

Analiza stabilizatorjev nihanj sinhronskih generatorjev v slovenskem elektroenergetskem sistemu

Jožef Ritonja¹, Mitja Dušak²

¹ Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko, Smetanova ul. 17, 2000 Maribor, Slovenija

² Savske elektrarne Ljubljana d.o.o. Gorenjska c. 46 1215 Medvode, Slovenija

E-pošta: jozef.ritonja@um.si

Povzetek: V članku je opisana analiza delovanja stabilizatorjev v slovenskem elektroenergetskem sistemu. Predstavljeni so osnovni princip delovanja in glavne lastnosti klasičnih linearnih stabilizatorjev. Opravljen je pregled uporabe stabilizatorjev v vseh slovenskih elektrarnah. Za oceno učinkovitosti delovanja stabilizatorjev so postavljena merila, ki temeljijo na meritvah oddane delovne moči. Metoda za ugotavljanje učinkovitosti je preizkušena na štirih hidroelektrarnah.

Ključne besede: sinhronski generator, elektromehanska nihanja, stabilizator nihanj sinhronskega generatorja, elektroenergetski sistem;

Analysis of the Slovenian power system stabilizers

The paper analyses the power system stabilizers used in Slovenian power system. The basic principle and the characteristics of the conventional linear stabilizers are described. An overview of the stabilizers used in Slovenian power plants is made. The criteria based on the active power measurements are determined to assess the effectiveness of the stabilizers. The method used to determine their effectiveness is tested on four hydro power plants.

1 UVOD

Stabilnost je najpomembnejša kvalitativna lastnost dinamičnih sistemov. Elektroenergetski sistemi (EES) so najboljše dinamični sistemi, ki jih je zgradil človek. EES tvorijo proizvajalci, elementi za prenos in porabniki električne energije. EES so decentralizirani dinamični sistemi in so v svojih dinamičnih lastnostih nelinearni in slabo dušeni. Izraz stabilnost EES definira lastnost sistema, da ostane v ravnotežnem obratovalnem stanju pri normalnih obratovalnih razmerah in da ima po nastopu motenj, ki ne spadajo v normalna obratovalna stanja, sposobnost vrnitve v obratovalno stanje, sprejemljivo za uporabnike [1]. Nestabilnost EES se kaže kot izpad sinhronskih generatorjev iz sinhronizma ali kot nezmožnost zagotavljanja ustrezne napetosti na vseh zbiralnicah sistema.

Sinhronski generatorji (SG) so večinski in najpomembnejši proizvajalci električne energije. Za upravljavce elektrarn je pomembno predvsem, da so sposobni zagotoviti, da bodo njihovi SG ostali v sinhronizmu pri normalnih obratovalnih razmerah in tudi v izjemnih obratovalnih stanjih. V obeh primerih je

tudi zaželeno, da so prehodni pojavi, ki sledijo spremembi obratovalnega stanja, čim bolj dušeni. Osnovna razloga, da se SG na motnje odzovejo z oscilatornimi prehodnimi pojavi, sta dva:

- SG so zaradi svoje konstrukcijske zasnove in principa delovanja že v osnovi mejno stabilni ali zelo slabo dušeni dinamični sistemi,
- regulacijski sistemi, namenjeni vzdrževanju stacionarnih vrednosti električnih količin, ki jih zahtevajo porabniki, v nekaterih primerih še poslabšajo dinamične lastnosti posameznih SG.

Čeprav so prve izmenične EES zgradili in začeli uporabljati v Evropi leta 1891 in v Severni Ameriki leta 1893 [1], so stabilnostne probleme EES identificirali in prepoznali kot pomemben problem šele leta 1920 [2]. Poglavitni razlog, da v začetnem obdobju stabilnostnih problemov ni bilo, so izvedbe SG, ki so imeli zaradi konstrukcijskih rešitev z dušilnimi navitji močno povečane asinhronne dušilne lastnosti. Prav tako v začetnem obdobju EES niso bili opremljeni z avtomatskimi regulacijskimi sistemi. Zaradi ekonomskih zahtev, katerih posledica so bili spreminjanje konstrukcij sinhronskih generatorjev, uvedba regulacijskih sistemov v EES in večanje obsega EES, pa je stabilnost EES čedalje pomembnejši problem.

Osnovni način povečanja dušenja sinhronskih generatorjev in s tem zagotavljanja stabilnosti EES je uporaba stabilizatorjev nihanj sinhronskih generatorjev (angl. PSS – power system stabilizer). Stabilizator, ki na podlagi meritve dostopnih generatorjev fizikalnih količin, v katerih je vidno oscilatorno obnašanje

generatorjev, generira dodatni signal, ki spreminja vzbujalno napetost generatorja in tako s pomočjo regulacijskega sistema poveča njegovo dušenje, je bil prvič predstavljen leta 1969 [3]. Predstavljeni stabilizator je dodatni element v okviru vzbujalnega sistema. V članku [3] sta podrobneje predstavljena zgradba regulacijskega sistema in način izračuna vrednosti parametrov regulacijskega sistema, ki temelji na linearni teoriji vodenja. Predstavljeni pristop je preprost za realizacijo, vendar zaradi uporabe linearnega vodenja za dušenje nelinearnega sistema ne zagotavlja optimalnega dušenja v celotnem delovnem območju. Čeprav so v naslednjih štiridesetih letih v okviru vseh novih teorij vodenja intenzivno iskali naprednejši regulacijski pristop, pa v komercialno dostopnih izvedbah vzbujalnih sistemov še vedno uporabljajo osnovno linearno izvedbo stabilizatorja. Posledica implementacije takšnega stabilizacijskega regulacijskega sistema je, da takšni stabilizatorji ne zagotavljajo optimalnega dušenja v celotnem delovnem območju. Še več, v določenih obratovalnih stanjih takšni stabilizatorji celo zmanjšajo dušenje sinhronskega generatorja. Zato v številnih slovenskih elektrarnah, katerih vzbujalni sistemi so opremljeni s stabilizatorji, stabilizatorje raje pustijo neaktivne.

