

Regulacijski sistemi sinhronskih generatorjev

Jožef RITONJA, Boštjan POLAJŽER

Izvleček: Članek opisuje osnovne značilnosti delovanja elektroenergetskih sistemov. Celovito in sistematično so predstavljeni regulacijski sistemi sinhronskih generatorjev, katerih naloga je v vseh točkah elektroenergetskega sistema zagotoviti sinusno napetost predpisane frekvence in amplitude. Predstavljeni so: primarni in sekundarni del regulacijskega sistema za regulacijo frekvence in delovne moči, regulacijski sistem za regulacijo napetosti in jalove moči ter regulacijski sistem za stabilizacijo elektromehanskih nihanj.

Ključne besede: elektroenergetski sistem, sinhronski generator, regulacija frekvence, regulacija napetosti, stabilizator nihanj sinhronskega generatorja

■ 1 Uvod

Naloga elektroenergetskih sistemov je zanesljivo in gospodarno zagotavljanje predpisane električne energije njihovim porabnikom. Elektroenergetske sisteme tvorijo proizvajalci, prenosni sistemi in odjemalci električne energije. Razvoj trifaznih izmeničnih elektroenergetskih sistemov je neposredno povezan z odkritji na področju večfaznih strojev, ki jih je patentiral Nikola Tesla leta 1888. Prvi izmenični elektroenergetski sistem v Evropi je bil narejen leta 1891 za potrebe elektrotehnične razstave v Frankfurtu. V naslednjih letih so se elektroenergetski sistemi začeli intenzivno razvijati in povezovati. Za izpolnjevanje osnovnega cilja – zanesljivega in gospodarnega zagotavljanja predpisane električne energije odjemalcem – je potrebno poleg ustreznega obsega elektroenergetskega sistema zagotoviti tudi regulacijske sisteme, ki zagotavljajo v vseh točkah elektroenergetskega sistema napetost sinusne oblike s predpisano amplitudo in frekvenco. Za zagotavljanje takšne napeto-

sti je potrebno ravnatežje proizvodnje in porabe električne energije. Spreminjanje porabe v elektroenergetskem sistemu ima v primeru neusklažene proizvodnje električne energije za posledico spreminjanje napetostnih parametrov.

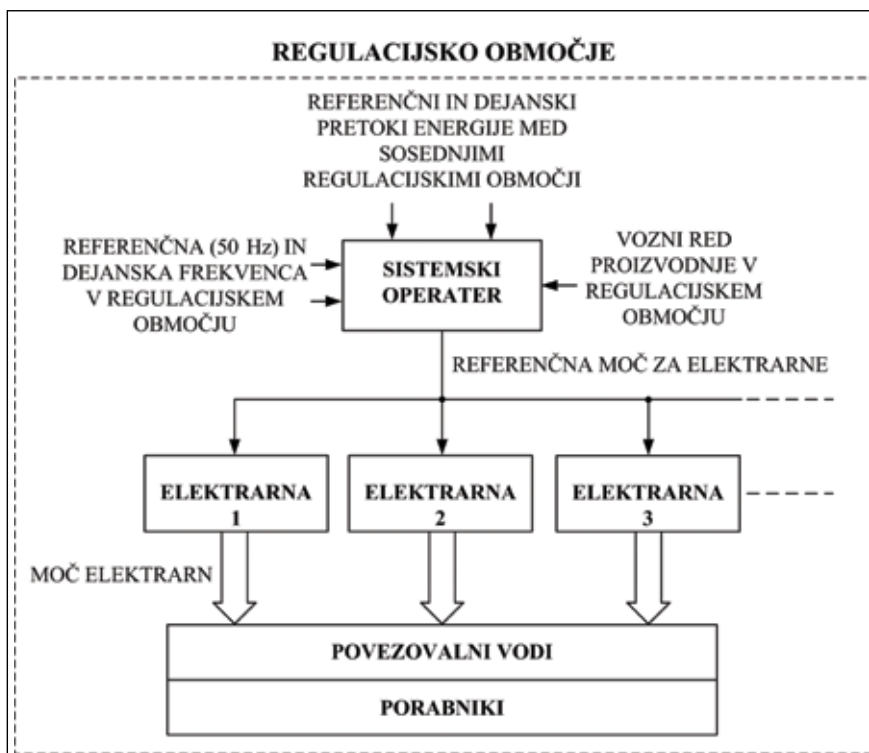
Večino električne energije v elektroenergetskih sistemih proizvedejo sinhronski generatorji. Za proizvodnjo potrebne električne energije morajo ti delovati z ustrežno močjo. Za analitične namene moč generatorjev razstavimo v dve komponenti: v delovno moč in v jalovo moč. S spreminjanjem delovne moči sinhronskih generatorjev vplivamo na frekvenco električnih veličin elektroenergetskega sistema, s spreminjanjem jalove moči sinhronskih generatorjev pa vplivamo na amplitudo napetosti elektroenergetskega sistema. V hipotetičnem stacionarnem stanju je frekvenca električnih veličin v vseh točkah elektroenergetskega sistema enaka, nasprotno pa je amplituda napetosti v posameznih točkah elektroenergetskega sistema lahko različna. Frekvenca celotnega elektroenergetskega sistema in napetosti v vseh točkah elektroenergetskega sistema morajo biti v okviru predpisanih dinamičnih in stacionarnih mej. To dosežemo s spreminjanjem delovne in jalove moči, s katero delujejo sinhronski

generatorji. Delovno moč sinhronskih generatorjev spreminjamo z vodenjem vrtilnega momenta pogonskega stroja (največkrat turbinna), ki poganja sinhronski generator. Jalovo moč sinhronskih generatorjev pa spreminjamo z ustreznim vodenjem toka, ki ga skozi vzbujalno rotorsko navitje sinhronskega generatorja vsili vzbujalni sistem (večinoma tranzistorski ali tiristorski usmernik). Za ustrezno vodenje pogonskega vrtilnega momenta in rotorske vzbujalne napetosti potrebujemo dva ločena regulacijska sistema, s pomočjo katerih zagotavljamo pravilno delovanje sinhronskega generatorja v elektroenergetskem omrežju. V članku bosta oba regulacijska sistema podrobneje predstavljena.

