obvykle parametrem rychlosti nebo frekvence a V_{ST2} signálem výkonu.

Indexy M a N umožňují “ramp-tracking“ nebo jednodušší filtrační charakteristiku. Také jinak typické hodnoty M a N jsou M=2, N=1 nebo M=2, N=4. Fázová kompenzace se provádí dvěma bloky, buď derivačně-integračním nebo integračně-derivačním (T1 až T4).

Studování nahrazování stabilizátorů potvrdilo, že užití PSS2B lze kdekoliv, kde může být nainstalován stabilizátor PSS1A. [9]

2.6.3 PSS3B

Model PSS3B má dva vstupy a to elektrického výkonu a odchylky úhlové rychlosti. Signály se používají k odvození odpovídající mechanické energii signálu. Časové konstanty T1 a T2 představují převodníky časových konstant a časové konstanty Tw1 až Tw3 horní propust' elektrické energie, rotorovou úhlovou rychlost a odvozenou mechanickou energii. V tomto modelu je výstupní stabilizační signál V_{ST} výsledkem z vektorového součtu zpracovaných signálů pro elektrickou energii a úhlovou frekvenci.

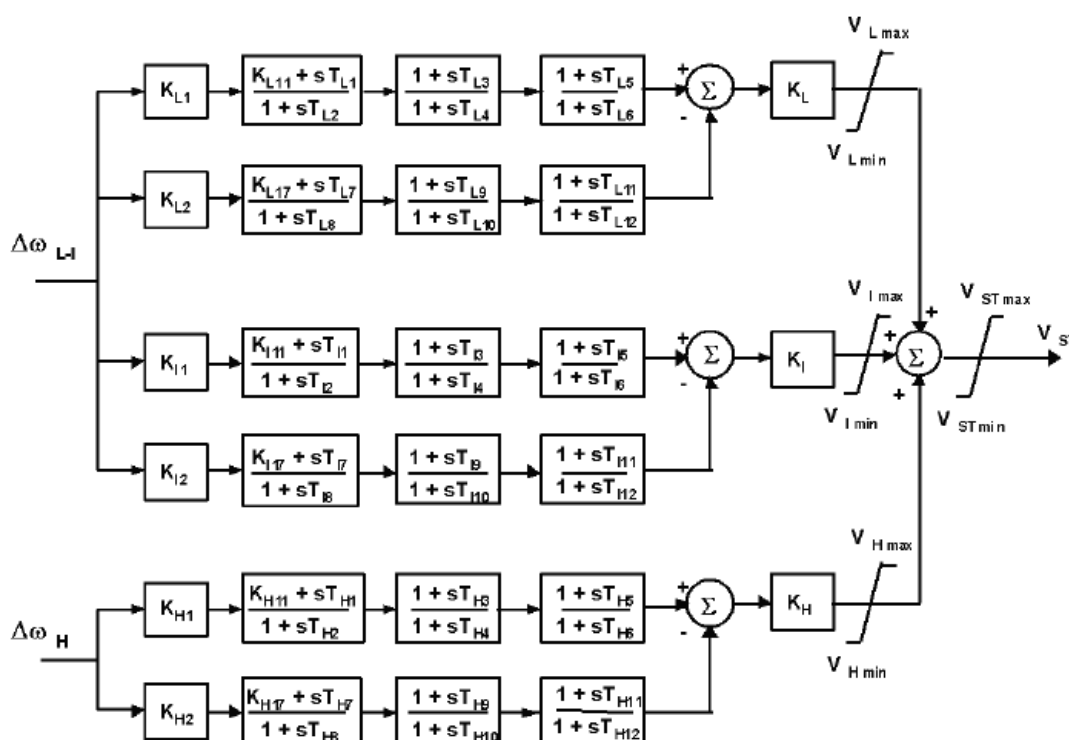


Obrázek 30 – Typ PSS3B s dvojitým vstupem

Požadovaná amplituda a fáze pro stabilizační signál se získává z odpovídající polarity a velikosti zesílení konstant K_{S1} a K_{S2} . Vyrovnání fáze se zajišťuje skrze dva vyrovnávací filtry A1 až A8. Maximální vliv stabilizačního signálu na AVR je upraven mezními hodnotami V_{STMAX} a V_{STMIN} . [9]

2.6.4 PSS4B

Struktura typu PSS4B je založená na několika kmitočtových pásmech. Tři samostatné části (nízké, střední a vysoké režimy oscilací) jsou použity v $\Delta\omega$. Nízké pásmo je obvykle propojeno s napájecím systémem globálního módu, střední pásmo s lokální oblastí a vysoké pásmo v interní oblasti. Každá z těchto tří částí se skládá z diferenciálního filtru, gainu (zisku) a omezovače. Jejich výstupy se sčítají a prochází skrze konečný omezovač hodnotami V_{STMIN} / V_{STMAX} . [9]



Obrázek 31 – PSS4B - mnohavstupové PSS

2.7 Systémové služby

Povinnosti provozovatele Přenosové Soustavy (PS)

Provozovatelem přenosové soustavy v České republice je státní podnik ČEPS, a.s. jenž zodpovídá za zajištění systémových služeb pro elektrizační soustavu na úrovni přenosové soustavy podle Energetického zákona. Systémové služby, které poskytuje, slouží k zajištění bezpečného a spolehlivého provozu PS, kvality přenosu elektrické energie a k zajištění požadavků pro provoz ES ČR vyplývajících z mezinárodní spolupráce v rámci ENTSO-E.

Provozovatel PS (ČEPS) zajišťuje následující systémové služby:

2.7.1 Udržování kvality elektřiny

Služba využívá tyto technicko-organizační prostředky:

- Udržování souhrnné výkonové zálohy pro primární regulaci frekvence
- Sekundární regulace f a P
- Sekundární regulaci napětí
- Terciární regulace napětí
- Zajištění kvality napěťové sinusovky
- Zajištění stability přenosu

Kritéria pro posuzování kvality elektřiny vycházejí z platných technických norem:

2.7.2 Udržování výkonové rovnováhy v reálném čase

Služba využívá tyto technicko-organizační prostředky:

- Sekundární regulace f a P
- Terciární regulaci výkonu
- Využití dispečerské zálohy

Kritéria pro posuzování kvality udržování výkonové rovnováhy a salda předávaných výkonů vycházejí z doporučení platných obecně v rámci ENTSO-E [2], z katalogu opatření před přijetím do UCPTÉ [3] a pravděpodobnostního přístupu (viz Kodex PS část II odstavec 2.12).

2.7.3 *Obnovení provozu*

Jako hlavní prostředek se využívá plán obnovy spolu se schopností ostrovního provozu a startu ze tmy.

Kritéria pro posuzování kvality obnovení provozu vycházejí z předpisů platných v rámci ČEPS, a.s. a ENTSO-E.

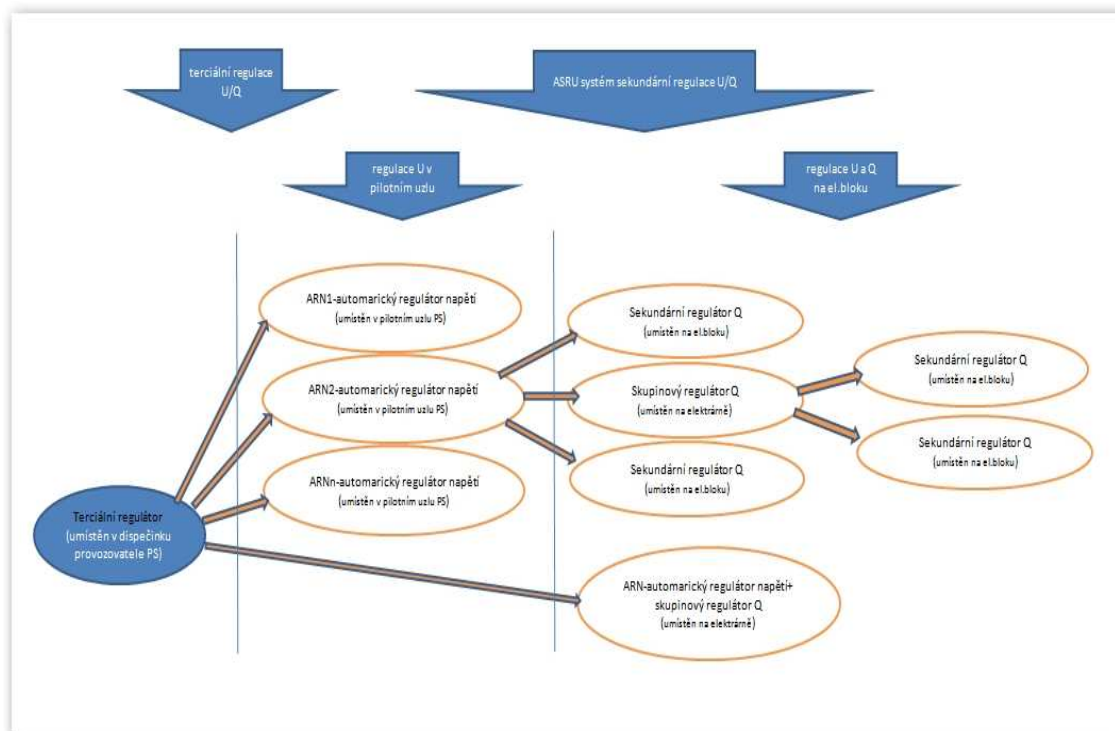
2.7.4 *Dispečerské řízení*

Kromě již výše uvedených prostředků zahrnuje tato služba ještě:

- zajišťování bezpečnosti provozu prostřednictvím plánu obrany a provozních instrukcí
- řízení propustnosti sítě (toků činných výkonů) pomocí zapojení sítě, redispečinku, protiobchodu

Kritéria pro posuzování kvality dispečerského řízení vycházejí z předpisů a provozních instrukcí platných v rámci ČEPS, a.s. a ENTSO-E. Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy. Strana 12 z 53 Systémové služby

Obrázek znázorňující vazby v hierarchické regulaci napětí a jalových výkonů v ES:



Obrázek 32 – Struktura a regulace U a Q v PS

2.8 Zajištění stability přenosu

Jedná se o kontrolní a koordinační činnost spočívající v zajištění stability přenosu činných výkonů a tlumení výkonových kyvů v soustavě. Provoz propojených přenosových soustav vyžaduje kontrolu statické a dynamické stability při přenosech výkonů. Tuto kontrolu provádí ČEPS sledováním a vyhodnocováním měřených dějů v reálném čase¹ a kontrolními výpočty stability. Na základě analýzy se navrhuje opatření pro nastavení hlídačů meze podbuzení, zesílení regulátorů buzení a nastavení konstant systémových stabilizátorů (PSS) v regulátorech buzení jednotlivých generátorů. Tyto záležitosti také řeší Obranný plán v opatření proti kývání a ztrátě synchronismu

Obnovování provozu po úplném nebo částečném rozpadu soustavy (ztrátě napájení) Proces skládající se z najetí bloků bez podpory napětí ze sítě (start ze tmy), postupné obnovy napětí sítě a napájení uživatelů dle předem určených priorit a dále z ostrovního provozu částí sítě a postupného sfázování ostrovních provozů V případě, že dojde k velké systémové poruše, která není zvládnuta běžnými prostředky (popsanými v Plánu obrany proti šíření poruch), může nastat black-out, neboli dojde k úplnému nebo částečnému rozpadu soustavy. V případě takovýchto poruch musí ČEPS

zajistit obnovení provozu do normálního stavu. K tomuto účelu má vytvořený Plán obnovy, který je rozpracován do provozních instrukcí dispečinků provozovatelů DS a pravidelně trénován a některé jeho části i reálně testovány. Příkladem může být start bloků bez dodávky vnějšího napětí a výkonu – start ze tmy a schopnost ostrovního provozu elektrárenských bloků.

systémová služba	kategorie	provozovatelé elektrárenských bloků	ostatní uživatelé
	technicko-organizační prostředek		
udržování kvality elektřiny	udržování souhrnné výkonové zálohy proprimární regulaci frekvence	primární regulace f bloku	
	sekundární regulace napětí	sekundární regulace U/Q	
	sekundární regulace f a P	sekundární regulace P bloku	
udržování výkonové rovnováhy	terciální regulace výkonu	rychle startující 15 minutová záloha snížení výkonu	změna zatížení
obnovování provozu		schopnost ostrovního provozu schopnost provozu za tmy	

Obrázek 33 – Přehled služeb a odpovídajících podpůrných služeb

2.8.1 Požadavky na provoz elektrárenských bloků

Abychom mohli bezpečně provozovat elektrizační soustavu, musí být pevně dány specifikace požadavků na jednotlivé bloky elektráren. Není zde problém vytvořit specifikace pro běžný provoz, ale největším problémem zůstává schopnost bloků pracovat při mimořádných stavech, tj. mimořádných hodnotách napětí a frekvence.

Mezi prvotní specifika dle legislativního kodexu ČEPS – *Kodex I. – Základní podmínky pro užívání přenosové soustavy* patří:

- Dovolené hodnoty napětí a frekvence (povolené limity frekvence a napětí)
- Přechod a provoz na vlastní spotřebu (schopnost bezpečného přechodu na z plného zatížení na provoz na vlastní spotřebu s $T \geq 120$ minut)
- Schopnost ostrovního provozu bloků (V případě ostrovního provozu s vybočením frekvence $\pm 0,2$ Hz musí být blok schopen regulovat výkon automaticky)
- Frekvenční relé (Bloky musí být vybaveny frekvenčními relé, která reagují na nastalé situace v elektrické soustavě)

Další body si rozvedeme trochu více.

Provoz bloku při poruchách v síti

Blok musí být schopen plnit dané požadavky proti síťovým poruchám, kdy je ohrožena:

- Dynamická stabilita při poruchách typu zkratů
- Statická stabilita (ve smyslu schopnosti přenášet činný výkon skrze oslabený přenosový profil)
- Statická stabilita (ve smyslu netlumených kyvů, tj. autooscilací)

Pokud je vypočítáno, že nastává případ, kdy je ohrožena dynamická stabilita, je bezpodmínečně nutné, aby byly všechny bloky opatřeny příslušnými ochranami Automatiky (následující specifikum). Předcházíme ztrátě statické stability především dobře nastavenými hlídači meze podbuzení. Základní opatření vzniku samovolných kmitů nám představuje PSS systém a vhodně zesílené regulační smyčky primární regulace napětí.

Ochrana při ztrátě stability generátoru

Jestli jsou propočty s pravděpodobností ztráty stability reálné a potvrzené od ČEPS, musí být alternátory o výkonu 100MVA a vyšší vybaveny ochranou, která je odpojí při ztrátě stability. Doporučení od ČEPS je užít ochrany, které dovolují prokluzu v určitém počtu. Počet prokluzů se odvíjí od skutečnosti, s jakou je generátor konstruován proti tomuto stavu, tj. vše by mělo být konzultováno přímo s výrobcem.

Automatiky

V určitých bodech připojení elektrárny do přenosové soustavy se může objevit riziko ztráty stabilního chodu při poruchově nebo jinak oslabené síti. K této skutečnosti se opět dochází výpočty. Pro snížení rizik výpadků bloků elektráren se do příslušných částí instalují právě automatiky, které smí odpojit vybrané bloky. Vypínání bloků je realizováno skrze signály vysílané z automatiky do elektrárny a to přesně na urychlovač ventilů turbíny, které slouží k rychlému uzavření ovládacích ventilů turbíny bloku. Hlavním cílem je tedy zachovat stabilní provoz ostatních bloků při poruchovém stavu prvního.

3 Praktická část – Simulace PSS2B v programu MATLAB

Dle zadání máme v této části nasimulovat v programu SIMULINK jeden z typů PSS a to PSS2B. Kvůli širokému záběru tohoto tématu si budeme muset určit hranice celého zkoumání a nadefinovat si vstupní parametry.

3.1 Všeobecné informace

Jelikož máme možnost si vše vyzkoušet na reálných datech, využijeme je. Elektrárna na biomasu ve Skotsku má tyto parametry:

Generátor YDAX 72-360ERH Brush:

$S_n=72,5\text{MVA}$ -*Jmenovitý zdánlivý výkon*

$P_n=61,625\text{MW}$ -*Jmenovitý činný výkon*

$PF=0,85$ -*Power factor, tj. účinník*

$U_{gn}=11\text{kV}$ (provozní napětí 11,5kV) -*Jmenovité napětí na svorkách generátoru*

