

Definisanje uslova za rad uređaja za grupnu regulaciju pobude i reaktivnih snaga (GRPRS) u sistemu automatskog upravljanja naponima u mreži

Dušan Arnautović¹, Jasna Dragosavac¹, Žarko Janda¹, Jovica Milanović²,
Ljubiša Mihailović³,

¹ Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

Dusan.Arnautovic@ieent.org

² School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Manchester,
Sackville Street Building, Manchester, M13 9PLU, nited Kingdom

³ PD „Termoelektrane Nikola Tesla“ d.o.o, Bogoljuba Uroševića Crnog 44, 11500
Obrenovac, Srbija

Kratak sadržaj: U radu se razmatra mogućnost direktnog uključanja uređaja za grupnu regulaciju pobude i reaktivnih snaga u automatizovani sistem upravljanja naponima u elektroenergetskom sistemu. Grupni regulator pobude i reaktivnih snaga (GRPRS) predstavlja sistem kojim se vrši automatsko upravljanje reaktivnim režimom elektrane i raspodela reaktivnog opterećenja među generatorima paralelno spregnutim preko blok transformatora i uključenim u grupni rad. Realizacijom sistema za grupnu regulaciju reaktivne snage postiže se ravnomerna raspodela reaktivnog opterećenja agregata koji učestvuju u grupnoj regulaciji, a prema mogućnostima koje definišu pogonske karte pojedinih agregata. Grupnu regulaciju agregata u okviru elektrane potrebno je realizovati kako bi se uravnotežila eksploatacija agregata i kako bi se obezbedilo da se agregati u grupnoj regulaciji ravnomerno odzivaju na poremećaje u elektroenergetskom sistemu, kako bi se obezbedio rad agregata unutar pogonskog dijagrama pri različitim radnim uslovima u mreži (uslovi izuzetno niskih i izuzetno visokih napona) kao i radi adekvatnog definisanja naponsko-reaktivne karakteristike u tački priključenja elektrane na prenosnu mrežu. Sa stanovišta elektroenergetskog sistema implementacija GRPRS omogućava: *i*) praktičnu realizaciju sekundarne regulacije napona u sistemu, *ii*) maksimalno iskorišćenje raspoložive reaktivne rezerve u sistemu što doprinosi udaljavanju od granice naponske stabilnosti sistema, *iii*) ocenu doprinosa svakog generatora u pružanju pomoćne usluge regulacije napona. GRPRS ima potpuni uvid u reaktivnu i naponsku rezervu svakog generatora, prati stanje u mreži kroz napon na sabirnicama tako da se može koristiti da u realnom vremenu dostavlja operatoru sistema cenu i tarifnu zonu proizvedene

reaktivne energije. U toku dve godine praktične upotrebe skupljena su iskustva u podešenju referentnog napona i statizma sabirnica na dnevnom, mesečnom i sezonskom nivou. Na kraju uređaj GRPRS se osvetljava sa aspekta upotrebe kao alatke za realizaciju sekundarne regulacije napona. U celom sistemu sekundarne regulacije napona, najskuplji i tehnički vrlo zahtevan korak je kako zahtevane nivoe reaktivne/snage/napona „dostaviti“ generatoru. GRPRS predstavlja rešenje koje ne iziskuje nikakve promene na pobudnim sistemima i u stanju je da održava napon čvorne tačke u sistemu, kontinualno u vremenu, a prema zahtevu višeg nivo upravljanja. Na kraju rada je razmatrana mogućnost primene nekoliko koordinisanih GRPRS uređaja.