■ 2 Regulacijski sistemi sinhronskih generatorjev v elektroenergetskem sistemu

Elektroenergetski sistem sestavljajo posamezna regulacijska območja, ki lahko sovpadajo z državnimi mejami, lahko pa tvorijo posamezno regulacijsko območje več držav ali pa je v okviru ene države več regulacijskih območij. Za pravilno delovanje sinhronskih generatorjev v posameznih regulacijskih območjih so odgovorni regionalni

Prof. dr. Jožef Ritonja, univ. dipl. inž., Boštjan Polajžer, univ. dipl. inž., oba Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko



Slika 1. Blokovna shema regulacijskega območja elektroenergetskega sistema

operaterji prenosnih omrežij v regulacijskih območjih, krajše imenovani tudi sistemski operaterji (ang. TSO – Transmission System Operator). V evropskem prostoru so sistemski operaterji povezani v Evropsko združenje operaterjev prenosnih omrežij (ang. ENTSO-E – European Network of Transmission System Operators for Electricity). Združenje koordinira aktivnosti 41 sistemskih operaterjev prenosnih omrežij v 34 evropskih državah (podatek za leto 2014). Letna proizvodnja električne energije omrežij v združenju je leta 2012 znašala 3370 TWh (za primerjavo: letna slovenska poraba znaša približno 14 TWh). Shema regulacijskega območja elektroenergetskega sistema s sistemskim operaterjem in s proizvodnimi enotami (elektrarnami) je prikazana na *sliki 1*.

Za pravilno delovanje sinhronskih generatorjev v elektroenergetskem sistemu skrbi množica regulacijskih sistemov. Najpomembnejše lahko uvrstimo v tri skupine:

- regulacijski sistemi za regulacijo frekvence in delovne moči (ang. LFC – Load-frequency control ali AGC – Automatic generation control, v nadaljevanju krajše:

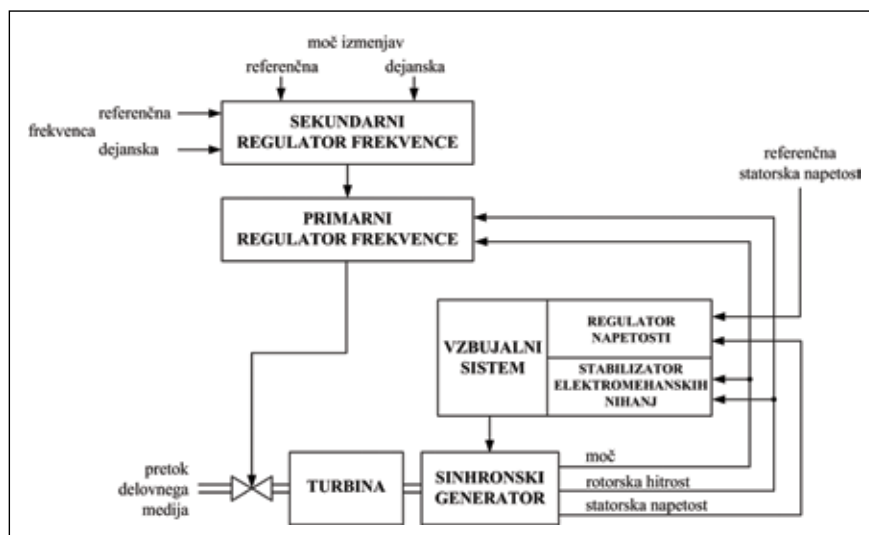
regulacijski sistemi za regulacijo frekvence),

- regulacijski sistemi za regulacijo napetosti in jalove moči (ang. AVR – Automatic voltage regulator, v nadaljevanju krajše: regulacijski sistemi za regulacijo napetosti),
- regulacijski sistemi za stabilizacijo elektromehanskih nihanj.