Temeljni cilj prispevka je predstavitev trenutnega stanja v slovenskem EES. Opravljen je kratek pregled vseh generatorjev slovenskih elektrarn z močjo nad 5 MW. Opisani so uporabljeni stabilizatorji in izdelana metodologija za ugotavljanje učinkovitosti njihovega delovanja. Podrobneje so predstavljeni rezultati analize delovanja stabilizatorjev v izbranih hidroelektrarnah.

2 STABILIZACIJA NIHANJ SINHRONSKEGA GENERATORJA

2.1 Blokovna shema regulacijskega sistema za stabilizacijo nihanj SG

Za opis dinamike sinhronskega generatorja, priključenega na omrežje toge napetosti in frekvence, večinoma uporabljamo Heffron-Philipsov model sinhronskega generatorja (H-P model) [3]. H-P model je normiran lineariziran model tretje stopnje in je izpeljan iz popolnega nelinearnega modela sinhronskega generatorja 7. stopnje. Vhodni spremenljivki H-P modela sta napetost vzbujalnega navitja in mehanski navor turbine, spremenljivke stanja pa kolesni kot, rotorska hitrost in prehodna inducirana napetost v q osi. Vse spremenljivke označujejo odstopanje (Δ) od vrednosti v obravnavani delovni točki.

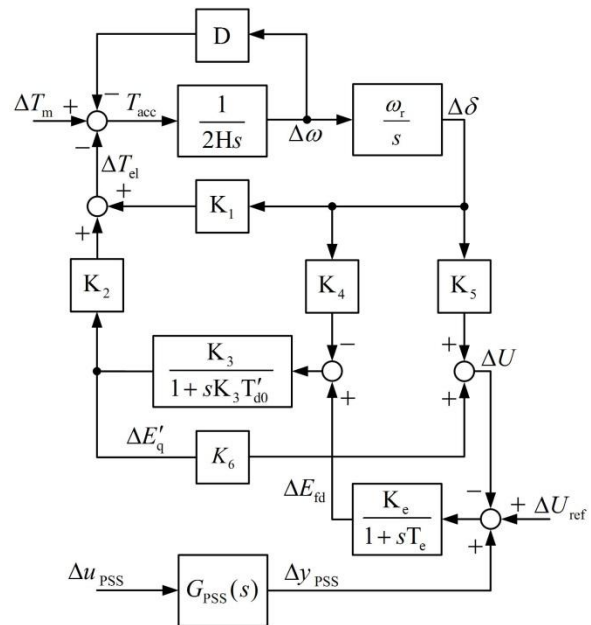
Kot vir vzbujalne napetosti uporabljamo v večini slovenskih elektrarn statične elektronske vzbujalne sisteme, opremljene z regulatorjem napetosti proporcionalne narave. Dinamiko vzbujalnega sistema z regulatorjem napetosti poenostavljeno opišemo s členom 1. reda:

$$\frac{\Delta E_{fd}(s)}{\Delta U_{ref}(s) - \Delta U(s)} = \frac{K_e}{1 + sT_e} \quad (1)$$

kjer imajo uporabljeni simboli naslednji pomen:

- E_{fd} - vzbujalna napetost [pu]
- U - napetost na sponkah statorja [pu]
- U_{ref} - referenčna statorska napetost [pu]
- K_e - ojačenje napetostnega regulatorja z vzbujalnikom
- T_e - časovna konstanta vzbujalnega sistema [s]
- s - kompleksna spremenljivka
- Δ - odstopanje od ravnotežnega stanja

Blokovni diagram lineariziranega modela sinhronskega generatorja, priključenega na togo omrežje in opremljenega z vzbujalnim sistemom z napetostno regulacijsko zanko, je prikazan na sliki 1:



Slika 1: Blokovna shema lineariziranega modela SG, priključenega na omrežje toge napetosti, z vzbujalnim sistemom, regulatorjem napetosti in stabilizatorjem [4]

Simboli na sliki 1 pomenijo:

- D - faktor dušenja [pu]
- E'_q - prehodna inducirana napetost v q-osi [pu]
- E_{fd} - vzbujalna napetost v d-osi [pu]
- H - vztrajnostna konstanta [J/VA]
- K_e - ojačenje proporcionalnega dela napetostnega regulatorja
- K_1 do K_6 - parametri lineariziranega modela SG
- ω_r - nazivna sinhronska krožna frekvenca SG [s^{-1}]
- T_m - mehanski navor turbine [pu]
- T_{el} - električni navor [pu]
- T_{acc} - pospeševalni navor [pu]
- T'_{d0} - prehodna časovna konstanta vzbujalnega navitja d-osi v praznem teku [s]

2.2 Značilnosti klasičnih stabilizatorjev

Klasični pristop k stabilizaciji sinhronskega generatorja temelji na uporabi vzbujalnega sistema, prek katerega stabilizator spreminja vzbujalno napetost generatorja in tako generira dodatno komponento električnega navora, ki je v fazi s spreminjanjem rotorske hitrosti generatorja. Tako stabilizator umetno poveča naravno dušenje generatorja (D).