Ključne reči: sekundarna regulacija napona, grupna regulacija pobude i reaktivnih snaga, reaktivna snaga, rezerva reaktivne snage,

1. Uvod

U ustaljenom stanju naponsko-reaktivna regulacija ima za cilj održavanje željenog/planiranog profila napona na bitnim čvorištima u elektroenergetskom sistemu (EES). U uslovima deregulisanog tržišta električne energije, tržište zauzima najznačajniju ulogu, i sistem ponekad radi na granicama svoje opteretljivosti. U takvim uslovima nije uvek moguće održati dovoljnu udaljenost od granice naponske stabilnosti i naponskog sloma pri prelaznim procesima u EES. Brze prelazne procese u sistemu kompenzuje primarna regulacija, dok spore promene napona u sistemu kontroliše operator sistema, ručno. Ručno upravljanje naponsko reaktivnim prilikama u napregnutom, deregulisanom sistemu postaje nedovoljno efikasno. Zbog toga automatizacija upravljanja naponsko-reaktivnim prilikama u sistemu postaje sve značajnija. Hijerarhijska automatska kontrola napona realizovana je u nekoliko zemalja [1], [2], [3]. Najveći nedostatak realizovanih sistema je zatvorena povratna petlja po reaktivnoj snazi [2], [3]. Zato se u veoma složenom francuskom EES uvodi regulacija pilot čvora koja obuhvata sve generatore u zoni i koordiniše njihovo dejstvo [1].

Sekundarna regulacija napona i uređaji koji se koriste u tu svrhu ne mogu se kupiti na tržištu. Razlog je u brojnim specifičnostima kojima se svaki sistem karakteriše, tako da je svaka zemlja razvijala svoje rešenje, oslanjajući se na iskustva prethodnika. Zbog tih brojnih specifičnosti, velikim svetskim proizvođačima opreme se ne isplati da razvijaju ove sisteme jer bi bili neprihvatljivo skupi. Glavni motiv za razvoj GRPRS je bio ujednačenje odziva svih generatora u najvećoj elektrani u Srbiji. Razvoj tog uređaja je podrazumevao da se dobro prouče svi nivoi upravljanja naponima jer GRPRS se nalazi na spoju elektrane i sistema. Najveća opasnost ovih sistema je pojava oscilacija reaktivne snage između generatora i između tih elektrana [1] [2], [3]. Razvijeno je zato rešenje koje ne zatvara povratnu spregu po reaktivnoj snazi na generatoru direktno iznad naponske petlje. Na osnovu rezultata ispitivanja uređaja u pogonu je dokazano da su oba cilja postignuta: i) GRPRS održava napon na sabirnicama elektrane sa zadatim statizmom u

toku sporih promena napona u sistemu; ii) održavaju se jednake reaktivne rezerve na svim generatorima koji su uključeni u GRPRS tako da pri prelaznim procesima u sistemu elektrana pruža najveću moguću podršku EES. Viši nivo hijerarhijskog upravljanja može direktno zadavati referentni napon/ reaktivnu snagu na sabirnicama prema npr. dnevnim prognozama potrošnje, proračunu tokova snaga, željenom naponskom profilu. Najvažnije karakteristike/funkcije GRPRS su:

- GRPRS obezbeđuje vremensku dekompoziciju primarnog i sekundarnog nivoa upravljanja,
- GRPRS održava ravnomernu raspodelu reaktivnih snaga među generatorima prema aktivnim raspoloživim reaktivnim opsezima koji mogu značajno odstupati od slike samog generatora predstavljane pogonskim dijagramom.

U EES-u nakon delimičnog raspada sistema (zvanični izveštaji predstavljaju interne dokumente i nisu dostupni) izvršena je analiza uzroka raspada koji su se desili kao i odziva generatora na nastali poremećaj. Analizom odziva najveće elektrane u sistemu uočeno je da su primarni regulacioni resursi, generatori sa automatskim regulatorima napona, reagovali različito. Prema izveštajima, u toku delimičnog raspada sistema nekoliko generatora je dostiglo ograničenje maksimalne struje pobude, jedan generator je prešao u režim forsiranja pobude, dok su ostali generatori bili daleko od graničnih vrednosti (konkretne vrednosti nisu dostupne). U periodu pre poremećaja generatori su proizvodili različite vrednosti reaktivnih snaga i u odnosu na maksimalno dozvoljenu reaktivnu snagu i u odnosu na nominalnu snagu generatora. Raspodelu reaktivnih snaga među generatorima vrši dispečer elektrane na zahtev dispečera prenosnog sistema. Dispečer elektrane sa više generatora, zbog velikog broja operativnih podataka, nije u stanju da u svakom trenutku sagleda ravnomernost raspodele reaktivne snage među generatorima. To je rezultovalo potrebom za izradom uređaja koji će automatizovati ovaj proces.