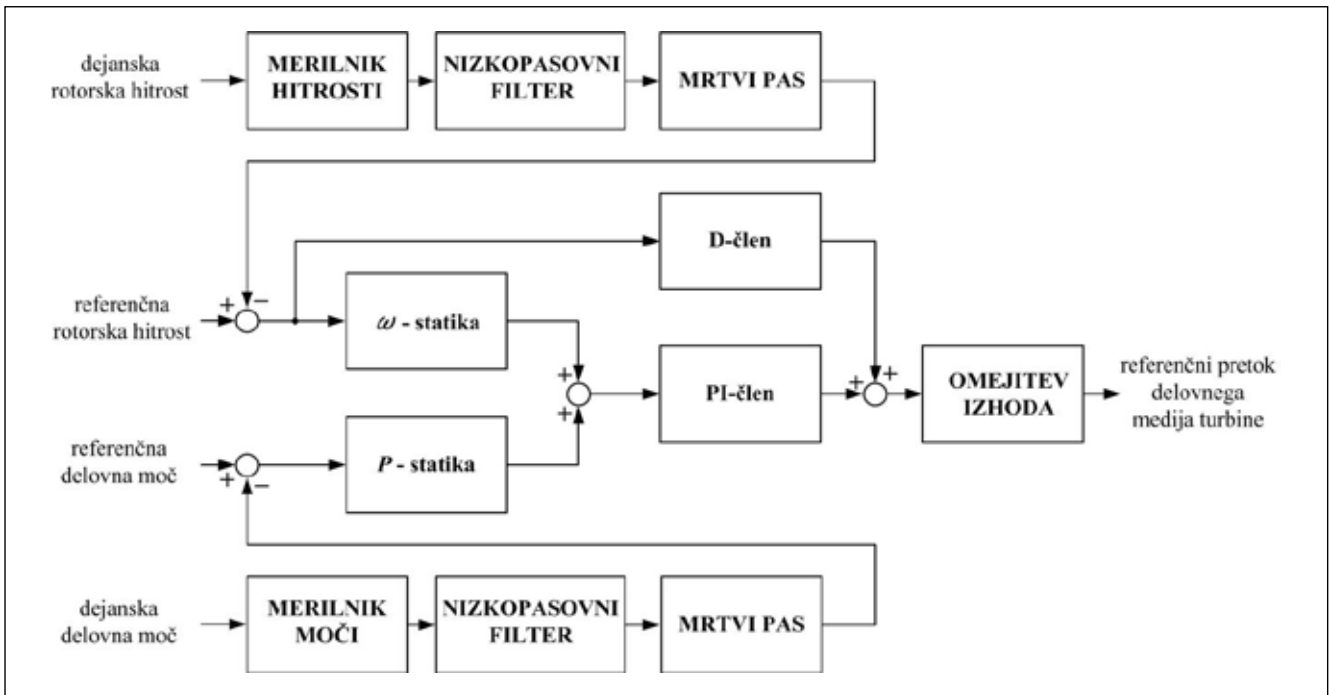
Regulacijski sistemi za regulacijo frekvence delujejo na dveh nivojih. Na osnovnem nivoju morajo vsi sinhronski generatorji v elektroener-

getskem sistemu sodelovati v regulaciji frekvence tako, da v primeru upada frekvence elektroenergetskega sistema povečajo delovno moč in v primeru dviga frekvence zmanjšajo delovno moč. V ta namen so vsi sinhronski generatorji opremljeni z lokalnimi regulatorji, ki na osnovi meritve delovne moči in rotorske hitrosti sinhronskega generatorja ustrezno vodijo vrtilni moment pripadajočih pogonskih strojev. Te regulacijske zanke imenujemo primarna regulacija frekvence in so realizirane za vsak generator v okviru pripadajočega turbinskega regulatorja. Primarna regulacija frekvence ne zagotavlja stacionarne točnosti frekvence elektroenergetskega sistema. Za zagotavljanje stacionarne točnosti elektroenergetskega sistema morajo sistemski operaterji v svojih regulacijskih območjih izvajati nadrejeno regulacijsko zanko, ki jo imenujemo sekundarna regulacija frekvence. V ta namen vsak sistemski operater s svojim sekundarnim regulatorjem na osnovi meritve frekvence elektroenergetskega sistema in meritve moči izmenjav med sosednjimi regulacijskimi območji ustrezno vodi proizvodnjo enega ali več izbranih sinhronskih generatorjev lastnega regulacijskega območja.

Za vzdrževanje amplitude napetosti celotnega elektroenergetskega sistema v okviru predpisanih meja morajo biti vsi sinhronski generatorji opremljeni z regulacijskimi sistemi



Slika 2. Blokovni diagram regulacijskih sistemov sinhronskega generatorja



Slika 3. Blokovni diagram primarne regulacije frekvence

za regulacijo napetosti, ki na osnovi primerjave merjene statorske napetosti z želeno vrednostjo napetosti ustrezno krmilijo polprevodnike usmernika vzbujalnega sistema.

Za zagotavljanje stabilnega delovanja elektroenergetskega sistema in za povečanje dušenja elektromehanskih nihanj sinhronskih generatorjev skrbijo regulacijski sistemi za stabilizacijo elektromehanskih nihanj. V ta namen so nekateri sinhronski generatorji opremljeni s stabilizatorji nihanj sinhronskih generatorjev, ki izkoriščajo merilni del regulacijskih sistemov za regulacijo frekvence in izvršni člen merilnega dela regulacijskega sistema za regulacijo napetosti. Stabilizatorji nihanj sinhronskih generatorjev so realizirani v sklopu regulacijskih sistemov za regulacijo napetosti.

Blokovni diagram regulacijskih sistemov, namenjenih pravilnemu delovanju sinhronskih generatorjev v okviru elektroenergetskega sistema, je prikazan na *sliki 2*.

