

Grupna regulacija pobude i reaktivnih snaga u elektrani

Jasna Dragosavac, Žarko Janda, Tomislav Gajić, Sava Dobričić, Jelena Pavlović, Dušan Arnautović¹,

¹ Elektrotehnicki institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija
Jasna.dragosavac@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je prikazan uređaj za grupnu regulaciju pobude i reaktivnih snaga u termoelektrani. U radu su prvo obrazloženi potreba i opravdanost uvođenja ovakvih uređaja na elektrane. Opisane su funkcije uređaja za grupnu regulaciju pobude i reaktivnih snaga u elektrani, zatim je data teorijska osnova razvoja uređaja. Postignute performanse uređaja ilustrovane su nizom odziva tokova reaktivnih snaga i napona sabirnica nakon ugradnje uređaja u najveću termoelektranu u Srbiji, TE „Nikola tesla A“.

Ključne reči: termoelektrana, naponsko-reaktivna regulacija, grupna regulacija pobude i reaktivnih snaga

1. Uvod

U cilju prevazilaženja nedostataka ručnog upravljanja naponima i reaktivnim snagama, razvijeni su sistemi za automatsko upravljanje naponima u elektroenergetskim sistemima (EES) sa namerom da se unaprede sigurnost, smanje gubici i olakša proces upravljanja EES [1]-[5]. Automatizacijom upravljanja naponima i reaktivnim snagama na nivou sistema predviđeno je da dispečer prenosne mreže postavi vrednosti napona u određenim čvorovima sistema i da se reaktivne snage generatora koji utiču na napone posmatranih čvorova postave automatski na potrebne vrednosti. Na ovaj način se eliminiše kašnjenje zbog učešća operatera u izvršenju komandi dispečera prenosne mreže. Ukoliko se i raspodela reaktivnog opterećenja među generatorima vrši koordinisano prema željenoj optimizacionoj funkciji, postiže se koordinisana naponsko-reaktivna regulacija.

U uslovima deregulisanog tržišta javlja se snažna tendencija da EES radi na gornjoj granici svog kapaciteta u pokušaju da se kupcu ponudi povećana sigurnost, propusna moć, kvalitet i bolja cena električne energije, što zahteva razvoj novih strategija u upravljanju EES generalno, pa i u upravljanju naponima i reaktivnim snagama. Donosi se nova zakonska regulativa koja striktno definiše uloge i obaveze svih učesnika tržišta. Optimalno i sigurno upravljanje EES se potiskuje pred upravljanjem u skladu sa zahtevima tržišta (dan unapred/sat unapred) i operator sistema ima na raspolaganju znatno manja sredstava i vremena da sistemom upravlja prema tehničkim i ekonomskim parametrima. Elektrane su definisane kao proizvođači električne energije koji prodaju aktivnu snagu na priključcima elektrane na mrežu (visokonaponske (VN) sabirnice) i obavezne su da održavaju napon na krajevima generatora unutar striktno određenih granica i na taj način obezbeđuju naponsku podršku EES. Naponska regulacija je u zakonskoj regulativi prepoznata kao sistemska (pomoćna) usluga. Tržište električnom energijom u sadašnjim i budućim okvirima nameće nove zahteve svim učesnicima [6]-[7] i zahteva da proizvođačke i prenosne kompanije zajedno razvijaju nove metode za optimizaciju iskorišćenja reaktivnog kapaciteta (mogućnosti) generatora. Ovi zahtevi obično su definisani u preporukama regulatornih tela i obuhvataju: *i*) precizno određivanje limita u podpobuđenoj zoni pogonske karte sinhronog generatora uzimajući u obzir kriterijume stabilnosti i termička ograničenja; *ii*) obezbeđivanje raspoloživosti punog reaktivnog opsega u svakoj radnoj tački u uslovima normalnih i havarijskih vrednosti napona u mreži; *iii*) generatori treba da rade sa faktorom snage od 0,9 induktivno do 0,95 kapacitivno i da održavaju napon na krajevima generatora u opsegu od 0,95 do 1,05 nominalne vrednosti.

Automatizacija upravljanja naponima i reaktivnim snagama na nivou EES daje mogućnosti za realizaciju ovakvih preporuka. Njome se postiže unapređenje nivoa radnih margina sistema (opteretljivost sistema), kvaliteta i sigurnosti napajanja. Međutim realizacija ovakvih sistema je veoma skupa i zahteva razradu vrlo sofisticiranih kontrolnih algoritama na različitim nivoima i u različitim delovima EES.

2. Koordinisana naponsko reaktivna regulacija na nivou elektrane

Koordinisana naponsko reaktivna regulacija na nivou elektrane je sa stanovišta troškova vrlo efikasan način za ispunjavanje prethodnih zahteva i što je veoma bitno, nezavisna od stepena automatizacije u ostalim delovima i nivoima EES (decentralizovan pristup). Koordinisana regulacija reaktivnih snaga i napona unutar elektrane obuhvata održavanje napona VN sabirnica prema definisanoj naponsko-reaktivnoj (Q-V) karakteristici elektrane i/ili održavanje injektiranje reaktivne snage u EES prema zahtevu dispečera

prenosnog sistema uz preraspodelu reaktivne snage između generatora u skladu sa dozvoljenim reaktivnim opsegom svakog generatora.