$I_{gn}=3805\text{A}$ -*Jmenovitý proud na svorkách generátoru*

$U_{fn}=231\text{V}$ -*Jmenovité napětí budící soustavy*

$I_{fn}=906\text{A}$ -*Jmenovitý proud budící soustavy*

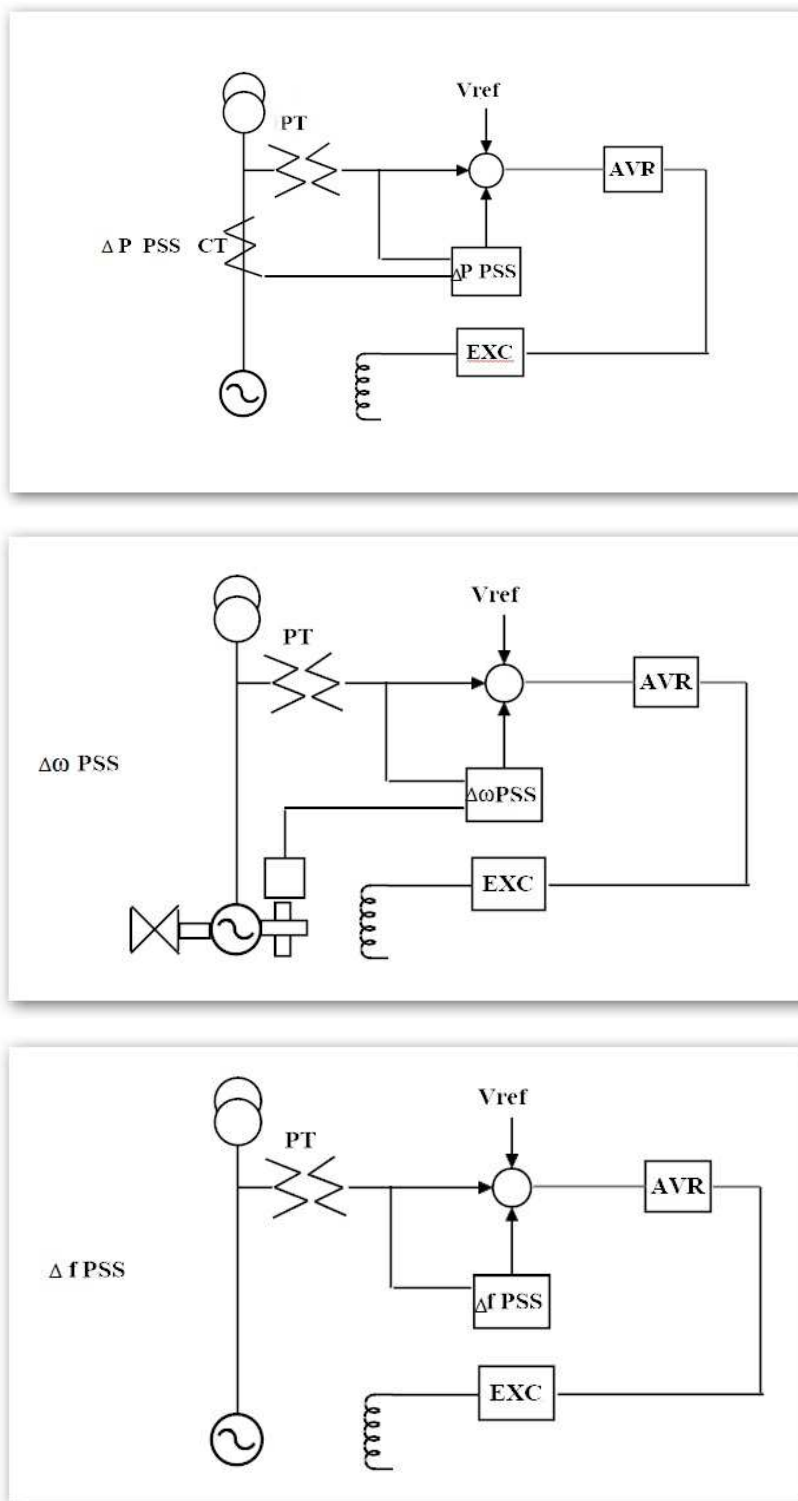
$f=50\text{Hz}$ -*Frekvence*

$n=3000\text{rpm}$ -*Úhlová rychlost*

Statické buzení systému THYRIPOL Siemens, dva redundantní kanály.

3.2 Postup

V první řadě si zadefinujeme, že budeme v programu SIMULINK simulovat pouze náš zadaný stabilizátor PSS2B. Tím pádem nám odpadá problém s tvorbou regulátoru AVR, buzením a sítě. Každopádně si na obrázku 34 můžeme zobrazit, jak by celá budící soustava včetně napájení vypadala.



Obrázek 34 – Schéma zapojení PSS2B- dle typu vstupu

Co zde můžeme vidět, jsou vstupní místa pro naše vstupní parametry do budící soustavy. Náš konkrétní stabilizátor PSS2B bude mít dva vstupy:

- První vstup - Δf
- Druhý vstup - ΔP

To znamená, že parametr pro odchylku frekvence bude přiváděn na vstup 1 stabilizátoru přímo přes oddělovací napěťový transformátor, tj. ten stejný vstup jako pro AVR a parametr pro rozdílový výkon bude mít první z výstupu z napěťového transformátoru a druhý z proudového samostatného transformátoru.

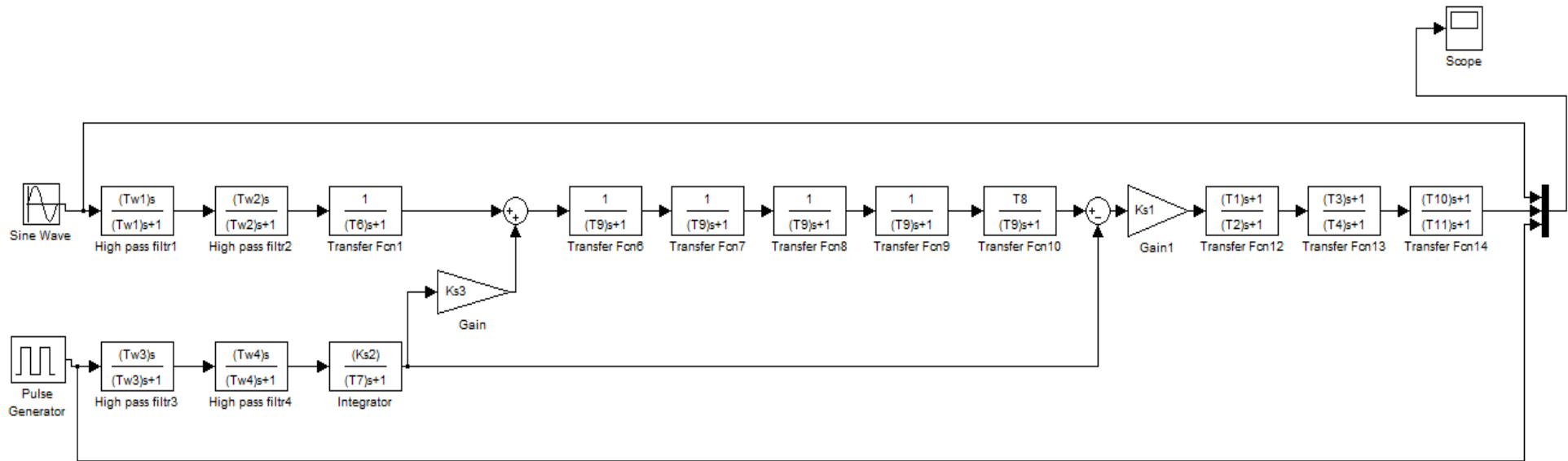
Hlavní problém, který se tu snažíme vyřešit, zůstává v nastavení jednotlivých konstant PSS. Tyto konstanty se musí upravit v závislosti na síti, na kterou je stabilizátor připojený. Vždy na začátku se vychází z konstant, které jsou uvedeny v mezinárodních normách IEEE. Dále však musí být konstanty upraveny dle typu sítě. V našem případě budeme znát vstupní oscilace do stabilizátoru přímo naměřené a uložené v reálném čase. Budeme znát i správnou výstupní charakteristiku, kdy budeme přímo vidět, jak by náš stabilizátor měl zapůsobit. A naší úlohou bude co nejkvalitnější nastavení konstant tak, abychom se výstupní charakteristice co nejvíce přiblížili.

Dále si ukážeme, jak může špatné nastavení konstant ovlivnit fungování stabilizátoru.

3.3 Schéma PSS2B v programu SIMULINK

Na obrázku 35 jsem sestavil kompletní schéma stabilizátoru PSS2B. Na vstupu jsou znázorněny zdroje, které mi vyjadřují přibližný typ signálu. Frekvenci musíme brát za signál ovlivněný nejenom jednou sinusovkou, ale i dalšími menšími frekvencemi, které nám sinusovku hodně zdeformují.

ROZBOR A SIMULACE STATICKÉHO BUZENÍ PSS



Obrázek 35 – Schéma PSS2B vytvořené v programu Matlab- SIMULINK

3.4 Ovlivňování PSS konstantami

Abychom si lépe představili, jak nám mohou konstanty silně ovlivnit výstupní signál ze stabilizátoru, ukážeme si je na dvou studiích, kdy k první studii jsem si vypůjčil konstanty od A.Hammer [9], kde se jedná o 100MVA zdroj, kterým je vodní elektrárna (předpokládám, že elektrárna je vystavena v Norsku). Druhé hodnoty, tj. studie 2, jsou naopak výchozí hodnoty z již uskutečněné elektrárny na biomasu o výkonu 72,5MVA.