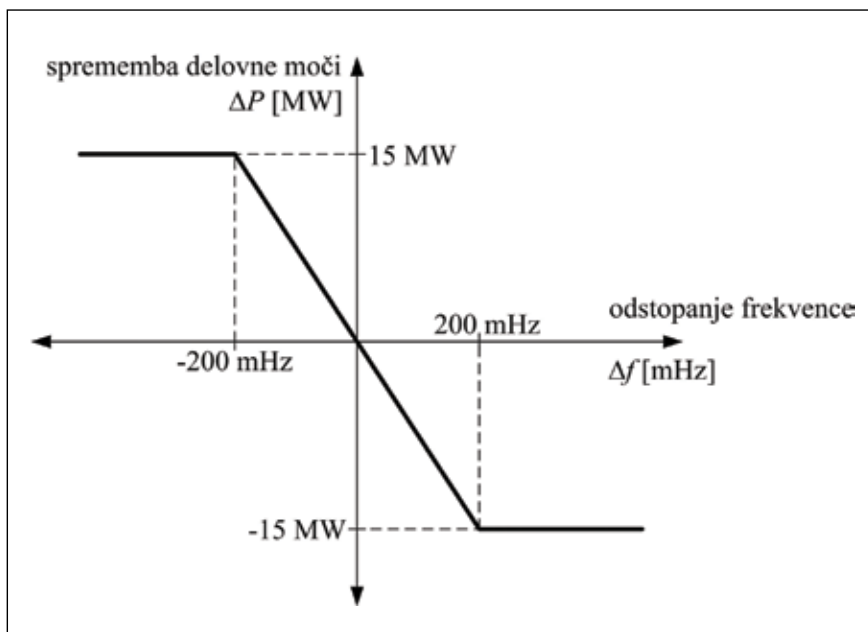
2.1 Regulacijski sistem za regulacijo frekvence

Na spreminjanje frekvence v elektroenergetskem sistemu vpliva

neravnotežje med proizvodnjo in porabo električne energije v elektroenergetskem sistemu. Deficit delovne moči bi imel za posledico upad frekvence, suficit pa porast frekvence elektroenergetskega sistema. Naloga regulacijskih sistemov za regulacijo frekvence je torej vzdrževanje ravnotežja oz. prilagajanje moči proizvodnje trenutni porabi. Vsako neravnotežje v delovni moči proizvodnje in porabe je vidno v odstopanju frekvence elektroenergetskega sistema. Po navodilih operaterjev prenosnih omrežij morajo biti vsi sinhronski generatorji, priključeni na prenosna omrežja, opremljeni s primarnimi regulatorji frekvence. Primarni regulatorji frekvence so realizirani v okviru turbinskih regulatorjev sinhronskih generatorjev, večinoma s pomočjo univerzalnih industrijskih izvedb pomnilniško programirljivih krmilnikov. Zaradi decentraliziranega vodenja posamezni primarni regulatorji frekvence ne smejo težiti k ničelnemu stacionarnemu odstopanju dejanske frekvence od referenčne vrednosti, saj je (bilo) na vseh sinhronskih generatorjih v elektroenergetskem sistemu tehnično težko zagotoviti popolnoma enake referenčne vrednosti frekvence in absolutno natančne meritve frekvence. Zato na nivoju primarne

regulacije frekvence, ki jo morajo izvajati vsi sinhronski generatorji v elektroenergetskem sistemu, dopuščamo stacionarno odstopanje med referenčno in dejansko vrednostjo frekvence. Obstajajo različne regulacijske strukture, ki izpolnjujejo opisane zahteve [1], [2], [3]. Blokovni diagram modernih izvedb primarnih regulatorjev frekvence, uporabljen v večini novejših turbinskih regulatorjev, je prikazan na *sliki 3*.

Regulator frekvence sinhronskega generatorja na osnovi podanih referenčnih vrednosti in izmerjenih dejanskih vrednosti delovne moči in frekvence izračuna za sinhronski generator potreben vrtilni moment in s pomočjo aktivatorja (ventil) ustrezno nastavi izvršni člen (turbino). V regulacijskem sistemu uporabljeni regulator ima PI značaj z dodatno možnostjo diferenciatorskega kanala. Kljub uporabljenemu integralskemu delu takšen regulacijski sistem dopušča stacionarno odstopanje regulirane frekvence. Povezavo med stacionarnima vrednostima odstopanja frekvence in posledično spremembe proizvodnje delovne moči za slovenski elektroenergetski sistem prikazuje *slika 4*. Iz nje je vidno potrebno povečanje (oz. zmanjšanje) delovne moči sinhronskih generatorjev



Slika 4. Statična karakteristika primarne regulacije frekvence

slovenskega elektroenergetskega sistema v primeru zmanjšanja (oz. povečanja) frekvence elektroenergetskega sistema. Sliko 4 imenujemo tudi statična karakteristika primarne regulacije frekvence.

V primeru nazivne frekvence v elektroenergetskem sistemu bodo sinhronski generatorji delovali z delovno močjo, enako predpisani referenčni vrednosti. Z odstopanjem frekvence pa se bo oddana delovna moč v sistem kljub nespremenjeni referenčni moči spreminjala skladno z nastavljenimi statičnimi karakteristiki. Negativno inverzno vrednost gradienta statične karakteristike imenujemo statika primarne regulacije frekvence. Označimo jo s [%] in izračunamo z enačbo:

$$s[\%] = \frac{\Delta f[\%]}{\Delta P[\%]} 100[\%] \quad (1)$$

V kateri $\Delta f[\%]$ označuje odstopanje frekvence elektroenergetskega sistema in $\Delta P[\%]$ spremembo delovne moči sinhronskega generatorja v stacionarnem stanju zaradi vpliva primarne regulacije frekvence generatorja. Statika $s[\%]$ označuje spremembo frekvence v procentih, pri kateri bi primarna regulacija frekvence povzročila 100-odstotno spremembo delovne moči. Po zaslugi primarne regulacije frekvence bo v primeru pojava ne-

ravnotežja proizvodnje in porabe delovne moči in s tem povezanim odstopanjem frekvence v elektroenergetskem sistemu vsak sinhronski generator v sistemu v skladu z nastavljenimi statičnimi karakteristiki pomagal pri vzpostavitvi ravnotežja delovne moči. Zaradi delovanja primarne regulacije frekvence regulacijski sistem sinhronskega generatorja v primeru odstopanja frekvence ne bo več zagotavljal, da bo oddana delovna moč enaka referenčni vrednosti delovne moči, ampak se bo oddana delovna moč spreminjala tako, da bo generator ustrezno sodeloval pri vzdrževanju referenčne vrednosti frekvence elektroenergetskega sistema.