V večini primerov opišemo stabilizator s prenosno funkcijo (2), povzeto po [4]:

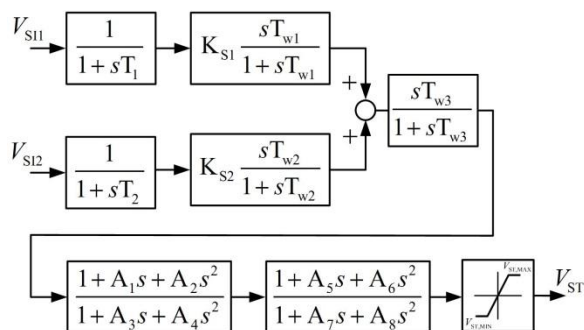
$$G_{PSS}(s) = \frac{\Delta y_{PSS}(s)}{\Delta u_{PSS}(s)} = K_{PSS} \left(\frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \right) \left(\frac{T_3 s + 1}{T_4 s + 1} \right) \left(\frac{T_w s}{T_w s + 1} \right) G_{aa}(s) \quad (2)$$

Uporabljeni simboli imajo naslednji pomen:

- K_{PSS} - ojačenje stabilizatorja
- $G_{aa}(s)$ - prenosna funkcija visokozapornega filtra
- Δu_{PSS} - vhod v stabilizator [pu]
- Δy_{PSS} - izhod iz stabilizatorja [pu]
- T_1 do T_4 - časovne konstante členov za dvig faze [s]
- T_w - časovna konstanta nizkozapornega filtra [s]

2.3 IEEE standard za vzbujalne sisteme

Združenje Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) je za poenoten razvoj in modeliranje vzbujalnih sistemov razvilo standard Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies IEEE Std. 421.5 [5], ki ga združenje nenehno dopolnjuje. Verzija iz leta 2005 predlaga štiri osnovne strukture stabilizatorjev, med katerimi je najpreprostejši PSS1A, ki meri le en vhodni signal (P , n ali f), stabilizatorji PSS2B, PSS3B in PSS4B pa pospeševalno moč računajo iz meritev delovne moči in frekvence ali vrtilne hitrosti. Na sliki 2 je PSS3B, ki je podoben stabilizatorjem v večini slovenskih elektrarn.



Slika 2: Blokovna shema PSS3B po IEEE standardu [5]

Vhodni signal V_{S11} predstavlja meritev električne moči, vhodni signal V_{S12} pa meritev frekvence na sponkah generatorja, iz katere stabilizator računa vrtilno hitrost.

Iz sprememb signalov teh veličin stabilizator izračuna pospeševalno moč, ki je hkrati razlika med mehansko in električno močjo. T_1 in T_2 sta časovni konstanti merilnih pretvornikov vhodnih veličin, T_{w1} do T_{w3} so časovne konstante vhodnih filtrov električne moči, izračunane kotne hitrosti in izračunane mehanske moči. Izhodni stabilizacijski signal V_{ST} izračunamo s pomočjo dveh filtrov drugega reda s parametri A_1 do A_8 , ojačenje nastavljammo s parametroma K_{S1} in K_{S2} . PSS2B in PSS4B delujeta podobno, le da imata različno zgrajene vhodne filtrske veje. Prvi uporablja za formiranje signala pospeševalne moči le eno filtrsko vejo (lead-lag filter) za celo frekvenčno območje, drugi pa ima tri veje vhodnih filtrov, od katerih ima vsaka več zaporednih členov. Vsak filter je optimiziran za svoje frekvenčno območje. Zato PSS4B bolje duši medsystemska nihanja [6], vendar je pri njem zaradi številnih filtrov bolj zapleteno nastavljanje parametrov v zagonskih preizkusih. V praksi časovne konstante in ojačenja nastavljammo z izbiro vnaprej pripravljenih vrednosti, zato se dogaja, da dušenje določenih frekvenc ni uspešno. Ravno to je ena od pomanjkljivosti klasičnih stabilizatorjev.

2.4 Napredni stabilizatorji nihanj

Klasični stabilizator nihanj SG dobro duši nihanja v bližini delovne točke, za katero so določeni parametri stabilizatorja. SG lahko obratujejo v širokem območju delovnih in jalovih moči. S časom se spreminja tudi topologija EES in s tem reaktanca omrežja. Oboje se odraža v obnašanju SG, ki je izrazito nelinearno. Z oddaljevanjem od obratovalne točke, za katero je bil določen stabilizator, lahko pride celo do škodljivega vpliva stabilizatorja na stabilno obratovanje. Rešitev so adaptivni stabilizatorji, ki prilagajajo svoje parametre spremenjenim razmeram v sistemu, in robustni stabilizatorji, ki so načrtovani tako, da zagotavljajo optimalno delovanje v okviru celotnega delovnega območja (npr. [6]).

3 STABILIZATORJI NIHANJ SINHRONSKIH GENERATORJEV SLOVENSKEGA EES

3.1 Pregled stanja na področju vzbujalnih sistemov

V slovenskih elektrarnah obratuje 65 agregatov, med katerimi ima večina statične vzbujalne sisteme, le trije starejši turbogeneratorji imajo rotacijske vzbujalnike. Pri starejših vzbujalnih sistemih še najdemo analogne napetostne regulatorje, novejši pa imajo digitalno napetostno regulacijo. Digitalni regulatorji so praviloma opremljeni s klasičnimi stabilizatorji elektromehanskih nihanj, predstavljenimi v poglavju 2. Stabilizatorji so običajno parametrirani v skladu s splošnimi tovarniškimi priporočili, nekateri pa so tudi dodatno uglašeni v okviru testiranja na objektu.