Koordinisana naponsko reaktivna regulacija na nivou elektrane treba da vrši raspodelu zahtevane reaktivne snage među generatorima u elektrani (koju je do sada obavljao dispečer elektrane) u skladu sa definisanim ekonomskim ili tehničkim kriterijumom, proporcionalno nominalnoj snazi generatora, margini reaktivne snage generatora, faktoru snage, itd. [9] na potpuno koordinisan način. Uniformna preraspodela reaktivne snage Q između generatora u elektrani doprinosi:

- minimizaciji gubitaka u generatoru usled reaktivne komponente struje;
- uniformnom starenju generatora;
- boljoj naponskoj podršci sistemu pri sporim promenama napona i
- boljoj tranzijentnoj reaktivnoj podršci pri različitim poremećajima u EES.

U nekim Evropskim zemljama automatsko upravljanje naponima u sistemu je ostvareno kroz implementaciju hijerarhijske strukture koja se sastoji od primarnog, sekundarnog i tercijarnog nivoa između kojih mora da postoji vremenska i prostorna dekompozicija, slika 1, tabela 1.

Ako se primenjuje kao deo sistema hijerarhijskog upravljanja naponima u sistemu, automatska naponsko-reaktivna regulacija na nivou elektrane treba da se ukloni između primarne i sekundarne naponske regulacije i da bude pažljivo koordinisana sa oba nivoa da bi se izbegla interferencija sa bilo kojim nivoom. Kod ovakvih primena ulaz koordinisanog naponsko reaktivnog regulatora treba da bude direktno vezan na izlaz sistema koji vrši sekundarnu regulaciju napona. Ako se primenjuje kao nezavisan uređaj, kontrola reaktivne snage mora biti pod direktnim nadzorom regulatora napona sabirnica, da bi se obezbedilo održavanje napona sabirnica.

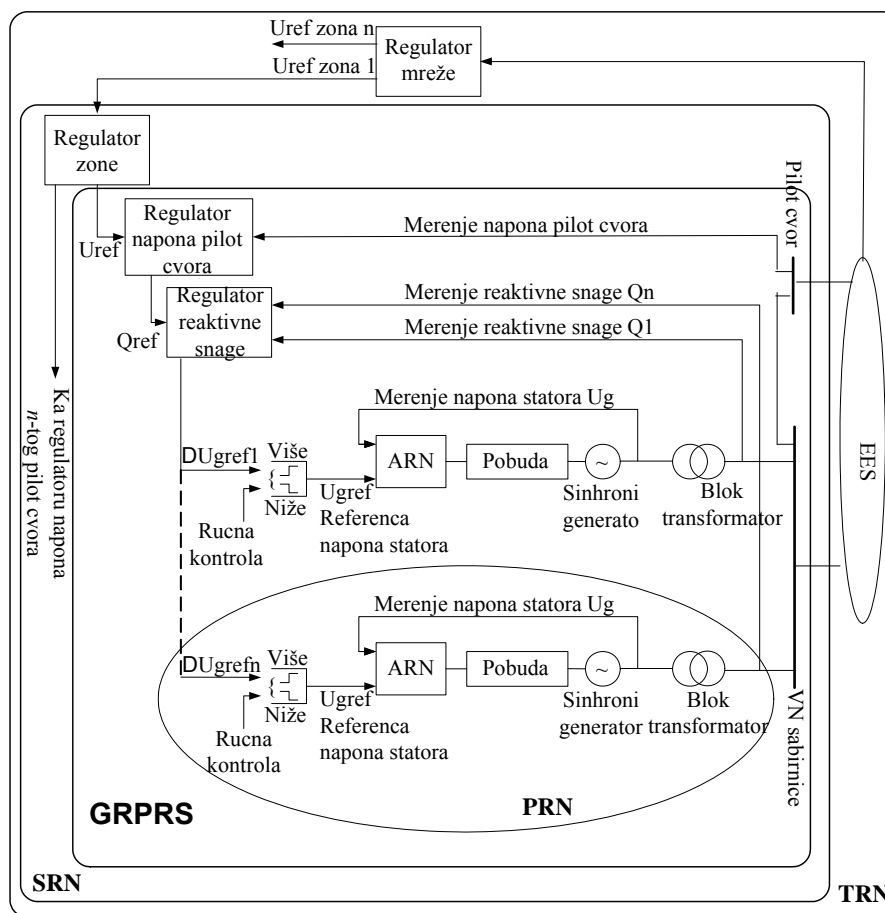
2.1. Funkcije grupnog regulatora pobude i reaktivnih snaga na nivou elektrane

Grupni regulator pobude i reaktivnih snaga (GRPRS) regulator treba da vrši sledeće funkcije:

- i) raspodelu reaktivne snage među generatorima u paralelnom radu ravnomerno prema aktuelnim reaktivnim marginama svakog od generatora;
- ii) reguliše napon VN sabirnica koordinisanjem generisane Q generatora u paralelnom radu.