Uređaj GRPRS se nalazi u neprekidnoj upotrebi već tri godine. U toku dosadašnjeg eksploatacionog iskustva pokazano je da se funkcije uređaja mogu proširiti. GRPRS je baziran na PLC (programabilni logički kontroler) tehnologiji tako da je moguće vršiti proširenje postojeće platforme novim komunikacionim jedinicama. Optička mreža duž prenosnih vodova već postoji. To znači da bi po postojećoj optičkoj mreži upotrebom više GRPRS koji bi bili stacionirani u blizini pilot čvorova operator sistema mogao automatski da postavlja željene vrednosti napona. Takođe GRPRS pruža on-line interfejs tržišnom operatoru koji daje informaciji o ceni i tarifi MVAR.

2. Osnove za projektovanje koordinisanog grupnog regulatora pobude i reaktivne snage

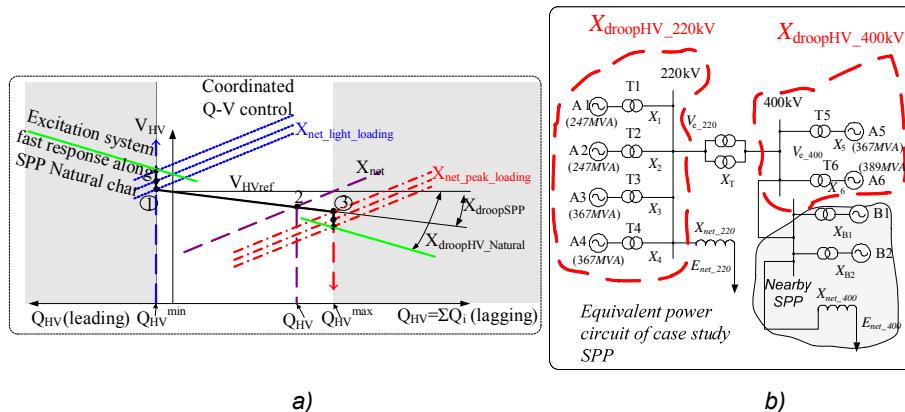
Napon na sabirnicama elektrane dobija se u preseku naponsko reaktivne (Q-V) karakteristike elektrane (crna, debela linija na slici 1) i karakteristike mreže X_{net} (ljubičasta isprekidana linija na slici 1). Ako posmatramo Q-V karakteristiku elektrane (slika 1) sa zadatim statizmom sabirnica u režimu regulacije napona V_{HV} radna tačka elektrane se pomera duž Q-V karakteristike između tačaka 1 i 3. U normalnim radnim uslovima, tačka 2, elektrana proizvodi ukupnu reaktivnu snagu Q_{HV} pri naponu sabirnica V_{HV} koji je za $X_{droopSPP} \cdot Q_{HV}$ manji od referentnog napona sabirnica V_{HVref} . Statizam sabirnica $X_{droopSPP}$ je neophodno uvesti da bi se sprečilo prelivanje reaktivne snage između elektrana. Elektrana se nalazi na ovoj karakteristici sve dok je ukupan zahtev Q_{HV} manji od ukupne maksimalne reaktivne snage Q_{HV}^{max} koju elektrana može da proizvede ili veći od ukupne minimalne reaktivne snage koju elektrana može da apsorbuje Q_{HV}^{min} . Čim radna tačka elektrane dođe na graničnu vrednost, Q-V regulator deluje tako da zaštiti generatore od neregularnih radnih uslova u stacionarnom stanju i održava ukupnu odatu/apsorbovanu snagu na zadatoj maksimalnoj/minimalnoj vrednosti $Q_{HV}^{max/min}$. Pri tome ako u mreži dođe do poremećaja, pobudni sistemi reaguju kao da Q-V regulator ne postoji i dopuštaju maksimalnu podršku sistemu od strane elektrane. Radna tačka se tada kreće po prirodnoj karakteristici elektrane (zeleno linija) do granice definisane podešenjima limitera pobude. Čim poremećaj prođe i uspostavi se stacionarno stanje na VN sabirnicama, Q-V regulator vraća radnu tačku elektrane na karakteristiku Q_{HV}^{min} i tako čuva generatore i sistem od ulaska u opasne zone rada. Prema tome u prisustvu GRPRS elektrana zadržava ukupnu sposobnost da reaguje na brze prelazne pojave u EES ali sa pobudnim sistemima generatora postavljenim tako da mogu da daju sistemu maksimalnu podršku.