Opravili smo analizo stanja na tem področju, v kateri smo zbrali najpomembnejše podatke o posameznih

agregatih, tipih vzbujalnih sistemov, vrstah regulacije, stabilizatorjih in njihovem delovanju. Dobljeni podatki so zbrani v tabeli 1. Na nekaterih elektrarnah so stabilizatorji vključeni, druge jih ne uporabljajo, ker obratovalno osebje ne zaznava njihove koristnosti.

Tabela 1: Podatki o agregatih in vgrajenih stabilizatorjih (PSS) v slovenskem EES

	HE	TE	Skupaj
Število agregatov	51	14	65
Skupna nazivna moč (MVA)	1237	2343	3580
Skupna nazivna moč (MW)	973	1958	2931
Regulatorji napetosti in jalove moči			
Regulator U, tip P		1	1
Regulator U, tip PI	47	2	49
Regulator U, tip PID	4	4	8
Neznano		7	7
Regulator Q, tip P	3		3
Regulator Q, tip PI	46	2	48
Regulator Q, tip PID	2	3	5
Neznano		9	9
Obratovanje v regulaciji U	19	9	28
Obratovanje v regulaciji Q	32		32
Obratovanje v reg. U ali Q		5	5
Stabilizatorji nihanj	32	4	36
PSS 1A	3		3
PSS 3A	13	2	15
PSS 2B	13		13
PSS 3B	3		3
PSS 4B	0	2	2
PSS aktiven	15	3	18
PSS neaktiven	17	1	18

3.2 Tehnični podatki analiziranih agregatov

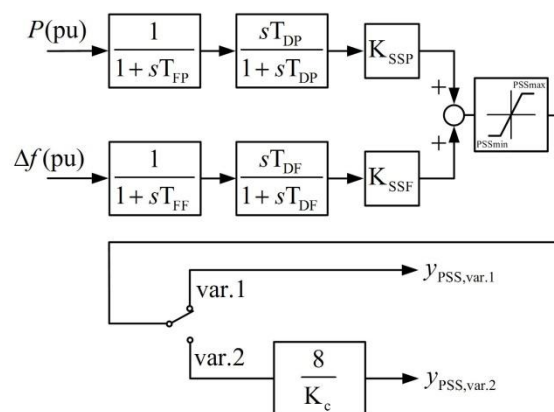
Na izbranih agregatih štirih hidroelektrarn na Savi smo podrobneje raziskali učinkovitost delovanja stabilizatorjev moči v dejanskih obratovalnih razmerah. Analizirali smo obratovanje v hidroelektrarnah Moste, Mavčiče, Medvode in Vrhovo. Zaradi čim manjšega vpliva na proizvodnjo energije je bil v raziskavo vključen le po en generator v vsaki elektrarni. Glavni podatki analiziranih agregatov so zbrani v tabeli 2. Izbrani generatorji se razlikujejo po konstrukcijskih značilnostih. Imajo različne vrtilne hitrosti: od 107 min^{-1} do 750 min^{-1} . HE Mavčiče ima agregata v blok stiku, v preostalih HE pa so generatorji priključeni na 6 kV zbiralnice in prek mrežnih transformatorjev na 110 kV omrežje. Prve tri elektrarne imajo vgrajene sodobne statične vzbujalne sisteme z digitalno regulacijo proizvajalca Končar. Vgrajeni so stabilizatorji elektromehanskih nihanj tipa PSS3A. HE Vrhovo ima cevne agregate s statičnimi vzbujalnimi sistemi. Regulatorji napetosti in stabilizatorji nihanj so analogni, vendar se zadnji ne uporabljajo, ker niso bili nikoli dokončno nastavljeni in preizkušeni.

Tabela 2: Tehnični podatki preizkušenih agregatov

Podatki o agregatih	Mo. 4	Mo. 1,2	Mav.	Med.	Vrh.
Št. agregatov	1	2	2	2	3
Moč SG (MVA)	11	9	25	13,5	14,3
Moč turbine (MW)	8	7,5	20	13	12
Naziv. napetost (kV)	6,3	6,3	10,5	6,3	6,3
Vrtilna hitrost (min^{-1})	750	500	150	214	107
Vzbujanje statično S	S	S	S	S	S
Regulator U	PI	PI	PI	PI	PI
Regulator Q	PI	PI	PI	PI	PI
Aktivna regulacija	U	U	U	Q	Q
Tip PSS	3A	3A	3A	3A	n.p.
PSS aktiven	ne	ne	da	da	ne

3.3 Vgrajeni stabilizatorji nihanj

Na sliki 3 je prikazana blokovna shema implementiranih stabilizatorjev Končar [7]. Vhodna signala v stabilizator sta oddana delovna moč in frekvenca napetosti na statorskih sponkah. Oba vhodna kanala stabilizatorja imata enako zgradbo, toda različne parametre.