V združenju ENTSO-E vsako leto določijo za posamezna regulacijska območja potreben obseg delovne moči, ki ga morajo zagotavljati regulacijska območja v okviru izvajanja primarne regulacije frekvence. Izračun rezerve delovne moči za izvajanje primarne regulacije frekvence celotnega elektroenergetskega sistema izhaja iz predpostavke, da izpad proizvodne enote z močjo 3000 MW (tj. $\Delta P = -3000$ MW) v elektroenergetskem sistemu ENTSO-E ne bo povzročil upada frekvence, ki bi bil večji kot 200 mHz (tj. $\Delta f = -200$ mHz). To pomeni, da se mora pri upadu frekvence za 200 mHz aktivirati primarna regulacija v ob-

segu 3000 MW. Parameter, ki definira zahtevano delovanje primarne regulacije frekvence v celotnem elektroenergetskem sistemu, imenujemo regulacijska energija elektroenergetskega sistema in označimo ter izračunamo z enačbo:

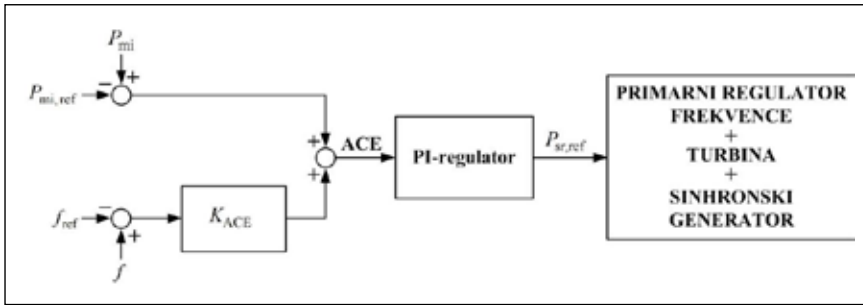
$$\lambda_{\text{EES}} = \frac{\Delta P}{\Delta f} \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right] \quad (2)$$

Obseg rezerve delovne moči za izvajanje primarne regulacije frekvence za posamezna regulacijska območja izračunamo iz zahtevane rezerve celotnega elektroenergetskega sistema ob upoštevanju razmerja proizvodnje regulacijskega območja in skupne proizvodnje vseh regulacijskih območij elektroenergetskega sistema. Za leto 2012 je bila za primarno regulacijo frekvence slovenskega elektroenergetskega sistema predpisana rezerva v okviru proizvodnje delovne moči 15 MW, ki bi jo morali primarni regulatorji frekvence v proizvodnih enotah slovenskega elektroenergetskega sistema ustrezno zagotoviti v primeru kvazistacionarnega odstopanja frekvence 200 mHz. Pri upadu frekvence za 200 mHz bi proizvodne enote morale povečati skupno proizvodnjo za 15 MW, pri dvigu frekvence za 200 mHz pa zmanjšati skupno proizvodnjo za 15 MW. Iz predpisanih vrednosti lahko izračunamo potrebno regulacijsko energijo slovenskega regulacijskega območja:

$$\lambda_{\text{SI}} = \frac{\Delta P}{\Delta f} = \frac{-15 \text{ MW}}{-0,2 \text{ Hz}} = 75 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \quad (3)$$

Na osnovi predpisanih zahtev ENTSO-E za regulacijska območja izhajajo zahteve, ki jih za posamezne proizvodne enote v regulacijskih območjih predpišejo operaterji prenosnih omrežij regulacijskih območij. Na ta način določene vrednosti statik posameznih sinhronskih generatorjev znašajo od 4 % do 8 %.

Primarna regulacija frekvence ima proporcionalni značaj in ne zagotavlja stacionarne točnosti frekvence v elektroenergetskem sistemu. Za zagotovitev stacionarne točnosti



Slika 5. Blokveni diagram sekundarne regulacije frekvence

frekvence v elektroenergetskem sistemu uporabimo nadrejeno sekundarno regulacijo frekvence. Ta ne regulira samo frekvence elektroenergetskega sistema, ampak tudi sintetično veličino, imenovano odstopanje regulacijskega območja (ang. ACE – Area Control Error). Odstopanje regulacijskega območja ACE izračunamo z enačbo:

$$ACE = P_{mi} - P_{mi,ref} + K_{ACE} (f - f_{ref}) \quad (4)$$

MW

v kateri P_{mi} in $P_{mi,ref}$ označujeta dejansko in referenčno moč izmenjav med obravnavanim regulacijskim območjem in sosednjimi regulacijskimi območji, f in f_{ref} označujeta dejansko in referenčno vrednost frekvence elektroenergetskega sistema in K_{ACE} predstavlja regulacijski koeficient za sekundarno regulacijo frekvence.