Tabela 1. Hijerarhijska struktura upravljanja naponima i reaktivnim snagama
Vremenska i prostorna dekompozicija

Nivo upravljanja	Primarna regulacija napona	Sekundarna regulacija napona	Tercijarna regulacija napona
Prostorni opseg	Jedan agregat	Jedna zona	Nekoliko zona i cela mreža
Vremenska konstanta	0,5 s do jednog minuta	Od jednog do nekoliko minuta	15 minuta i duže

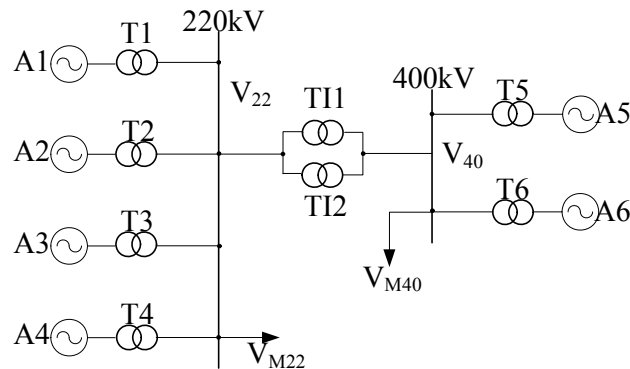


Slika 1. Opšta principijelna šema hijerarhijske strukture upravljanja naponima i reaktivnim snagama u elektroenergetskom sistemu

Test termoelektrana na kojoj je jedan ovakav Q-V regulator primenjen je u najveća TE „Nikola tesla A“ u EES Srbije sa 6 generatora, 4 povezana na 220kV sabirnice (A1, A2 nominalne snage 247MVA i A3, A4 nominalne snage 367MVA) i 2 povezana na 400kV sabirnice(A5, A6 nominalne snage 367MVA i 389MVA, respektivno). 220kV sabirnice i 400kV sabirnice su povezane sa dva interkonektivna transformatora (T11 i T12 na slici 2). Jednopolna šema elektrane je prikazana na slici 2.

U pogledu naponsko-reaktivne regulacije posmatrana elektrana se deli na dva dela; četiri agregata vezana na 220 kv sabirnice i pripadajuće 220 kV mreža V_{M22} i dva agregata priključenja na 400 kV sabirnice i pripadajuća mreža V_{M40} . Na 220 kV sabirnice preko nekoliko dalekovoda vezan je veliki potrošački centar, čime te sabirnice ispunjavaju uslov da budu pilot čvor – jer su najvažniji čvor relativno nezavisnog podsistema EES-a. Na 400 kV sabirnicama u neposrednoj blizini posmatrane elektrane, nalazi se još jedna elektrana sa dva agregata nominalne snage 720 MVA svaki.

U pogledu hijerarhijskog upravljanja Q-V regulator elektrane je realizovan u dva nivoa, regulator reaktivne snage (Q regulator) i nadređeni regulator napona VN sabirnica, sl. 1.



Slika 2 Jednopolna šema TE „Nikola tesla A“

2.2. Prenosna funkcija grupnog regulatora reaktivne snage

Prenosna funkcija grupnog regulatora reaktivne snage (GRRS) predstavlja odnos između zadate referentne vrednosti reaktivne snage Q_{HVref} i odgovarajuće promene reference napona na ARN potrebne da se postigne zahtevana Q_{HVref} . Snaga koju generator injektuje u mrežu [8] data je sa

$$\underline{S}_{Gi} = \underline{V}_{Gi} \underline{I}_{Gi}^*, \quad i = 1, 2, \dots, N_{GI} \quad (1)$$

gde je V_{Gi} napon na krajevima generatora, a I_{Gi}^* struja generatora i-tog agregata.

Prema (1), aktivna i reaktivna snaga injektirane u čvor date su sa (2) i (3), respektivno

$$P_{Gi} = V_{Gi}^2 Y_{Gii} \sin(\mu_{Gii}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{Gi}} V_{Gi} V_{Gj} Y_{Gij} \sin(\delta_{ij} - \mu_{Gij}) \quad (2)$$

$$Q_{Gi} = V_{Gi}^2 Y_{Gii} \cos(\mu_{Gii}) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{Gi}} V_{Gi} V_{Gj} Y_{Gij} \cos(\delta_{ij} - \mu_{Gij}) \quad (3)$$

gde su Y_{Gij} i μ_{Gij} amplituda i fazni stav kompleksne admitanse Y_{Gij} , respektivno, a $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ je ugao između fazora napona u čvorovima i i j.