3.4.1 Studie 1

Mějme tyto konstanty:

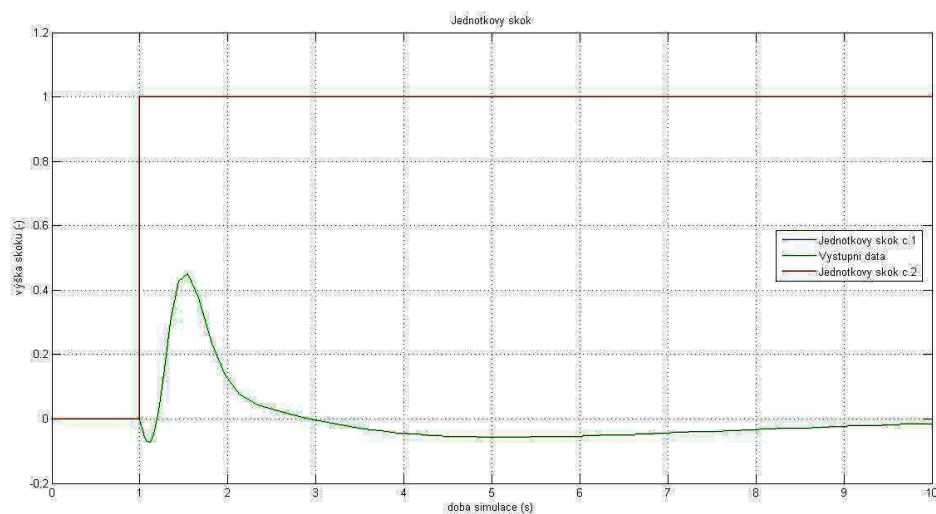
```

Ks1 = 1;
Ks2 = 0.5137;
Ks3 = 1;
Tw1= 3;
Tw2= 3;
Tw3= 3;
Tw4= 3;
T9 = 0.1;
T8 = 0.4;
T1 = 0.3981;
T2 = 0.1676;
T3 = 0.3981;
T4 = 0.1676;
T6 = 0;
T7 = 3;
T10 = 0.1790;
T11 = 0.13;

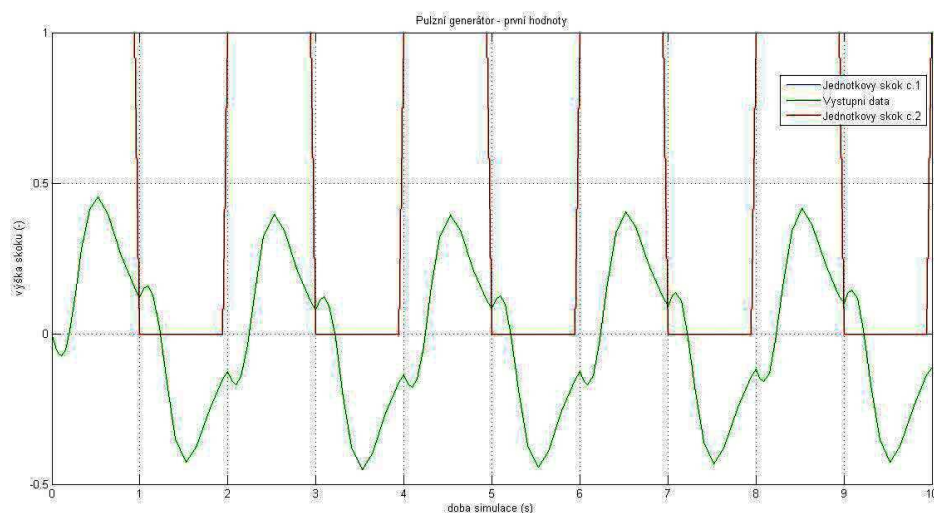
```

Pro takovéto konstanty nám vychází grafy takto.

a)



b)



Obrázek 36 – a) jednotkový a b) pulzní generátor s konstantami 1

Na obrázku a) vidíme jednoduchý jednotkový skok, který byl pro oba vstupy stejný. Stabilizátorový výstup má zelenou barvu. Na obrázku b) je ukázáno, jak se stabilizátor nestihne vrátit do rovnovážného bodu a je neustále podněčován dalšími impulzy.

3.4.2 Studie 2

Mějme tyto konstanty:

$$K_{s1}=5,8768$$

$$K_{s2}=0,7162$$

$$K_{s3}=0$$

$$T_{w1}=2,6168s$$

$$T_{w2}=9,6420s$$

$$T_{w3}=5,0471s$$

$$T_{w4}=0s$$

$$T_1=0,3229s$$

$$T_2=0,02s$$

$$T_3=1,7644s$$

$$T_4=0,6465s$$

$$T_6=0s$$

$$T_7=6,9070s$$

$$T_8=0,4s$$

$$T_9=0,1954s$$

$$T_{10}=0,0822s$$

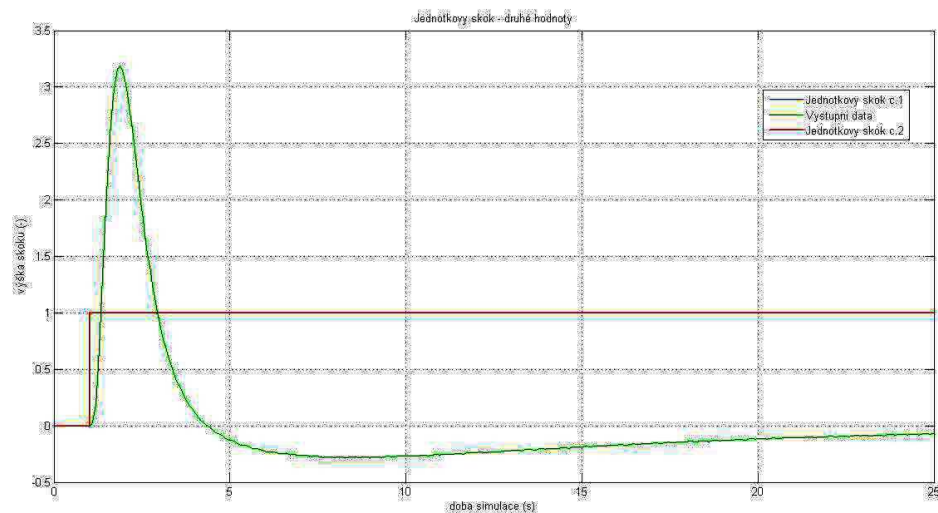
$T_{11}=0,0202s$

$V_{smin}=-0,05$

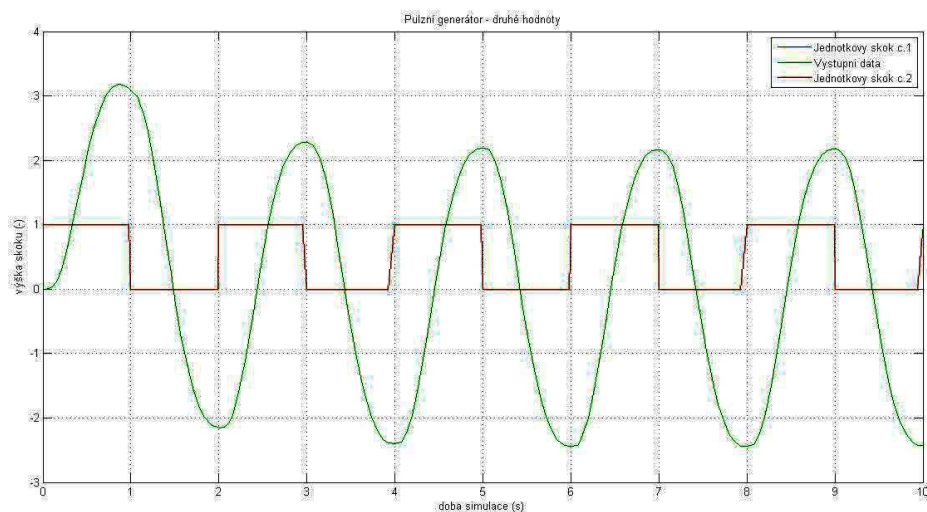
$V_{smax}=0,05$

Pro takovéto konstanty nám vychází grafy takto.

a)



b)