Slika 3: Blokovna shema stabilizatorja nihanj Končar [7]

Simboli na sliki 3 pomenijo:

- T_{FP} - časovna konstanta filtra signala moči
- T_{DP} - časovna konstanta vezja za fazni pomik signala moči (lead-lag)
- T_{FF} - časovna konstanta filtra signala frekvenca
- T_{DF} - časovna konstanta filtra za fazni pomik signala frekvenca (lead-lag)
- K_{SSP} , K_{SSF} - ojačenje kanala moči, frekvenca
- K_c - ojačenje napetostnega regulatorja
- $y_{PSS, var.1}$ - signal PSS uveden v regulacijski krog pred regulatorjem napetosti
- $y_{PSS, var.2}$ - signal PSS uveden v regulacijski krog za regulatorjem napetosti

4 IZVEDBA MERITEV IN POSTAVITEV MERIL ZA OCENO DELOVANJA STABILIZATORJEV

4.1 Merilni sistem

Delovanje stabilizatorjev smo analizirali na podlagi meritev delovne moči, vrtilne hitrosti, napetosti generatorja in vzbujaalne napetosti. Izbrane veličine smo zajemali in registrirali z analogno digitalnim pretvornikom National Instruments NI USB6009 [8], ki je meritve pošiljal v osebni računalnik, tam pa so se procesirale z virtualnim instrumentom v okolju LabView. Virtualni instrument je omogočil filtriranje šuma, prikaz surovih in filtriranih vrednosti na virtualnem osciloskopu ter zapis v datoteko .txt. Signali so bili vzorčeni s časom vzorčenja 6 ms. V posamezni delovni točki je snemanje trajalo do 30 s. Na sliki 4 je primer posnetka meritev P , U in n v izbrani delovni točki. Merilo x osi je v ms.

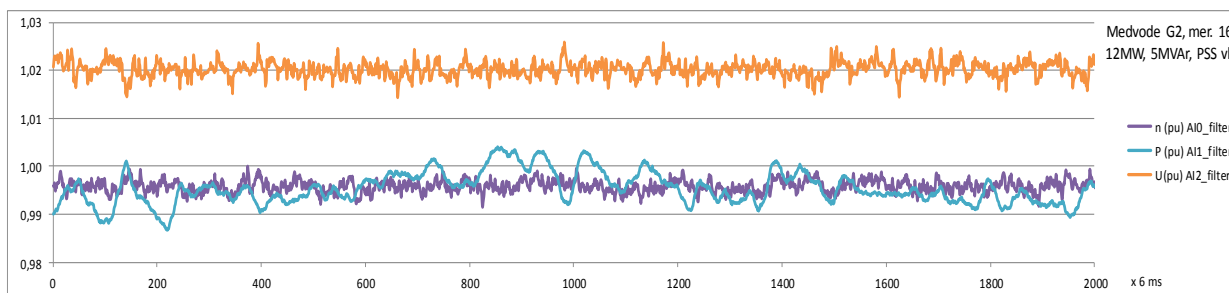
4.2 Izbor obratovalnih stanj agregatov

Nihanja moči so lahko tudi posledica lokalnih oscilacij med agregati. Zaradi zagotavljanja podobnih obratovalnih razmer v vseh elektrarnah sta v času meritev vedno obratovala dva agregata. Hkrati smo s sosednjim agregatom izravnavali odstopanje moči

merjenega agregata od proizvodnega načrta. Meritve posameznih agregatov so bile opravljene v osmih delovnih točkah, pri čemer smo delovno moč spreminjali v korakih po $0,25 P_n$ od $0,25$ p.u. do 1 p.u. Vsako izbrano vrednost moči smo kombinirali z dvema vrednostma induktivne jalove moči: manjšo in večjo. Manjša jalova moč je bila izbrana med $0,1$ in $0,2 P_n$, ker se nismo želeli približevati meji stabilnosti v kapacitivnem območju, večja pa tako, da pri P_n ni bila presežena S_n generatorja. Jalove moči smo izbrali tako tudi glede na najpogostejši režim obratovanja. V vsaki točki je bilo preizkušeno obratovanje z izključenim in z vključenim stabilizatorjem. Na vsakem stroju je bilo opravljenih 16 meritev.

4.3 Analiza frekvenčnega spektra oscilacij moči

Vse posnetke delovne moči smo analizirali z diskretno Fourierjevo transformacijo (DFT), da bi ugotovili lastne frekvence posameznih generatorjev. Nihanja moči ležijo med $1,5$ do 2 Hz. Nekateri rezultati rahlo izstopajo, v posameznih primerih pa je nihanje močneje izraženo pri več frekvencah. Rezultati frekvenčne analize so podani z grafi, ki prikazujejo nihanja moči v izbrani delovni točki generatorja pri vključenem in izključenem PSS.



Slika 4: Posnetek meritve napetosti na sponkah generatorja, delovne moči in vrtiljavev (v tem vrstnem redu od zgoraj navzdol)

4.4 Merila za oceno delovanja stabilizatorjev

Intenzivnost oscilacij smo ugotavljali kot razliko med največjo in najmanjšo vrednostjo posamezne merjene veličine v primerjavi z njeno nazivno vrednostjo. Intenzivnost oscilacij delovne moči smo računali po obrazcu (3):

$$\Delta P = \frac{P_{i \max} - P_{i \min}}{P_n} \quad (3)$$

Pri tem pomenijo:

ΔP - intenzivnost oscilacij delovne moči [pu]
 $P_{i \max}$, $P_{i \min}$ - maksimalne in minimalne vrednosti električne moči v tem merjenem intervalu [pu]
 P_n - nazivna delovna moč agregata [pu]

Na podoben način so bile obdelane tudi preostale veličine (U , n , U_f).