Da bi u stacionarnom stanju procenili promene P i Q svih generatora od interesa koje su posledica promene napona generatora, koriste se sledeće linearizovane matrične jednačine sa Jakobijanima [8]:

$$[\Delta P_G] = \left(\frac{\partial [P_G]}{\partial [V_G]} \right) [\Delta V_G], \quad (4)$$

$$[\Delta Q_G] = \left(\frac{\partial [Q_G]}{\partial [V_G]} \right) [\Delta V_G], \quad (5)$$

gde je $[\Delta V_G]$ vektor promena napona generatora; $[\Delta P_G]$ je vektor promena injektiranih aktivnih snaga koje su posledica promene napona generatora; $[\Delta Q_G]$ je vektor injektiranih promena Q koje su posledica promene napona na krajevima generatora; $\partial [P_G] / \partial [V_G]$ i $\partial [Q_G] / \partial [V_G]$ su kvadratne matrice osetljivosti aktivnih i reaktivnih snaga, respektivno. Promene aktivne ($[\Delta P_G]$) i reaktivne ($[\Delta Q_G]$) snage, koje odgovaraju promeni napona generatora $[\Delta V_G]$, mogu se izračunati na osnovu vrednosti parcijalnih izvoda (4) i (5).

U slučaju inverznog problema tj. ukoliko je potrebno odrediti promene napona izazvane promenama u proizvedenim P i Q , koriste se sledeće dve linearizovane matrične jednačine:

$$[\Delta V_G] = \left(\frac{\partial [P_G]}{\partial [V_G]} \right)^{-1} [\Delta P_G] = S_P^{-1} [\Delta P_G], \quad (6)$$

$$[\Delta V_G] = \left(\frac{\partial [Q_G]}{\partial [V_G]} \right)^{-1} [\Delta Q_G] = S_Q^{-1} [\Delta Q_G]. \quad (7)$$

U prethodnoj formulaciji mreža je modelovana Thevenin-ovim ekvivalentom. Ekvivalentna Thevenin-ova impedansa mreže može se smatrati čisto induktivnom zbog generalno visokog odnosa X/R (tj. $X/R \gg 1$).

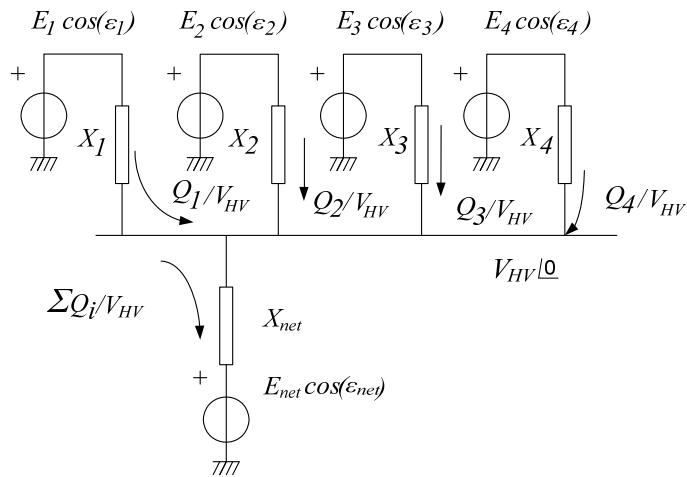
Koncept matrice osetljivosti je razvijen na osnovu metoda dekuplovanih tokova snaga [8], [6]. Matrica reaktivnih snaga je tačnije data sa (8).

$$\begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ |E_i| \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} \Delta E_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

gde je matrica $[S]$ tražena matrica osetljivosti i svi elementi matrice $[S]$ su čisto reaktivni, Q_i reaktivna snaga i-tog generatora i E_i je Thevenin-ov napon i-tog generatora. Da bi odredili potrebne promene reference napona koje odgovaraju zahtevanim promenama reaktivne snage, koristi se inverzna matrica osetljivosti:

$$\begin{bmatrix} \Delta E_i \end{bmatrix} = [S]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta Q_i \\ |E_i| \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Matrica osetljivosti se određuje na osnovu ekvivalentnog kola prikazanog na slici 3. Impedanse grana su kompleksni brojevi kao i pripadajuće elektromotorne sile (EMS) i naponi. Takođe, sve veličine prikazane na slici 3 su izražene u relativnim jedinicama. Generatorske grane su na ovoj šemi prikazane kao čisto induktivne (redna veza reaktanse blok-transformatora i ekvivalentnog statizma po reaktivnoj struji koji je realizovan u ARN). Tevenenova ekvivalentna impedansa mreže je takođe uzeta kao čisto induktivna. Sve promenljive prikazane na slici su u relativnim jedinicama.



Slika 3. Ekvivalentna šema elektrane, četiri generatorske jedinice koje su na mrežu povezane preko zajedničkih sabirnica (VN sabirnica).