Da bi se napon održavao na zadatoj Q-V karakteristici (koja se razlikuje od Tevenenove reaktanse $X_{droopHV_Natural}$) pri promeni uslova u mreži (npr. porast potrošnje), regulator napona VN sabirnica treba da promeni ukupnu proizvedenu reaktivnu snagu elektrane ΣQ_i .

Regulator napona VN sabirnica računa Q_{HVref} za željene vrednosti parametara regulacije V_{HVref} i $X_{droopSPP}$ i procenjeno X_{net} a prema vrednostima napona V_{HV} i reaktivne snage ΣQ_i u prethodnoj radnoj tački prema (1)[5]:

$$Q_{HVref} = \left(\Sigma Q_i + \frac{V_{HVref} - V_{HV}}{X_{net}} \right) / \left(1 + \frac{X_{droopHV}}{X_{net}} \right) \quad (1)$$

gde je $\Sigma Q_i = Q_{HV}$ suma generisanih reaktivnih snaga svih generatora.



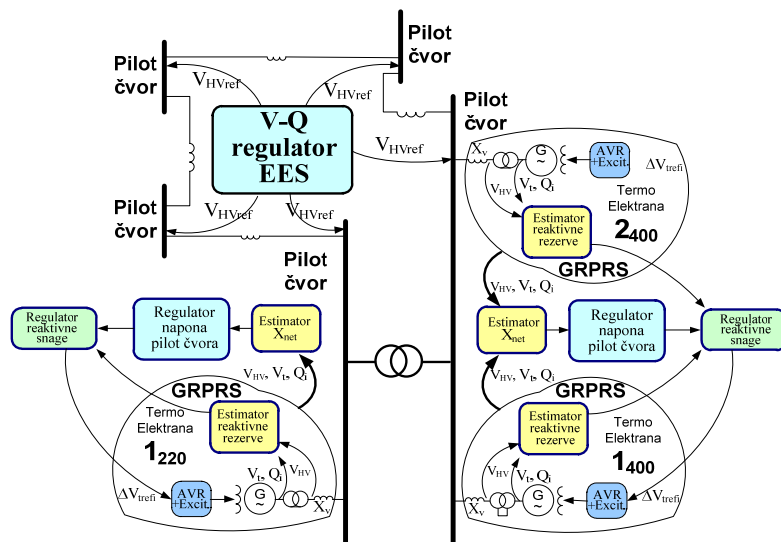
Slika 1a) Statička naponsko-reaktivna karakteristika sabirnica TE koju održava GRPRS: V_{HVref} je referentna vrednost napona VN sabirnica a Q_{HV} je zbirna isporučena reaktivna snaga ΣQ_i na nivou VN sabirnica.

1b) Jednopolna šema energetskog kola TE koja se analizira: reaktanse u kolu su: $X_1 = 16,95\%$, $X_2 = 13,35\%$, $X_3 = 10,5\%$, $X_4 = 12,0\%$, $X_{B1} = X_{B2} = 6,0\%$ and $X_T = 5,4\%$