Relativno znižanje amplitude oscilacij zaradi delovanja PSS smo označili kot faktor dušenja D_{PSS} . Izračunan je iz razmerja med intenzivnostjo oscilacij delovne moči ΔP pri obratovanju s PSS in obratovanju brez PSS (4):

$$D_{PSS} = \frac{\Delta P_{PSS}}{\Delta P_{\text{brez PSS}}} \quad (4)$$

Pri tem pomenijo:

ΔP_{PSS} - intenzivnost oscilacij delovne moči generatorja ob vključenem stabilizatorju [pu]
 $\Delta P_{\text{brez PSS}}$ - intenzivnost oscilacij delovne moči generatorja ob izključenem stabilizatorju [pu]

S pomočjo rezultatov meritev smo želeli ugotoviti kakovost delovanja stabilizatorjev nihanj sinhronskih generatorjev. V literaturi nismo zasledili meril, s katerimi bi bilo mogoče primerjalno oceniti njihovo delovanje. Na podlagi analize merilnih rezultatov smo ugotovili, da stabilizator v posameznih delovnih točkah amplitude nihanj prepolovi, v nekaterih točkah pa jih celo podvoji. Ker mora generator obratovati v širokem območju delovne in jalove moči, je stabilizator lahko v nekem delu koristen, drugje pa škodljiv. Za ovrednotenje učinkovitosti delovanja stabilizatorjev smo razvili metodo, ki temelji na uporabi treh odločitvenih kriterijev. Vsak analiziran stabilizator je dobil v vsakem obratovalnem stanju tri binarne ocene (0 ali 1), ki povedo, kako učinkovit je stabilizator v obravnavanem obratovalnem stanju.

Odgovoriti smo želeli na vprašanja:

1. Ali je zaradi uporabe stabilizatorja intenzivnost nihanj v obravnavanem obratovalnem stanju manjša kot tedaj, ko je stabilizator izklopljen (ocena 1) ali večja (ocena 0)?

2. Ali je zaradi uporabe stabilizatorja intenzivnost nihanj v obravnavanem obratovalnem stanju manjša od korigiranega povprečnega zmanjšanja nihanj v celotnem delovnem območju, kjer stabilizator zmanjšuje intenzivnost nihanj (ocena 1) ali večja (ocena 0)?

3. Ali je tedaj, ko stabilizator v določeni delovni točki poveča intenzivnost oscilacij glede na oscilacije v tej delovni točki brez stabilizatorja, povečanje oscilacij zaradi uporabe PSS v obravnavanem obratovalnem stanju večje od predpisane mejne intenzivnosti oscilacij (ocena 0), ali pa je to povečanje oscilacij manjše od predpisane meje oscilacij (ocena 1)?

Navedena merila predstavimo s tremi neenačbami. S prvo ugotavljamo ali stabilizator v i -tem odčitku meritve v posamezni delovni točki duši ali povečuje amplitudo nihanja (5).

$$D_{PSSi} \leq 1 \quad (5)$$

Ta kriterij ni vedno izpolnjen na celotnem obratovalnem območju.

Drugi kriterij je namenjen ovrednotenju stopnje enakomernosti dušenja stabilizatorja v celotnem delovnem območju. V ta namen izračunamo povprečni faktor dušenja D_{sr+} , ki je povprečje faktorjev dušenja stabilizatorja v obratovalnih točkah, kjer je D_{PSS} manjši od 1:

$$D_{sr+} = \frac{\sum_{i=1}^n D_{PSSi}}{n} \quad \text{za } D_{PSSi} < 1 \quad (6)$$

Drugi kriterij predpisuje neenačba 7:

$$D_{PSSi} \leq D_{sr+} \quad (7)$$

D_{sr+} je v bistvu korekcijski faktor, ki ga uporabimo tudi v tretjem kriteriju.

Tretji kriterij je pomemben v delovnih točkah, v katerih prvi kriterij ni izpolnjen, to je v območju, ko zaradi uporabe stabilizatorja agregat izkazuje večja nihanja, kot bi bila brez uporabe stabilizatorja. Ugotoviti želimo, ali so ta nihanja še dopustna ali ne. V ta namen z meritvami ugotovimo največje nihanje agregata brez stabilizatorja. Od stabilizatorja pričakujemo, da zaradi njegove uporabe v nobeni delovni točki nihanja ne bodo prevelika. Dovoljeno mejo oscilacij predpišemo na podlagi največje izmerjene vrednosti oscilacij nestabiliziranega agregata, korigirane s povprečnim faktorjem dušenja D_{sr+} (6). Izpolnitev tako postavljenega kriterija zagotavlja relativno varno delovanje regulacijskega sistema (neenačba 8).

$$\Delta P_{PSSi} \leq D_{sr+} \Delta P_{\max \text{ brez PSS}} \quad (8)$$

Če tretji kriterij v neki delovni točki ni izpolnjen, to pomeni, da je intenzivnost oscilacij ob vključenem stabilizatorju večja, kot je korigirano največje izmerjeno nihanje brez stabilizatorja v kateri koli delovni točki.

Če je v vsaki obratovalni točki izpolnjen vsaj eden od kriterijev, je obratovanje stabilizatorja sprejemljivo, v nasprotnem primeru pa je bolje, da je izključen, saj v nekem delovnem območju povečuje oscilacije moči. Če v neki obratovalni točki nista izpolnjena prva dva kriterija, je dovoljeno obratovanje stabilizatorja ob izpolnjevanju tretjega. S tem se izognemo selektivnemu izključevanju stabilizatorja v posamezni delovni točki, če je nad in pod njo njegovo delovanje sprejemljivo.