Izračunate promene referenci ΔE_i šalju se ka ARN kao komande više/niže u vidu impulsa čija je dužina srazmerna izračunatoj promeni reference. Svaki impuls traje ceo broj sekundi. U idealnom slučaju potreban je samo jedan impuls odgovarajuće dužine tj. samo jedna komanda ka referencama napona svih generatora da bi se ostvarila željena raspodela reaktivne snage. U

realnoj primeni to nije slučaj. Prvo, karakterističan odziv generatora sa ARN na odskočnu promenu reference napona može da poseduje preskok. Drugo, dužina trajanja impulsa komande više/nije u konkretnom slučaju je fiksna i iznosi 1s. Da bi se prevazišla ograničenja linearnog modela i da bi se predloženi algoritam GRRS učinio robusnijim i manje osetljivim na neizbežne promene radnih uslova u mreži i promene proizvedenih aktivnih snaga, potrebno je povećati broj regulacionih koraka. To je moguće realizovati primenom prediktor korektor metoda. Metod prediktor-korektor zahteva primenu bar dva koraka, [10] i [11]. Originalni algoritam je modifikovan na način da prvi korak (prediktor korak) predstavlja samo deo inicijalno proračunatog koraka iz izraza (9). Veličina prvog koraka koji se izvršava određuje se na osnovu izraza (10),

$$[\Delta V_{1,i}] = \alpha \cdot [\Delta |E_i|] , \quad (10)$$

gde je $\Delta |E_i|$ odskočna promena izračunata prema (9), $0 < \alpha < 1$ je odgovarajući koeficijent skalirnja u prvom (prediktor) koraku, $\Delta V_{1,i}$ je odskočna promena reference napona koja je primenjena u prvom koraku (indeks 1) za i-ti generator. U toku ispitivanja GRPRS vrednost koeficijenta α određena je na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja u odnosu na najveći uočeni preskok u odzivu reaktivne snage. Pokazalo se da je dobra praksa da se vrednost α izabere kao recipročna vrednost uočenog relativnog preskoka. Za konkretan slučaj za α je uzeta vrednost $\alpha=0,85$. Rezultat primene prediktor-korektor metoda je da je preskok u odzivu reaktivne snage eliminisan kao i nepotrebno naprezanje generatora i sistema za regulaciju pobude.

Procenjeni vektor promene reaktivne snage u prvom (prediktor) koraku (indeks 1) dat je izrazom (11).

$$[\Delta Q_{1,i}] = [S] \cdot [\Delta V_{1,i}] . \quad (11)$$

Sledeći korak za svaki generator određuje se kao odnos između realizovanog (izmerenog) $\Delta Q_{1x,i}$ i očekivanog (procenjenog) $\Delta Q_{1,i}$ odziva pomoću (12),

$$\beta_i = \frac{\Delta Q_{1x,i}}{\Delta Q_{1,i}} \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (12)$$

Promene reaktivne snage svakog generatora u drugom koraku (indeks 2 označava korektor korak) se računaju na osnovu potrebne i realizovane promene (13)

$$\Delta Q_{2,i} = \Delta Q_i - \Delta Q_{1x,i}, \quad i = 1, 2, \dots, 6. \quad (13)$$

U sledećem koraku algoritma, izračunata promena reaktivne snage za svaki generator deli se odgovarajućim faktorom β_i dobijenim iz (12). Ovako izračunate promene reaktivne snage se pretvaraju u potrebne promene reference napona ARN primenom (14).

$$[\Delta V_{2,i}] = [S]^{-1} \cdot \left[\frac{\Delta Q_{2,i}}{\beta_i \cdot |E_i|} \right]. \quad (14)$$

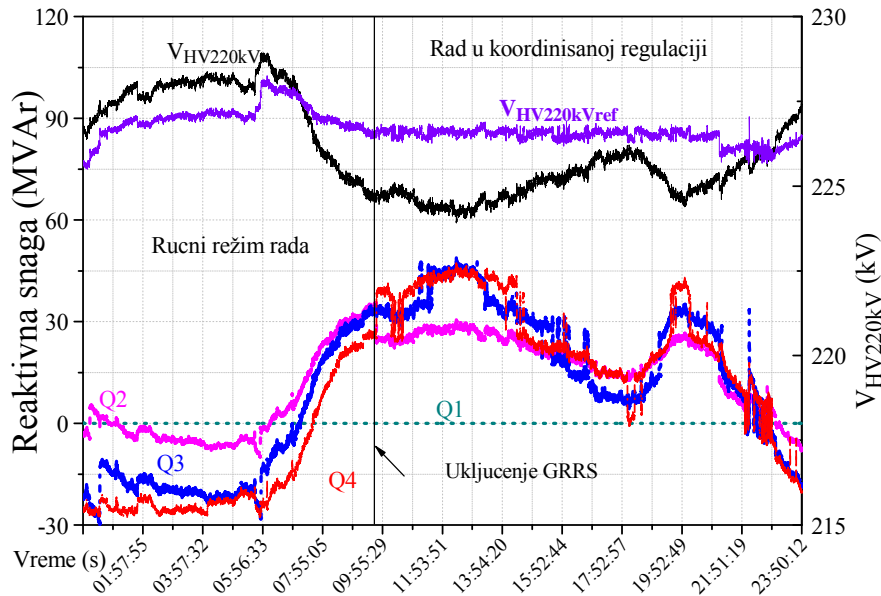
Greška u Q_{HV} dobijena na ovaj način treba da je manja od unapred definisane vrednosti (10MVar, odnosno jedan regulacioni korak u konkretnom slučaju).