Od sekundarne regulacije frekvence pričakujemo, da bo v stacionarnem stanju aktivna samo v regulacijskem območju, kjer je nastala razlika med proizvodnjo in porabo delovne moči. Če izberemo vrednost parametra K_{ACE} enako vrednosti regulacijske energije regulacijskega območja, dosežemo, da bo v primeru, ko bo nastopil izpad proizvodnje delovne moči v enem regulacijskem območju in s tem povezan upad frekvence v celotnem elektroener-

getskem sistemu, prišlo do kvazistacionarne spremembe vrednosti ACE samo v regulacijskem območju, kjer je prišlo do izpada proizvodnje delovne moči. V sosednjih regulacijskih območjih, kjer ni prišlo do izpada proizvodnje delovne moči, pa bo v kvazistacionarnem stanju ostala vrednost ACE enaka 0, saj bo vsa dodatna delovna moč, proizvedena zaradi upada frekvence s pomočjo primarne regulacije frekvence v regulacijskem območju, prenesena preko povezav med regulacijskimi območji v regulacijsko območje z neravnotežjem med proizvodnjo in porabo delovne moči. Sekundarna regulacija frekvence bo tako aktivna samo v regulacijskem območju, kjer je prišlo do neravnotežja med proizvodnjo in porabo delovne moči, medtem ko bo primarna regulacija aktivna v vseh regulacijskih območjih elektroenergetskega sistema. Pri izbiri vrednosti parametra K_{ACE} dodatno upoštevamo samoregulacijo bremen in proizvodnje. V letu 2012 je bila za slovenski elektroenergetski sistem tako izbrana vrednost

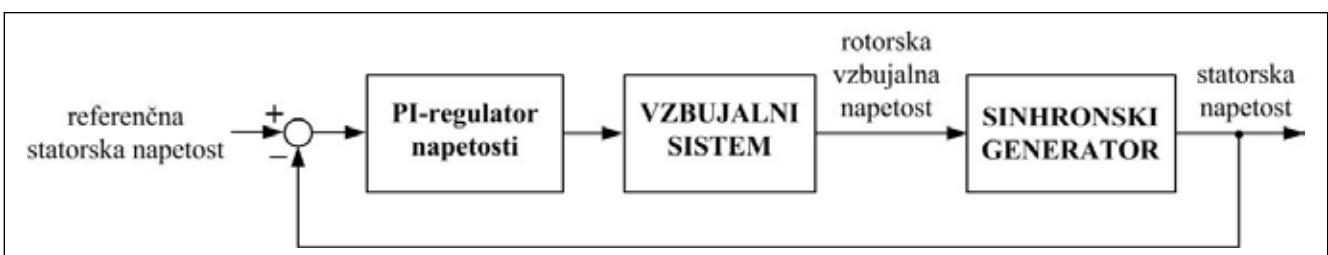
$$K_{ACE} = 136 \frac{\text{MW}}{\text{Hz}}$$

Sekundarno regulacijo frekvence na nivoju posameznih regulacijskih območij izvaja centralni regulator, za katerega delovanje skrbi operater

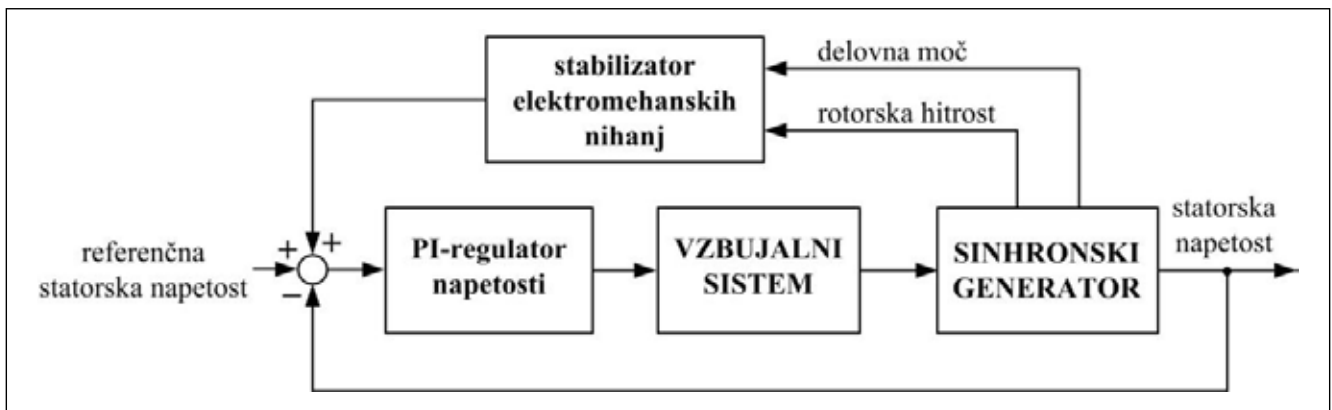
prenosnega omrežja. Sekundarni regulator vpliva samo na posamezne, izbrane sinhronske generatorje v sistemu. Blokveni diagram sekundarne regulacije frekvence je prikazan na sliki 5, kjer $P_{sr,ref}$ označuje referenčno moč za sinhronske generatorje, ki sodelujejo v sekundarni regulaciji frekvence.