Regulator reaktivne snage (Q regulator) reguliše ukupnu proizvedenu reaktivnu snagu na VN sabirnicama. Zadata referentna vrednost zahtevane reaktivne snage Q_{HVref} prvo se poredi da sumom proizvedenih reaktivnih snaga svih generatora Q. Potom se računaju ukupna greška reaktivne snage, kao i greške proizvedenih reaktivnih snaga na svim generatorima koji su uključeni u Q-V regulaciju. Dva osnovna problema koja pri tome Q regulator treba da reši su: način raspodele ukupne zahtevane reaktivne snage i prenosna funkcija koja daje odnos između ulaza i izlaza regulatora, tj. između zahtevane promene reaktivne snage po agregatu i potrebne promene referentne vrednosti napona generatora. S obzirom na veličinu generatora izabran je metod jednakih reaktivnih rezervi, tako da je za raspoloživi opseg izabrana pogonska karta samog sinhronog generator. Potrebna promena reference napona generator računa se prema (2) korišćenjem opšte primenivanog metoda matrice osetljivosti [6]

$$[\Delta E_i] = [S]^{-1} [\Delta Q_i / E_i], \quad (2)$$

gde je [S] matrica osetljivosti, Q_i reaktivna snaga i -tog SG i E_i je tevenenov naponski ekvivalent sinhronog generatora. Detalji izvođenja matrice osetljivosti dati su u [5].



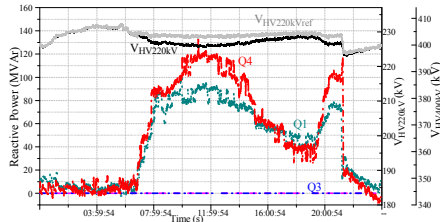
Slika 2 Osnovni princip projektovanja naponsko-reaktivnog regulatora prikazan putem blok dijagrama

Izračunata vrednost reference se pretvara u broj koraka na više/niže koje je potrebno proslediti automatskom regulatoru napona pobudnog sistema. Koraci se preko komandnog napona šalju jednovremeno ka svim regulatorima pobude. Na taj način se dobijaju jednovremeni odzivi svih generatora koji su uključeni u grupnu regulaciju i istovremeno sprečava prelivanje reaktivne snage između generatora.

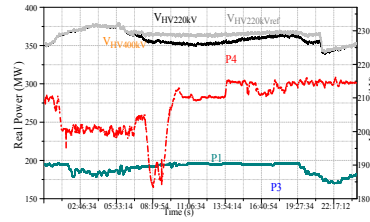
3. Verifikacija odziva GRPRS na elektrani

3.1 Regulacija napona sistemskog pilot čvora

Slika 3 ilustruje najvažnije funkcije GRPRS: i) održavnje napona na vrednosti V_{HVref} (dobijeno računski na osnovu snimljenih tragova $V_{HV200kV} + X_{droop_220kV} \cdot Q_{HV}$), sl. 3a, ii) automatska preraspodela generisanih reaktivnih snaga tako da se dobija ravnomerna raspodela reaktivne rezerve uz uvažavanje generisanih aktivnih snaga, sl. 3a i 3b. Slike 3a i 3b pokazuju da GRPRS uspešno održava napon na sabirnicama kao i da vrši automatsku preraspodelu opterećenja nakon poremećaja u mreži. Odziv GRPRS se javlja 20s nakon poremećaja i vrši automatsko prepodešavanje reference napona generator, da bi se napon na sabirnicama vratio na vrednost pre poremećaja. GRPRS postaje alatka, potrebna i dovoljna, za prihvatanje komande iz sistema sekundarne regulacije napona.



Slika 3a Dnevne promene Q i regulacija napona VN sabirnica. Kvalitet rada GRPRS je prikazan pomoću traga referentnog napona V_{HVref} . Jedinica A2 nije povezana na mrežu



Slika 3b Dnevne promene aktivne snage koje odgovaraju slici 3a. Jedinica A2 nije povezana na mrežu

GRPRS je baziran na PLC tehnologiji i ima komunikacioni modul koji je predviđen za prijem referentne vrednosti napona sabirnica V_{HVref} ili referentne vrednosti željenog nivoa generisane reaktivne snage Q_{HVref} . U sledećem koraku je potrebno proveriti kakav se odziv GRPRS postiže instaliranjem još jednog takvog uređaja u elektrani koja je električno veoma blizu. Postizanje stabilnog paralelnog rada bi otvorilo mogućnost za realizaciju sekundarne regulacije napona u elektroenergetskom sistemu postavljanjem mreže GRPRS.