Na ovaj način postignuta je modifikacija dijagonalnih elementa inverzne matrice osetljivosti. Implicitna pretpostavka korišćena u ovom slučaju je da su dijagonalni elementi inverzne matrice osetljivosti veći od ostalih elemenata matrice i da generatori nisu jako spregnuti. Nedostatak prediktor-korektor koračnog pristupa krije se u činjenici da se sa upotrebom prediktor-korektor pristupa povećava broj iteracija algoritma pa samim tim raste i vreme potrebno za izvršavanje numeričkih procedura u algoritmu. Ovaj nedostatak, međutim, ne utiče bitno na GRRS koji se izvršava samo kada se elektrana nalazi u stacionarnom stanju tj. svakih 10 do 30 sekundi za konkretni slučaj. Ovaj vremenski interval ostavlja dovoljno vremena da se završe svi potrebni računi. Primena prediktor-korektor metoda omogućava da se željeni izlaz (delta ΔQ_i) ostvari modifikacijom ulaza u (10) i da se izbegne direktna modifikacija elemenata matrice osetljivosti. Dodatnu prednost dvokoračnog prediktor-korektor metoda predstavlja povećanje neosetljivosti na promene parametara generatora i ARN čime se znatno poboljšava robusnost regulacije.

3. Verifikacija odziva GRPRS i provera postignutih performansi

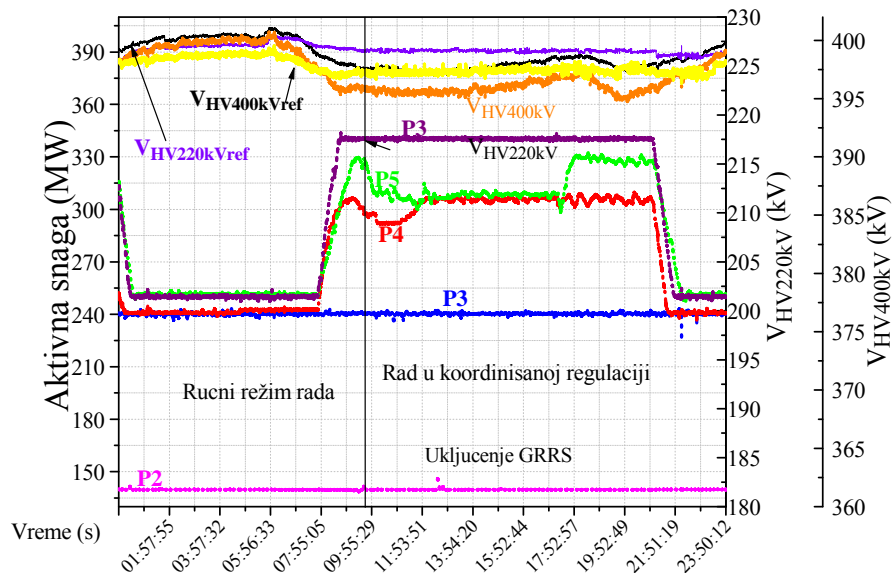
Provera odziva GRPRS u različitim radnim režimima i u različitim uslovima u mreži vršena je u toku perioda od godinu dana (maj 2011-maj2012). Ovako dug period probnog rada bio je neophodan da bi se potvrdio kvalitet odziva GRPRS pri različitim nivoima potrošnje u EES. Rezultati su prikazani u [12], [13], [14], [15] i [16]. U ovom radu su dati odzivi koji verifikuju osnovne funkcije GRPRS: regulacija napona sabirnica elektrane i automatsko održavanje maksimalne reaktivne rezerve elektrane pri promeni uslova u mreži i promeni opterećenja. Na slici 4 dati su odzivi Q generatora A1 do A4 i napona sabirnica 220 kV $V_{HV220kV}$ pri ručnom podešenju referenci ARN i koordinisanom Q-V regulacijom. Jasno se uočava da je napon sabirnica V_{HVref} ravniji u slučaju koordinisane regulacije. Takođe, pri koordinisanoj regulaciji su jednake reaktivne margine svakog generatora koji je uključen u nju, odnosno reaktivna mogućnost grupe agregata u koordinisanoj regulaciji je maksimalna za dati raspored aktivnih snaga po agregatima. Reaktivne snage generatora, u ručnom režimu podešavanja referenci ARN, menjaju se pod

dejstvom regulatora pobude automatski tako da održe napon na krajevima generatora na zadatoj vrednosti. Na slici se vidi da je u grupnom režimu rada dejstvu pobude superponirano dejstvo grupnog regulatora koji održava napon na sabirnicama elektrane V_{HVref} na zadatoj vrednosti uz uvažavanje zadatog statizma sabirnica.