5 REZULTATI IN ANALIZA MERITEV

5.1 Dušenje nihanj delovne moči

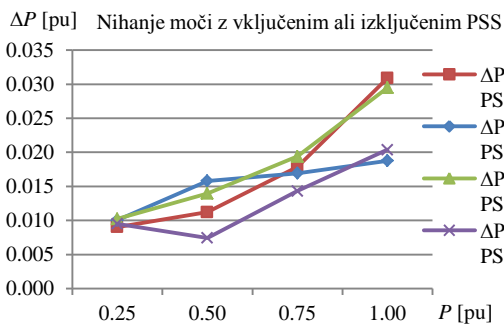
Meritve vseh agregatov so bile analizirane na opisani način, v članku pa so prikazani le rezultati meritev agregata 2 v HE Medvode. Rezultati meritev na preostalih agregatih so na voljo v [9]. V tabeli 3 so za vsako obratovalno točko (kombinacijo P in Q) paroma prikazani rezultati za izključen in vključen stabilizator. Prikazane so intenzivnosti nihanj delovne moči. Vrednosti so podane kot relativna vrednost nazivne moči (p_u). Če je D_{PSS} nižji od 1, govorimo o pozitivnem učinku stabilizatorja, medtem ko razmerje nad 1 pomeni, da uporaba stabilizatorja povečuje nihanja. Delovne točke, kjer stabilizator deluje slabo, so v tabeli osenčene. Na desni strani je ocena njegovega delovanja. Logična enka pomeni izpolnjen, ničla pa neizpolnjen pogoj.

Tabela 3: Rezultati meritev na generatorju 2 v HE Medvode

$P_n = 12,5 \text{ MW}$ $S_n = 13,5 \text{ MVA}$			$\Delta P_{\max} = 0,031$	$D_{sr+} = 0,74$	Merila sprejemljivosti delovanja PSS			
P MW	Q MVA _r	PSS	ΔP_{\max} pu	D_{PSS}	D_{PSS+}	$D_{PSS} < 1$	$D_{PSS} < D_{sr+}$	$\Delta P < D_{sr+} \cdot P_{\max}$
3	1,5	izk	0,009					
3	1,5	vk	0,010	1,11		0	0	1
3	5	izk	0,010					
3	5	vk	0,009	0,93	0,93	1	0	1
6	1,5	izk	0,011					
6	1,5	vk	0,016	1,41		0	0	1
6	5	izk	0,014					
6	5	vk	0,007	0,53	0,53	1	1	1
10	1,5	izk	0,018					
10	1,5	vk	0,017	0,95	0,95	1	0	1
10	5	izk	0,019					
10	5	vk	0,014	0,74	0,74	1	1	1
12	1,5	izk	0,031					
12	1,5	vk	0,019	0,61	0,61	1	1	1
12	5	izk	0,029					
12	5	vk	0,020	0,69	0,69	1	1	1

Kljub negativnemu učinku stabilizatorja nihanje v dveh obratovalnih točkah ocenjujemo njegovo delovanje kot sprejemljivo na celem obratovalnem področju, ker je v vsaki obratovalni točki izpolnjen vsaj eden od treh pogojev. Povedano drugače: v točkah kjer stabilizator povečuje nihanja, ta ne presegajo največjih izmerjenih nedešenih.

Na sliki 5 so rezultati prikazani grafično. Pri majhni jalovi moči in pod $0,5 P_n$ stabilizator povečuje nihanja. Pri večji delovni moči se pokaže pozitiven učinek stabilizatorja, ki je večinoma učinkovitejši pri večji jalovi moči. Iz posnetkov sklepamo, da PSS na tem agregatu izboljšuje delovanje pri večjih obremenitvah.

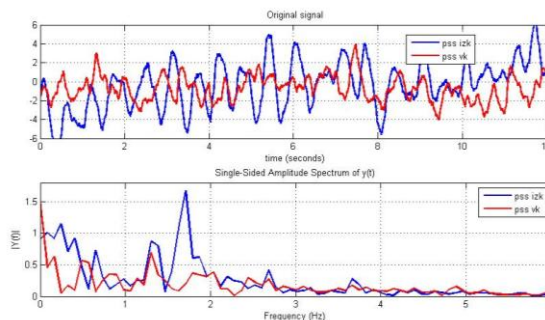


Slika 5: HE Medvode, G2, nihanje moči v odvisnosti od obremenitve

5.2 Frekvenčna analiza

Opravili smo frekvenčno analizo vseh posnetih meritev. Iz grafov, izrisanih s programom MATLAB, je bila kot srednja vrednost odčitkov v vseh obratovalnih točkah ocenjena frekvenca 1,8 Hz. Na sliki 6 je primer dobrega

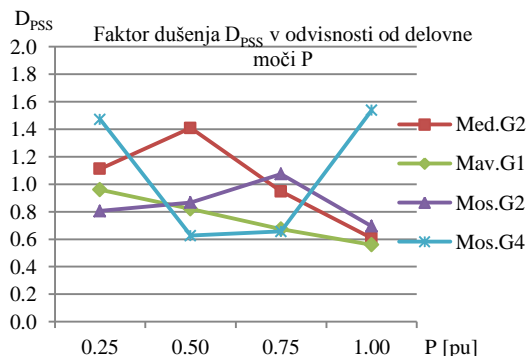
delovanja PSS pri večji delovni in manjši jalovi moči. Zgornji graf prikazuje nihanje moči v merjenem intervalu, spodnji pa frekvenčni spekter. Amplituda nihanj je ob vključenem PSS manjša zlasti v okolici lastne frekvence. Glede na obratovanje brez PSS je močnejše dušeno nihanje v okolici lastne frekvence. Merilo y osi pomeni odstopanje od nastavljene moči v % P_n .