2.2 Regulacijski sistem za regulacijo napetosti

Regulacija napetosti elektroenergetskega sistema je neposredno odvisna od tega, s kakšno jalovo močjo delujejo sinhronski generatorji. Ti lahko v omrežju delujejo kot elementi z induktivnim ali s kapacitivnim značajem oz. v skladu z definicijo lahko delujejo kot proizvajalci ali kot porabniki jalove moči. Tako predstavljajo sinhronski generatorji temeljne elemente za regulacijo napetosti. Na proizvodnost jalove moči sinhronskih generatorjev vpliva regulacijski sistem za regulacijo napetosti s spreminjanjem vzbujačnega toka rotorskega navitja. Za kvalitetno, zanesljivo in gospodarno delovanje elektroenergetskega sistema mora regulacijski sistem za regulacijo napetosti zagotavljati predpisano napetost v vseh točkah elektroenergetskega sistema, vzdrževati in povečevati stabilnost sistema in minimizirati jalove moči in s tem zmanjševati izgube v sistemu. Problemi, povezani z regulacijo napetosti in s stabilnostjo elektroenergetskih sistemov, so bili znani že v zgodnji fazi razvoja elektroenergetskih sistemov in so bili pogojeni s šibkimi elektroenergetskimi sistemi z dolgimi povezovalnimi vodi. Predvsem v zadnjih 40 letih pa ima regulacija napetosti v povezavi s stabilnostjo elektroenergetskih sistemov še posebej pomembno



Slika 6. Blokveni diagram sistema za regulacijo napetosti



Slika 7. Blokovni diagram regulacijskega sistema za stabilizacijo elektromehanskih nihanj

vlogo, predvsem v visoko razvitih in močno obremenjenih elektroenergetskih sistemih. Napetostna nestabilnost je bila razlog za veliko razpadov elektroenergetskih sistemov (New York 1970, Florida 1982, Francija 1978 in 1987, Švedska 1983, Japonska 1987, ...).

Regulacijski sistem za regulacijo napetosti elektroenergetskega sistema je decentraliziran. V skladu z navodili operaterja prenosnega omrežja morajo biti vse proizvodne enote v sistemu opremljene z regulatorjem napetosti in sposobne za obratovanje v regulaciji napetosti z nastavitvami v skladu s tehničnimi zmoglostmi in z zahtevami sistemskega operaterja. *Slika 6* prikazuje blokovni diagram regulacijskega sistema za regulacijo napetosti sinhronskega generatorja.

2.3 Regulacijski sistem za stabilizacijo elektromehanskih nihanj

Prehodni pojavi, ki so posledica spreminjanja obremenitev sinhronskih generatorjev, so brez ustreznega regulacijskega sistema za stabilizacijo elektromehanskih nihanj zelo slabo dušeni. Osnovni razlog, da se sinhronski generatorji na motnje odzovejo z oscilatornimi prehodnimi pojavi je njihova konstrukcijska zasnova in iz nje izhajajoč fizikalni princip delovanja. Zato so sinhronski generatorji v sinhronem delovanju že v osnovi zelo slabo dušeni dinamični sistemi. Dodatni razlog za poslabšanje dinamičnih lastnosti sinhronskih generatorjev so njihovi

regulacijski sistemi, namenjeni vzdrževanju stacionarnih vrednosti električnih veličin, ki jih predpisuje sistemski operater (predvsem regulacijski sistem za regulacijo napetosti). Elektromehanska nihanja sinhronskih generatorjev so vidna predvsem kot nihanja v delovni moči in kolesnem kotu sinhronskega generatorja, manj pa v hitrosti rotorja, frekvenci statorske napetosti, amplitudi statorske napetosti in jalovi moči sinhronskega generatorja [4]. Glede na topološke značilnosti elektroenergetskega sistema razdelimo nihanja v:

- medsistemska nihanja, največkrat v frekvenčnem območju od 0,2 do 0,5 Hz,
- nihanja (enega) sinhronskega generatorja proti (relativno močnemu) omrežju – naravne načine, ki pripadajo ustreznim lastnim vrednostim dinamičnega modela, imenujemo lokalni naravni načini, njihove frekvence običajno segajo od 0,8 do 1,8 Hz.

Poleg zgoraj omenjenih nihanj se v šibko povezanih sistemih pojavljajo elektromehanska nihanja med posameznimi generatorji znotraj sistema, ki pa jih lahko v večini primerov obravnavamo podobno kot lokalne naravne načine. V okviru elektrarn pa se dodatno pojavljajo tudi:

- nihanja med posameznimi generatorji, ki so večinoma posledica neustreznih nastavitvev parametrov regulacijskih sistemov posameznih generatorjev (največkrat v frekvenčnem območju od 1,5 do 2,5 Hz) in
- torzijska nihanja gredi za povezavo turbine in generatorja (večinoma

ma v frekvenčnem območju od 10 do 50 Hz).

Osnovni element za stabilizacijo elektromehanskih nihanj sinhronskih generatorjev v elektroenergetskem sistemu je stabilizator nihanj sinhronskega generatorja, za katerega je uveljavljena angleška kratica PSS (power system stabilizer). PSS na osnovi meritve dostopnih fizikalnih veličin sinhronskega generatorja (rotorske hitrosti, oddane moči) določa stabilizacijski signal, ki ga vodimo na vходу regulacijskega sistema za regulacijo napetosti (prištevamo k referenčni vrednosti statorske napetosti). PSS tako preko vzbujalnega sistema spreminja vzbujalno napetost generatorja in na ta način ustvari dodatno komponento električnega navora, ki je v fazi s spreminjanjem rotorske hitrosti generatorja. Na ta način PSS »umetno« (preko vodenja) poveča »naravno« dušenje sinhronskega generatorja, ki je posledica tokov v dušilnih navitjih in mehanskega viskozne trenja. Blokovni diagram regulacijskega sistema za stabilizacijo elektromehanskih nihanj je prikazan na *sliki 7*.