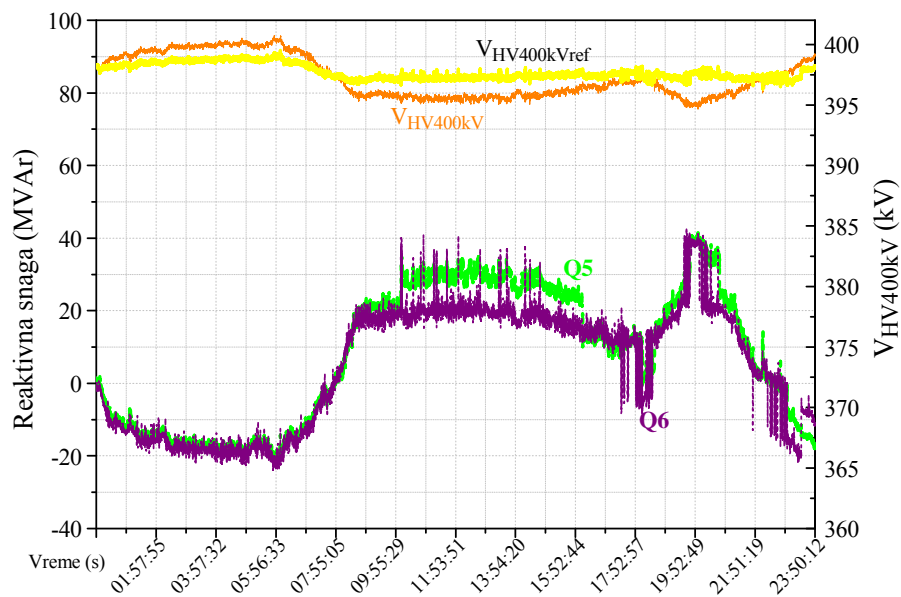


Slika 4. Raspeda reaktivnih snaga jedinica A1, A2, A3 i A4 pri ručnom podešavanju referenci za ARN pojedinih generatora i u koordinisanoj Q-V regulaciji. Pri tome je statizam koordinisane regulacije po reaktivnoj snazi 3%

Na slici 5 je prikazan uticaj snimljenih promena aktivne snage pojedinih agregata, koji rade u koordinisanoj regulaciji, na kvalitet održavanja napona visokonaponskih sabirnica 400 kV i 220 kV. Koordinisana regulacija je uključena približno u 10^h. Prikazane promene aktivne snage utiču na reaktivne mogućnosti pojedinih agregata koji se nalaze u koordinisanoj regulaciji preko ograničenja maksimalne struje rotora, ograničenja stabilnog rada i dodatnih ograničenja zbog napajanja sopstvene opreme. Uticaj tih promena aktivne snage na reaktivne snage agregata A5 i A6, povezanih na sabirnice 400 kV je prikazan na slici 6. Uočava se da se referentne vrednosti napona sabirnica za oba nivoa ne menjaju kada se uključi GRPRS, odnosno rad GRPRS je otporan na promene aktivne snage agregata uključenih u grupni koordinisani rad. Ovo potvrđuje odavno poznatu pretpostavku da je uticaj $P-f$ regulacione konture vrlo mali na Q-V regulacionu konturu i zato se te dve regulacione konture mogu raspregnuti i posebno analizirati.



Slika 5. Raspedela aktivnih snaga jedinica A2, A3, A4, A5 i A6 i njihov uticaj na napon 400 kV sabirnica i 220 kV sabirnica. Referentne vrednosti napona sabirnica za oba nivoa (sivi tragovi) ostaju iste kad se uključi koordinisana Q-V regulacija. Pri tome je statizam koordinisane regulacije po reaktivnoj snazi 3%



Slika 6. Raspedela reaktivnih snaga jedinica A5 i A6 pri ručnom podešavanju referenci za AVR pojedinih generatora i u koordinisanoj Q-V regulaciji. Referentna vrednost napona sabirnica 400 kV (sivi trag) ostaje ista kad se uključi koordinisana Q-V regulacija, bez obzira na velike promene aktivne snage i reaktivne potrošnje u sistemu. Pri tome je statizam koordinisane regulacije po reaktivnoj snazi 3%

4. Zaključak

U radu je prikazana praktična implementacija grupne regulacije pobude i reaktivnih snaga (GRPRS) u jednoj termoelektrani sa dva sabirnička naponska nivoa. Pri tome su pomenuti bitni praktični aspekti integracije instaliranog uređaja GRPRS u kontrolne krugove postojećih primarnih regulatora pobude agregata, SCADA sistem i energetska sistem.

Istaknuto je važno unapređenje prikazanog uređaja GRPRS u odnosu na prethodna rešenja za grupnu regulaciju reaktivnih snaga, a to je upotreba prediktor-korektor metoda za uobličavanje odziva i izbegavanje eventualnog prebačaja u tranzijentnom odzivu promene reaktivne snage pri promeni reference primarnog regulatora napona.