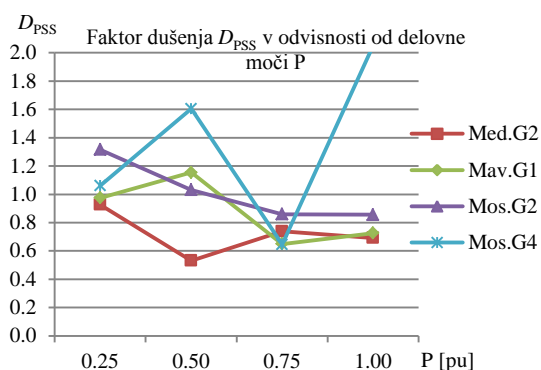
Slika 6: HE Medvode, G 2, $P=12 \text{ MW}$, $Q=1,5 \text{ MVA}_r$

5.3 Povzetek rezultatov meritev na preostalih agregatih

Obnašanje stabilizatorjev preostalih generatorjev lahko primerjamo na grafih na slikah 7 in 8, kjer so prikazani faktorji dušenja za vse merjene agregate v odvisnosti od delovne obremenitve, kombinirane z manjšo ali večjo jalovo močjo. Stabilizatorja na generatorju 2 (G2) v HE Medvode in G1 v HE Mavčiče delujeta dobro pri večjih delovnih močeh, pri manjših pa sta manj učinkovita. Bolje delujeta pri večji jalovi moči. Podobno deluje stabilizator na G2 v HE Moste, ki dobro duši oscilacije pri večji delovni moči, pri manjši pa le v kombinaciji z manjšo jalovo močjo. Pri G4 v HE Moste ugotavljamo, da je delovanje PSS učinkovito le v okolici $0,75 P_n$.



Slika 7: Učinkovitost stabilizatorjev pri manjši jalovi moči



Slika 8: Učinkovitost stabilizatorjev pri večji jalovi moči

Za popolnejšo sliko delovanja stabilizatorjev bi bilo treba preizkusiti še druge generatorje. Kot zanimivost naj omenimo, da so meritve pokazale, da ima G3 v HE Vrhovo brez stabilizatorja manjšo intenzivnost oscilacij, kot nekateri agregati z vključenim stabilizatorjem.

Frekvenca izmerjenih oscilacij je pri vseh agregatih med 1,5 in 2 Hz, kar je značilno za lokalna nihanja.

6 SKLEP

Elektroenergetski sistem je kompleksen in nelinearen dinamični sistem. Za dušenje njegovih elektromehanskih nihanj se zaradi preprostejšje izvedbe in sinteze uporabljajo linearni stabilizatorji. Ti ne morejo zagotavljati optimalnega dušenja nelinearnega elektroenergetskega sistema v celotnem delovnem območju. Pregled uporabe stabilizatorjev v slovenskem elektroenergetskem sistemu je potrdil domnevo o omejeni učinkovitosti linearnih stabilizatorjev. V slovenskem sistemu je 65 agregatov. Med njimi je 36 opremljenih s klasičnimi stabilizatorji, samo 18 stabilizatorjev pa je aktivnih. Meritve na štirih elektrarnah so pokazale, da v nekaterih primerih klasični linearni stabilizatorji celo poslabšajo dinamične lastnosti sistema, zato je veliko stabilizatorjev neaktivnih. Glede na način delovanja EES bi bil smiseln razvoj adaptivnih stabilizatorjev, ki bi svoje parametre prilagajali spremembam dinamičnih lastnosti sistema.

LITERATURA

- [1] Prabha Kundur: Power System Stability and Control, EP RI Editors Neal J. Balu, Mark G. Lauby, 1993 McGraw-Hill, Inc.
- [2] Charles P. Steinmetz: Power Control and Stability of Electric Generating Stations, 56th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers, White Sulphur Springs, W. Va., July 1920.
- [3] Francisco P. Demello, Charles Concordia: Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 4, April 1969.
- [4] J. Ritonja: Izboljšanje dinamične stabilnosti sinhronskega generatorja s pomočjo adaptivnega modelno referenčnega vodenja, doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, 1996

- [5] IEEE: Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies IEEE Std. 421.5-2005.
- [6] Z. Tečec: Samopodesivi stabilizator elektroenergetskog sustava zasnovan na neizravitom modelu, doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, 2010.
- [7] Končar: HE Mavčiče, agregat 1 in 2, Vzbujačni sistem, Digitalni regulator napetosti tip DRN, Funkcijski opis, LA 7319 1 in 2; Zagreb, 2011.
- [8] National Instruments Corporation: NI USB 6008/ 6009 User Guide and Specifications, 371303L-01, 2008;
- [9] M. Dušak: Analiza delovanja stabilizatorjev EES, magistrsko delo, Univerza v Mariboru, 2013.

Jožef Ritonja je diplomiral leta 1986, magistriral leta 1989 in doktoriral leta 1997 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko Univerze v Mariboru, kjer je tudi zaposlen. Raziskovalno in pedagoško je aktiven na področjih: teorija vodenja, modeliranje in vodenje elektroenergetskih sistemov, električni stroji in avtomatizacija.

Mitja Dušak je diplomiral leta 2007 na Fakulteti za elektrotehniko univerze v Ljubljani in magistriral leta 2013 na Fakulteti za energetiko Univerze v Mariboru. Zaposlen je v Savskih elektrarnah Ljubljana, kjer se ukvarja s problematiko obratovanja.