Stabilizator nihanj sinhronskega generatorja sestavljajo tri komponente:

- en ali več serijsko vezanih členov za dvig faze z ustreznim ojačanjem, s pomočjo katerih stabilizator kompenzira fazno zakasnitev vzbujalnega sistema. Pomembna je učinkovita kompenzacija predvsem v stabilnostno problematičnem frekvenčnem pasu;
- nizkozaporni filter, ki služi za izločitev enosmerne komponente

merjenega signala. Nizkozaporni filter daje stabilizatorju diferenciatorski značaj, kar mu omogoča, da je aktiven samo v času nihanj oz. da reagira samo na spremi-njanje merjenega signala;

- visokozaporni filter, ki služi za dušenje signalov visokih frekvenc, običajno nad 3,5 Hz (šum, torzija nihanja).

Stabilizator nihanj sinhronskega generatorja opisuje prenosna funkcija:

$$G_{PSS}(s) = \frac{Y_{PSS}(s)}{U_{PSS}(s)} = k_{PSS} \left(\frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1} \right) \left(\frac{T_3 s + 1}{T_4 s + 1} \right) \left(\frac{T_5 s + 1}{T_6 s + 1} \right) \left(\frac{T_w s}{T_w s + 1} \right) G_{aa}(s) \quad (5)$$

kjer $U_{PSS}(s)$ in $Y_{PSS}(s)$ označujeta vhod in izhod stabilizatorja, k_{PSS} je ojačanje stabilizatorja, $T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, \dots$ so časovne konstante členov za dvig faze, T_w je časovna konstanta nizkozapornega filtra in $G_{aa}(s)$ prenosna funkcija visokozapornega filtra.

Sinteza stabilizatorja nihanj sinhronskega generatorja predstavlja najzahtevnejšo regulacijsko nalogo v okviru regulacijskih sistemov za vodenje sinhronskih generatorjev. Določitev parametrov prenosne funkcije stabilizatorja je zaradi nelinearnosti regulacijskega objekta zelo zahtevna in zamudna. V veliko primerih se sintezi izognejo tako, da uporabijo tovarniško nastavljene parametre stabilizatorja. Ti parametri večinoma ne zagotavljajo

želenega dušenja sinhronskega generatorja, v nekaterih primerih pa sploh nimajo vpliva na dušenje nihanj generatorja ali pa dušenje celo zmanjšajo. Zato se v elektroenergetskem sistemu pogosto uporabi stabilizatorja izogibajo in v obratovanju nastala nihanja velikokrat dopuščajo. Seveda pa je v primeru, ko so ta nihanja amplitudno prevelika ali pa vodijo v nestabilnost sistema, uporaba stabilizatorja nihanj sinhronskega generatorja neizogibna.

■ 3 Zaključek

Sinhronski generatorji, ki sinhrono obratujejo v elektroenergetskem sistemu, morajo delovati v skladu z zahtevami, ki jih postavlja sistemski operater, ki jim je omogočil vključitev v omrežje. Za izpolnitev predpisanih zahtev sinhronski generatorji potrebujejo kompleksni regulacijski sistem, ki ga lahko zaradi večje preglednosti in enostavnejšega načrtovanja in sinteze razdelimo v tri delne regulacijske sisteme: regulacijski sistem za regulacijo frekvence in delovne moči, regulacijski sistem za regulacijo napetosti in jalove moči in regulacijski sistem za stabilizacijo elektromehanskih nihanj. Prva dva regulacijska sistema sta nujna za izpolnjevanje pogojev sistema operaterja. Z regulacijskotehničnega vidika je za načrtovanje in sintezo najtežavnejši tretji regulacijski sistem. Zaradi njegove tehnične zahtevnosti se

upravljavci v elektrarnah velikokrat izognejo njegovi implementaciji, kar ima za posledico slabše dinamične lastnosti agregatov in s tem tudi poslabšanje dušenja in stabilnosti celotnega elektroenergetskega sistema. Načrtovanje, sinteza in realizacija regulacijskih sistemov za stabilizacijo elektromehanskih nihanj so največji izziv strokovnjakov s področja regulacijske tehnike.

Vsi trije regulacijski sistemi so povezani in delujejo soodvisno. Za načrtovanje, sintezo in realizacijo kateregakoli od regulacijskih sistemov sinhronskega generatorja je potrebno podrobno poznavanje vseh treh regulacijskih sistemov. Samo na ta način lahko preprečimo negativen vpliv neprimerno realiziranih sistemov.

Viri

- [1] Andreson, P. M., Fouad, A. A.: Power system control and stability, *The Iowa State University Press*, Iowa, 1977.
- [2] Bergen, A. R.: Power system analysis, *Prentice Hall*, New Jersey, 1986.
- [3] Kundur, P.: Power system stability and control, *Mc-Graw-Hill Inc.*, New York, 1994.
- [4] Machowsky, J., Bialek, J. W., Bumby, J. R.: Power system dynamics, stability and control, *Wiley*, Chichester, 2008.

Control systems for synchronous generators

Abstract: The paper describes the basic operating characteristics of power systems. Comprehensive and systematic presentation is given for control systems of synchronous generators, whose main task is to provide sinusoidal voltage of specified frequency and amplitude in the complete power system. Featured are: the primary and secondary load frequency control, the voltage and reactive power control system and the control system for stabilization of electromechanical oscillations.

Keywords: power system, synchronous generator, load-frequency control, voltage control, power system stabilizer