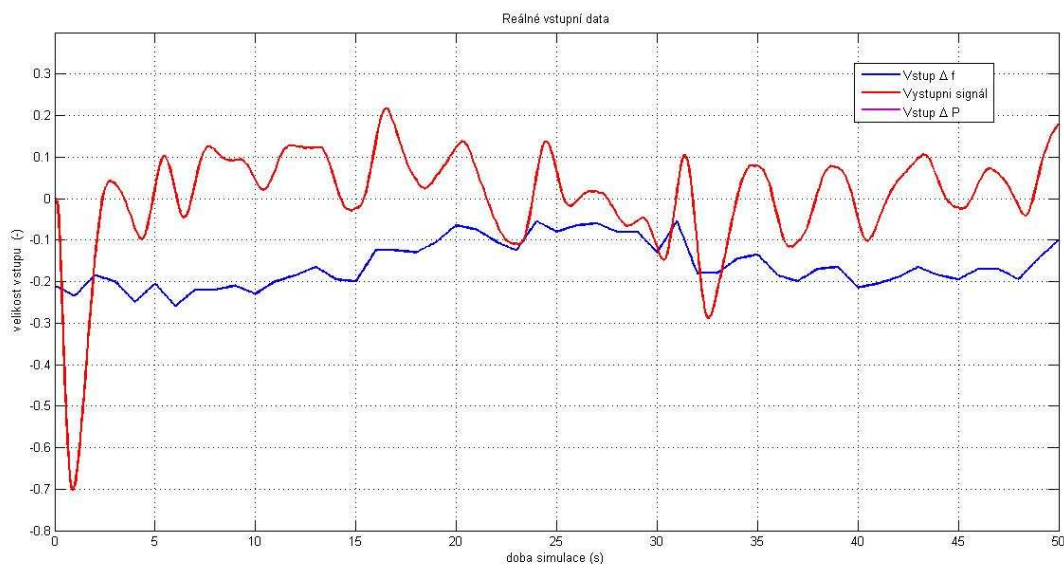
Obrázek 37 – a) jednotkový a b) pulzní generátor s konstantami 2

Zde je patrné oproti předcházejícím konstantám, že regulátor se snaží tlumit vstupní signál daleko silněji, než při předešlých konstantách. Změna parametrů samozřejmě silně souvisí s tím, jak tvrdý zdroj energie máme a zároveň i s typem síťových parametrů.

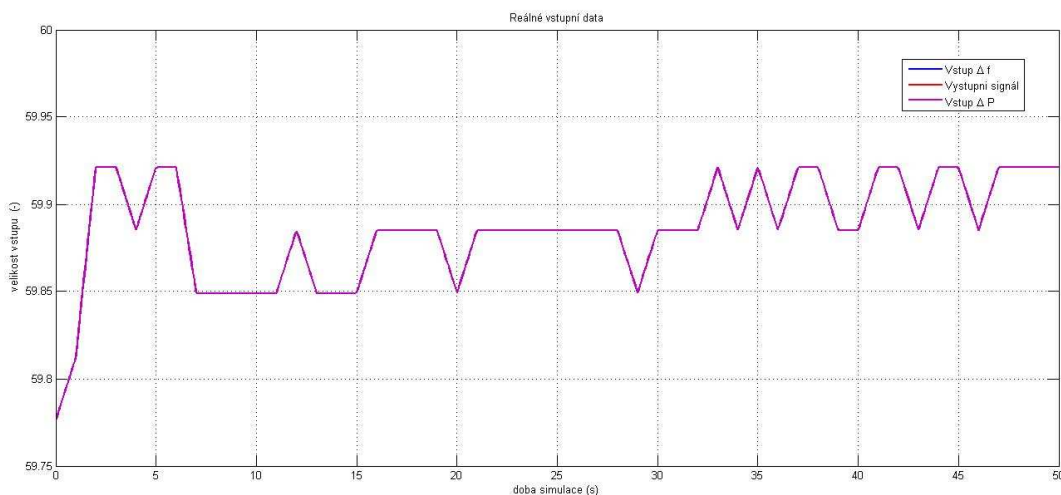
3.5 Reálná vstupní data do PSS2B

Abych vyzkoušel, zda mnou zvolený stabilizátor pracuje s reálnými daty, na vstupy jsem připojil soubor ve formátu .csv. Tato data byla nasnímána při kroku +2, což znamená umělé zvýšení výkonu o 2% z výkonu celkového při zkoušce správného odladění konstant. Jako první vstup jsem nastavil filtrované hodnoty rozdílové frekvence. Druhým vstupem by měl být vstup rozdílového výkonu. Bohužel, tento parametr není v datech zanesen, a proto jsem si vypomohl měřeným výkonem z výstupu generátoru. To mi samozřejmě moje výstupní parametry částečně znehodnotí. Většinou se ΔP pohybuje v poměrných jednotkách v intervalu $\langle 0;1 \rangle$, což pokud bychom výstupní činný výkon podělili /100, tak se hodnotami velmi přiblížíme.

Následující obrázek zobrazuje reální výstup PSS.



Obrázek 38 - Reálný výstup z PSS2B



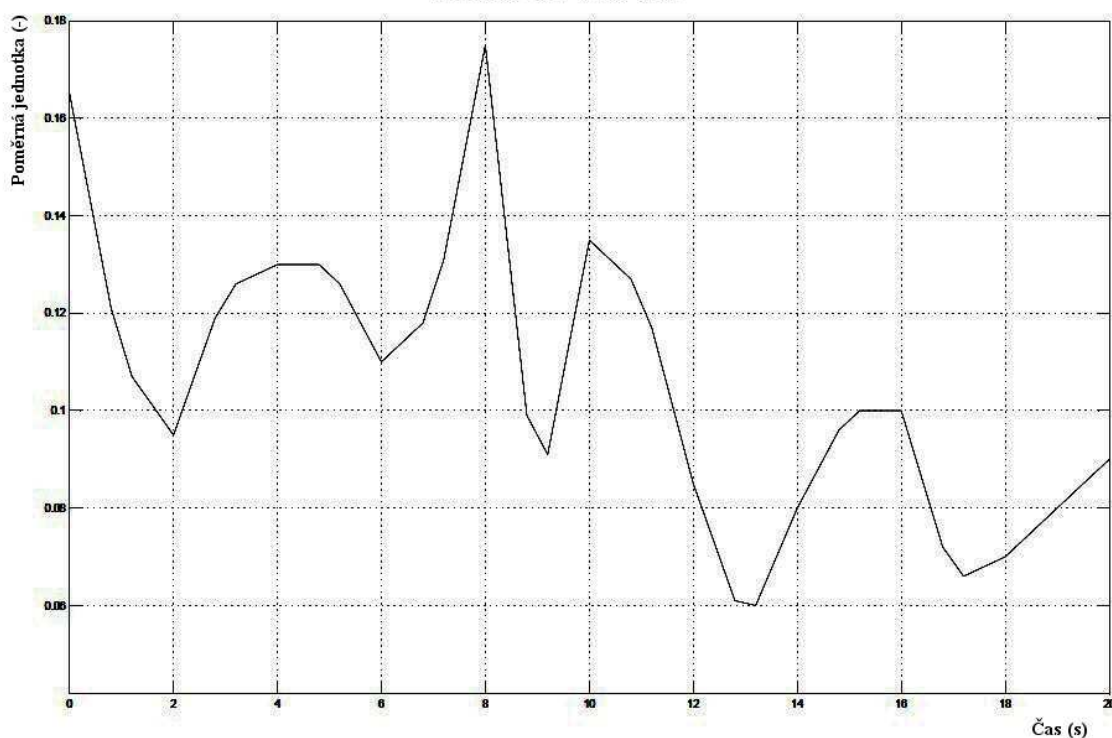
Obrázek 39 - Vstupní výkon do PSS

Na obrázku 38 vidíme vstupní hodnotu Δf jako modrou čáru. Většinu času nám rozdílová frekvence kmitá kolem -0.2Hz . Červená čára, která nám reprodukuje výstup z PSS2B se snaží reagovat na vstupující hodnoty. Jak jsem již psal, výsledek je ovlivněn vstupním výkonem, kdy nevstupují hodnoty pro stabilizátor správné, tj. 0 až 1, ale hodnota celkového činného výkonu a jeho změn. Teoreticky lze vložit před vstup rozdílového výkonu určitý “zeslabovač“ tak, aby nám vstupující informaci podělil hodnotou 100. Pro naše měření však bude postačovat schéma takové, jaké je.

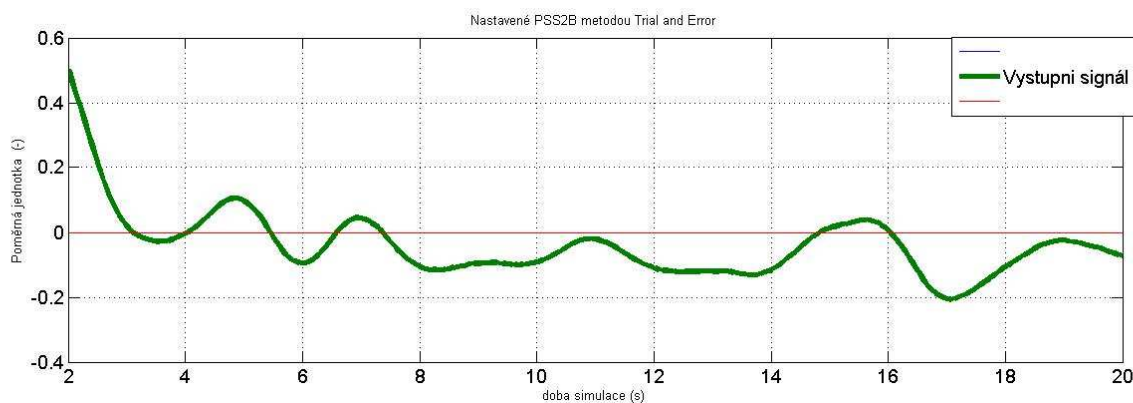
3.6 Výsledné nastavení pomocí metody *Trial and Error*

Metodou Trial and Error jsme došli k následujícímu porovnání obrázků.