Na kraju rada prikazani su rezultati verifikacije ugrađenog uređaja GRPRS i postignute performanse. Dati rezultati potvrđuju da je uređaj GRPRS ispunio sve zadate ciljeve u vezi koordinisane regulacije reaktivnih snaga i odgovarajuće kontrole napona visokonaponskih sabirnica elektrane, uz zahtevani stepen tačnosti.

Zahvalnica

Rad je nastao u okviru projekta TR33020, „Povećanje energetske efikasnosti hidroelektrana i termoelektrana Elektroprivrede Srbije razvojem tehnologije i uređaja energetske elektronike za regulaciju i automatizaciju”, koji je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

- [1] A. Sarić, M. Čalović, V. Strezoski, “Fuzzy Multi-Objective Algorithm for Multiple Solution of Distribution Systems Voltage Control”, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol 25, No. 2, pp. 145-153, ISSN 0142-0615, 2003
- [2] A. Sarić, R. Ćirić, “Integrated Fuzzy State Estimation and Load Flow Analysis in Distribution Networks”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 18, broj 2, str. 571-578, ISSN 0885-8997, 2003.
- [3] A. Sarić, M. Čalović, “Integrated GA-Fuzzy Multi-Objective Model for Centralized Volt/Var Control in Distribution Systems”, *Electric Power Components and Systems*, Vol. 33, No. 9, pp. 1039-1055, ISSN 1532-5008, 2005,
- [4] M. Čalović, A. Sarić, “An Interactive Procedure for the Coordination of Decoupled VAR/VOLT Control in Radial Distribution Systems”, *European Trans. Electrical Power - ETEP*, Vol. 7, No. 3, pp. 191-197, ISSN 1430-144X, 1997.

- [5] M. S. Čalović, *Regulacija elektroenergetskih sistema, Tom 2, Regulacija napona i reaktivnih snaga*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1997.
- [6] *NERC/WCSS Planning Standard*, September 2000.
- [7] V. Strezoski, N. Katić, D. Janjić, "Voltage Control Integrated in Distribution Management System", *Electrical Power System Research*, Vol 60, No. 2, pp. 85-97, ISSN 0378-7796, 2001.
- [8] J. Grainger, W. Stevenson, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, New York, 1994, ISBN 0070612935
- [9] A. A. Fouad P. M. Anderson, *Power System Control and Stability*, 2nd Ed., Wiley India Pvt Ltd, 2003.
- [10] K. Iba, H. Suzuki, M. Egawa, and T. Watanabe, "Calculation of Critical Loading Condition with Nose Curve Using Homotopy Continuation Method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, 1991.g u
- [11] V. Ajjarapu, *Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control*. Iowa: Springer, 2006.
- [12] J. Dragosavac, *Koordinisana regulacija reaktivnih snaga generatora i napona na sabirnicama termoelektrane*, Fakultet tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, 2012.
- [13] J. Dragosavac, Ž.Janda and J.V.Milanović, "PLC-Based Model of Reactive Power Flow in Steam Power Plant for Pre-Commissioning Validation Testing of Coordinated Q-V Controller", for *IEEE Trans. on Power Systems*, 2011, Volume 26, No. 4, pp 2256-2263.
- [14] J. Dragosavac, Z. Janda, J.V. Milanovic, "Coordinated Reactive Power – Voltage Controller for Multi Machine Power Plant", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 3, pp. 1540–1549, August 2012.
- [15] J. Dragosavac, Z. Janda, J.V. Milanovic, D. Arnautovic, Lj. Mihajlovic, "Robustness of Commissioned Coordinated Q – V Controller for Multimachine Power Plant", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 28, No. 2, pp 1415 – 1424, May 2013.
- [16] J. Dragosavac, Z. Janda, J.V. Milanovic, D. Arnautovic, Lj. Mihajlovic, B.Radojicic, "Design, Implementation and On-site Performance of Coordinated Intra-Plant Reactive Power-Voltage Controller", *IEEE PES Trondheim PowerTech 2013*, 16-20 June 2013, Grenoble, France.

Abstract. The coordinated voltage and reactive power controller, designed for the thermal power plant, is presented in the paper. A brief explanation of the need for such device is given and justification for commissioning of such equipment is outlined. After short description of the theoretical background of the proposed control design, the achieved

features of the commissioned equipment are fully given. Achieved performances are illustrated by recorded reactive power and bus voltage responses after commissioning of the described equipment into the largest thermal power plant in Serbia. As it can be seen in presented records, all design targets are met.

Keywords: Thermal power plant, information systems, reactive power – voltage control, Joint Excitation and Reactive Power Control

Joint Excitation and Reactive Power Control in Thermal Power Plant

Rad primljen u uredništvo 13.11.2013. godine
Rad prihvaćen za objavljivanje 18.11.2013