VÝSTUP Z PSS



Obrázek 40 - Výstup z PSS naměřený ve Skotsku



Obrázek 41 - Výsledek napodobení metodou Trial and Error

Jak již bylo psáno, obrázky 40 a 41 by měly být totožné. Odlišnosti mezi obrázky jsou způsobeny chybějícími měřeními daty pro druhý vstup a také nepřesnosti tohoto modelu. V reálních vstupních a výstupních datech jsou zahrnuty i vlivy AVR a hlavně vlivy sítě, které nejdou v modelu dostatečně simulovat.

Výsledné navržené konstanty pro tuning PSS2B pro elektrárnu na biomasu ve Skotsku, 72,5MVA:

$$K_{s1} = -5.87;$$

$$K_{s2} = 0.2162;$$

ROZBOR A SIMULACE STATICKÉHO BUZENÍ PSS

```
Ks3=0;  
Tw1=2.6168;  
Tw2=9.6420;  
Tw3=5.0471;  
Tw4=0;  
T1=-0.3229;  
T2=0.02;  
T3=1.7638;  
T4=0.6462;  
T6=0;  
T7=6.9063;  
T8=0.4;  
T9=0.1953;  
T10=0.0855;  
T11=0.0404;
```

4 Závěr

Cílem této práce bylo vytvoření určitého zjednodušeného návodu, jak nasimulovat a nastavovat typ stabilizátoru PSS2B. Téma práce se rozbíhá do třech oborů, které se mohou zdát dosti odlišné, a to Energetika, Pohony a Kybernetika, robotika a řízení. Při vyhledávání různých prací a témat zabývajících se stabilizátory, jejich laděním nebo simulací, jsem nikde nenašel souhrnné informace, podle kterých by se dal napodobit celý jejich experiment. Vždy mi chyběla vstupní data, která jsou důležitou součástí experimentu. A právě proto jsem vytvořil tuto práci, která by nejen souhrnně popisovala teoretickou část, ale i seriózně ukázala, jak lze dojít ke stejnému výsledku, který je touto prací prezentován. Originálním aspektem se k této práci stala reálná data zaznamenávaná při nastavování generátoru v elektrárně na biomasu ve Skotsku o výkonu 72,5 kVA. Díky tomu jsem mohl simulovat reálnou situaci. Na co se v diplomové práci snažím poukázat je, jak náročné je nastavení konstant jednotlivých složek stabilizátoru a jak jejich malá změna dokáže rapidně ovlivnit celkový výstup. To bylo ukázáno na konstantách použitých pro vodní elektrárnu v Norsku o výkonu 100kVA a konstantách pro elektrárnu na biomasu ve Skotsku. Na grafech bylo vyobrazeno, jak na skotské síti s pevnějším zdrojem elektrické energie je výstup ze stabilizátoru při jednotkovém skoku daleko silnější, tj. vyšší útlum, než na elektrárnu vodní. V druhé části jsem využil již zmíněných reálných dat, která jsem vložil jako vstupy Δf a ΔP do stabilizátoru. Kvůli absenci dat ze sítě jsem musel svůj experiment lehce upravit. Znal jsem data, která měla vystupovat z PSS, tím pádem jsem se snažil co nejvíce napodobit výstupní koncový reálný graf. Nastavoval jsem konstanty metodou Trial and Error, a když už se zdál být graf blízký grafu skotskému, úkol byl splněn a konstanty uznány jako finální.

5 Seznam bibliografických citací a zkratk

5.1 Seznam citací

- [1] ČSN 35 0255. Budící systémy turboalternátorů, hydroalternátorů a synchronních kompenzátorů. Praha: Český normalizační institut, 1988.
- [2] P. KUNDUR. *Power system stability and control*. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 1994.
- [3] O.Hora a kolektiv. *Regulační a budící systémy synchronních strojů*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1985, DT 621.313.32, 04-527-85.
- [4] Ing. Zbyněk Brettschneider, ORGREZ a.s.. *Definice požadavků na systémové stabilizátory do Kodexu PS*. 2007. Dostupné z: www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex/.../Metodika%20PSS_.pdf
- [5] TLUSTÝ, KYNCL, MUSIL, ŠPETLÍK, ŠVEC, HAMOUZ, MÜLLER. *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*. 1. vyd. Praha: EUROPRINT, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [6] VRBA, ŠVEJNAR, MÁŠLO, Soubor více autorů. *Řízení a stabilita elektrizační soustavy*. vyd. NEZNÁMÉ
- [7] HILL, STANKOVIC, TAYLOR a další: Definition, Classification of Power System Stability, IEEE Transaction on Power Systems Stability, CIGRE Technical Brochure No.231, Paris 2003
- [8] MITSUBISHI ELECTRIC CORPORATION: *Power system stabilizer*. Dostupné z: <http://www.meppi.com/Products/GeneratorExcitationProducts/Static%20Excitation%20System/Power%20System%20Stabilizer.pdf>
- [9] HAMMER A. Norwegian University of Science and Technology: *Analysis of IEEE Power System Stabilizer Models*: 2011. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:445805/FULLTEXT01.pdf>
- [10] Evropská unie: *Europe 2020 targets*. Dostupné z: http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/targets/index_en.htm

5.2 Seznam zkratek

Zkratka	Význam
AVR	<i>Automatic voltage regulator</i>
BS	<i>Budící soustava</i>
ČEPS	<i>Česká energetická přenosová soustava</i>
ČSN	<i>Česká státní norma</i>
ENTSO-E	<i>European Network of Transmission System Operators for Electricity</i>
ES	<i>Elektrická soustava</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
OZE	<i>Obnovitelné zdroje energie</i>
PPS	<i>Provozovatel přenosové soustavy</i>
PS	<i>Přenosová soustava</i>
PSS	<i>Power stabilizator systém</i>
SA	<i>Synchronní alternátor</i>
UCPTE	<i>Union for the coordination of production and transmission of electricity</i>
CIGRE	<i>Profesní světová asociace elektroinženýrů</i>

6 Přílohy

Seznam příloh:

PRÍLOHA č. 1 – SEZNAM NOREM ZABÝVAJÍCÍCH SE NAŠIM TÉMATEM

PRÍLOHA č. 2 – SKUTEČNÉ GRAFY ZE SKOTSKÝCH DAT

PRÍLOHA č. 3 – PROGRAM V MATLABU

PŘÍLOHA Č.1 - SEZNAM IEEE NOREM ZABÝVAJÍCÍCH SE NAŠIM TÉMATEM

General Excitation System Standards

IEEE 421.1 (1986) Criteria and definitions

IEEE 421.2 (1990) Dynamic Performance Definition Guide

IEEE 421.3 (1978) High Voltage test rules

IEEE 421.4 (1990) Guide for the preparation of Excitation system specifications

IEEE 421.5 (1992) Excitation System Models for PSS works

IEC 60 034 – 16-1 (1991) Excitation Systems for synchronized machinery

VDI / VDE 3680 Regulation Blatt 2, Dez. 1983 Regulation arrangements in
Synchronous
machine Excitation systems

Environmental Standards

IEC 60 068 – 1 (1988) Basic environmental test procedures

IEC 60 068 – 2 – 1 (1990) Test – cold

IEC 60 068 – 2- 2 (1974) Test – dry

IEC 60 068 – 2 – 30 (1980) Test – humidity temperature

IEC 60 068 – 2 – 13 (1983) Level

EN 60 529 (1989) Enclosure protection classes (DIN IP Code)

IEC 60 255 – 21 – 1 (1988) Vibration

IEEE 344 (1987) Seismic sufficiency

EMC Standards

Emission:

EN 50 081 – 2 (1993)

IEC / EN 61 800 – 3, Annex D (1996)

SN – 62.1008d (1997)

Emission standard

Product standard

Product standard hydro – Quebec

Immunity:

IEC / EN 61 000 – 6 – 2 (2001) Strength standard

SN – 62. 1008d (1997) Hydro – Quebec Product Standard

IEC / EN 61 000 – 4- 2 (2001) Electrostatic discharge rules

IEC / EN 61 000 – 4- 3 (2002) Radio frequency propagation: electromagneticfield

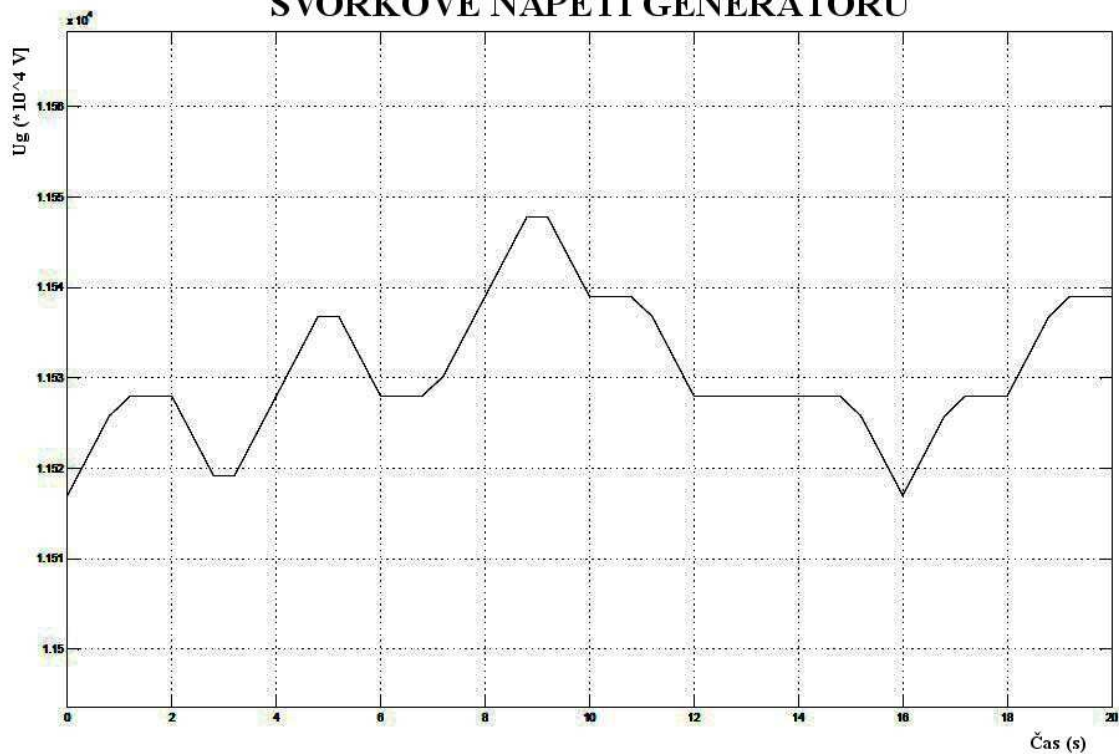
- IEC / EN 61 000 – 4 – 4 (1995) Electrical sudden transient condition rules
- IEC / EN 61 000 – 4 – 5 (1995) Shock strength rules
- IEC / EN 61 000 – 4 – 6 (2003) Conductor interaction induced by radio frequency (current injection)
- IEC / EN 61 000 – 4 – 11 (2001) Voltage lower values, short interruptions and voltage changes resistance
- IEC / EN 61 000 – 4 – 12 (2001) Test wave with oscillation (SWC)
- IEC 60 255 – 22 – 1 (1998) Test wave with oscillation (SWC)

Other standards

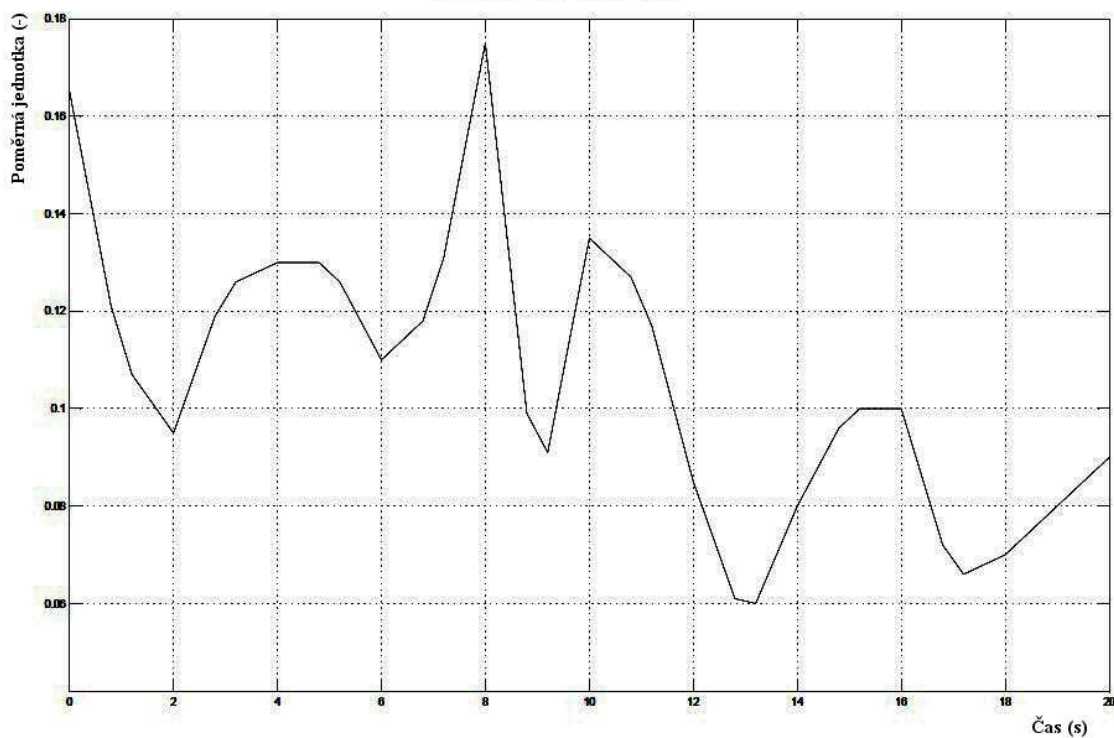
- IEC 60 146 – 1 – 1 (1991) Semi conductor converters
- IEC 60 185 Current transformer
- IEC 60 726 (1982) Dry type power transformers
- IEC 60 664 – 1 (2002) Isolation coordination
- IEC / EN 60 439 (1999) Low voltage switching panel and control system
- EN 50 178 (1997) Electronic device application in high current facilities

PRÍLOHA č. 2 – SKUTEČNÉ GRAFY ZE SKOTSKÝCH DAT

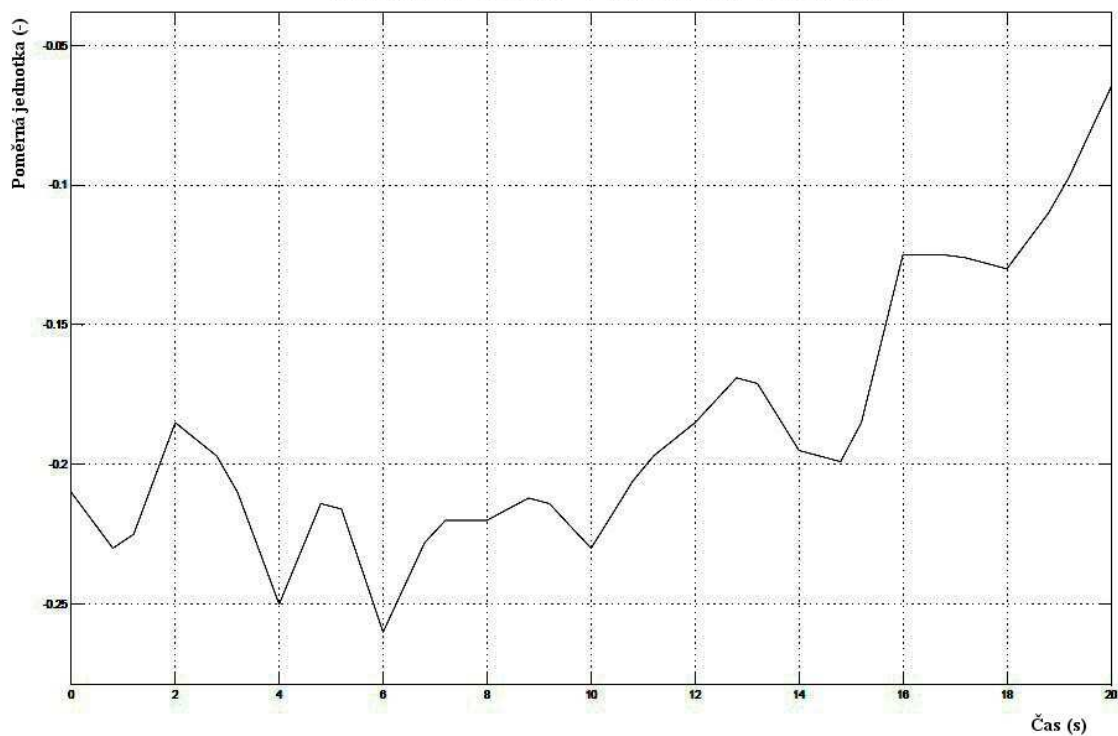
SVORKOVÉ NAPĚTÍ GENERÁTORU



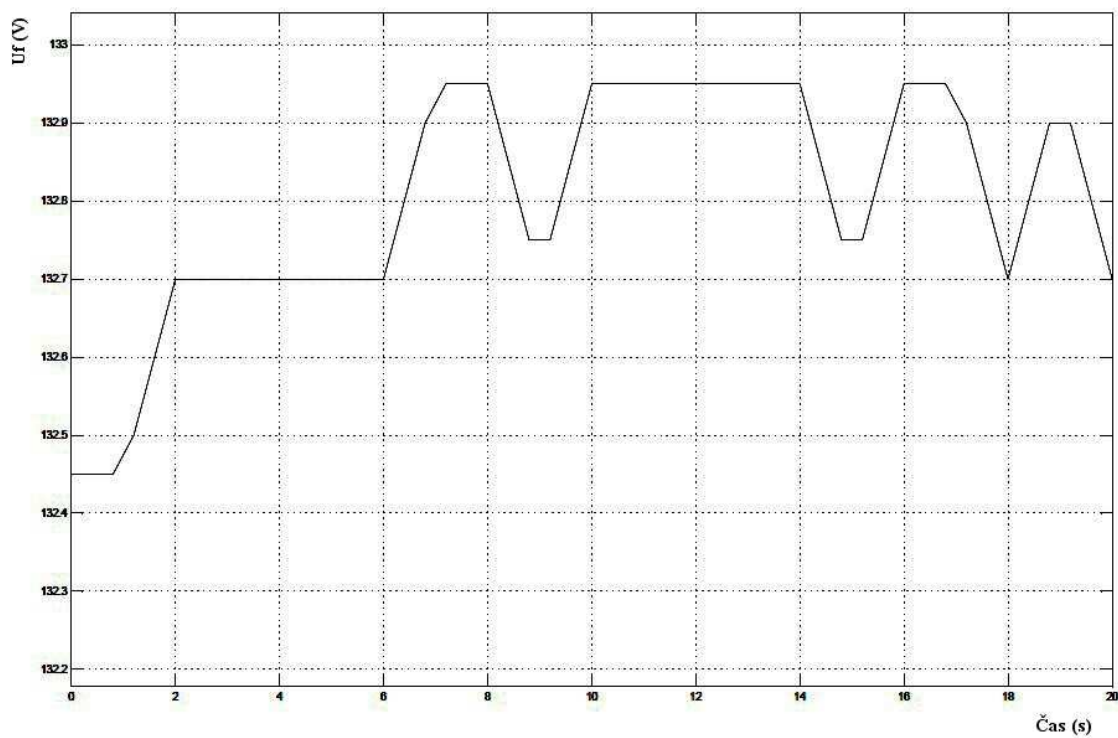
VÝSTUP Z PSS



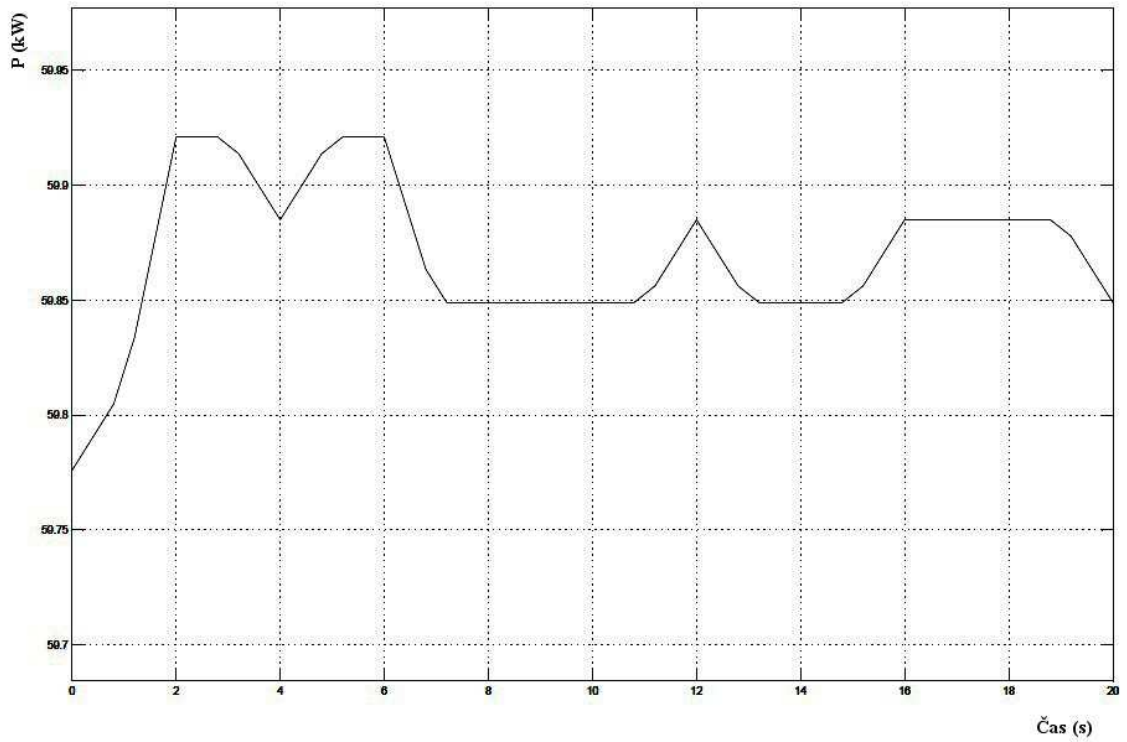
FILTROVANÝ VSTUP Δf DO PSS



VÝSTUP Z BUZENÍ (PSS+AVR+BUDIČ)



ČINNÝ VÝKON GENERÁTORU



PRÍLOHA č. 3 – PROGRAM V MATLABU

```
%%Winkler Diplomova prace nastaveni konstant - 1 graf
Ks1 = 1;
Ks2 = 0.5137;
Ks3 = 1;
Tw1= 3;
Tw2= 3;
Tw3= 3;
Tw4= 3;
T9 = 0.1;
T8 = 0.4;
T1 = 0.3981;
T2 = 0.1676;
T3 = 0.3981;
T4 = 0.1676;
T6 = 0;
T7 = 3;
T10 = 0.1790;
T11 = 0.13;
%% Winkler Diplomova prace nastaveni konstant - 2 graf
Ks1=5.8768;
Ks2=0.7162;
Ks3=0;
Tw1=2.6168;
Tw2=9.6420;
Tw3=5.0471;
Tw4=0;
T1=0.3229;
T2=0.02;
T3=1.7644;
T4=0.6465;
T6=0;
T7=6.9070;
T8=0.4;
T9=0.1954;
T10=0.0822;
T11=0.0202;

%% Trial and error

Ks1=-5.87;
Ks2=0.2162;
Ks3=0;
Tw1=2.6168;
Tw2=9.6420;
Tw3=5.0471;
Tw4=0;
T1=-0.3229;
T2=0.02;
T3=1.7638;
T4=0.6462;
T6=0;
T7=6.9063;
T8=0.4;
T9=0.1953;
T10=0.0855;
T11=0.0404;
```

ROZBOR A SIMULACE STATICKÉHO BUZENÍ PSS

```
%% nastaveni dat - bez cisla s jednotkovym skokem, s cislem 2 je to z
csv
time2=ScopeData.time; %osa x - casova
data2=ScopeData.signals.values; %osa y - data ze simuling

%% plot

plot(time2,data2(:,1), time2, data2(:,2), time2, data2(:,3))
hold on
title ('Reálné vstupní data') %titulek grafu
xlabel ('doba simulace (s)') %popis osy x
ylabel ('velikost vstupu (-)') %popis osy y
grid on
legend('Vstup \Delta f', 'Vystupni signál', 'Vstup \Delta P');

%% Vstupy do matlabu
vstup3(:,2)=CH30x28V0x29;
vstup3(:,1)=Time0x28ms0x29;

vstup3=vstup3.';
% pak uložit jako vstup-3.mat - simulink si to prebere

%% Vstupy do matlabu 2
vstup7(:,2)=CH70x28V0x29;
vstup7(:,1)=Time0x28ms0x29;

vstup7=vstup7.';
```

Simulinková část není přiložena, jelikož schéma může být nasimulováno dle mého schématu na obrázku 35.