3.2 Analiza uticaja pojedinih generatora na napon čvora

Prethodna analiza pokazuje da je postignuto kompletno dekuplovanje u odnosu na regulator napona SM, zatim da je napon VN sabirnica kontinualno održavan tokom dana na zadatoj vrednosti i da se GRPRS odazvao 20s posle velikog sistemskog poremećaja [6]. Zbog toga GRPRS omogućava uključenje TE u regulacionu šemu sekundarne kontrole napona. Sam GRPRS poseduje komunikacioni modul koji može proslediti istovremeno svim generatorima komandu poslatu od strane višeg hijerarhijskog nivoa upravljanja. Dalje je neophodno proveriti da li postoji kolizija između odziva dva GRPRS uređaja ugrađena na različitim naponskim nivoima u TE koja je predmet analize. Stoga je potrebno izvršiti određivanje uticaja pojedinih generatora na napone čvorišta.

Na slici 1 je prikazan energetski sistem koji je predmet analize. U TE "Nikola Tesla A" četiri generatora (A1, A2, A3 i A4) su povezana na 220 kV sabirnice a preostala dva generatora (A5 i A6) su povezana na 400 kV sabirnice. Interkonekcija dva sistema je ostvarena preko dva 400 MVA transformatora povezana u paralelu. Da bi se odredio stepen dekuplovanja između te dve grupe generatora, pri čemu je svaka grupa opremljena sa GRPRS, izvršena je posebna analiza. Veoma je pogodno koristiti metod potencijala čvorova da bi se odredio uticaj individualnih generatora na sabirnice 220 kV elektrane. Odgovarajuće ekvivalentno kolo je prikazano na slici 1. Vremenski promenljive vrednosti pojedinih parametara su $X_{net_220} = 2,7\%$ i $X_{net_400} = 1,5\%$ (računato u odnosu na istu baznu snagu $S_b = 360$

MVA). Takođe je neophodno usvojiti istu veličinu koraka promene referentnog napona svakog generatora (0,5% od nazivnog napona u ovom slučaju). Sa tako unapred određenim vrednostima je moguće izračunati parcijalni uticaj svakog generatora (ili grupe generatora) na kontrolu napona VN sabirnica. Na primer, 220 kV sabirnički napon je izražen kao (3),

$$V_{e_220} \left(\frac{1}{X_{net_220kV}} + \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_3} + \frac{1}{X_4} + \frac{1}{X_T} \right) = \frac{E_{net_220kV}}{X_{net_220kV}} + \frac{E_1}{X_1} + \frac{E_2}{X_2} + \frac{E_3}{X_3} + \frac{E_4}{X_4} + \frac{V_{e_400}}{X_T} . \quad (3)$$

Očigledno je da je uticaj svakog generatora na kontrolu napona 220 kV sabirnica inverzno proporcionalan odgovarajućoj reaktansi blok transformatora, leva strana jednačine (3) u slučaju kada nema dodatnih uticaja statizama po reaktivnoj snazi pojedinih generatora.

Takođe treba uzeti u obzir i uticaj generatora B1 i B2 u obližnjoj termoelektani, nazivne snage po 720 MVA. Uticaj generatora A5 i A6 na 220 kV sabirnice je predstavljen članom V_{e_400}/X_T u izrazu (3) koji može biti izračunat primenom metoda potencijala čvorova. Relativni uticaj pojedinih generatora na 220 kV i 400 kV sabirnički napon je sumarno prikazan u Tabeli I. Očigledno je iz podataka prikazanih u tabeli da su najuticajniji generatori A1 ÷ A4 (povezani na sabirnice 220kV) dok generatori povezani na 400 kV sabirnice imaju značajno manji uticaj. Brojevi u tablici predstavljaju relativne težine uticaja pojedinih generatora na promene napona VN sabirnica, i može se zaključiti da su grupe generatora A1 ÷ A4 i generatora A5 i A6 dekoplovane u smislu njihovog uticaja na napon VN sabirnica na koje su povezani. Generatori vezani na 220 kV sabirnice dominantno utiču na napon tih sabirnica dok generatori vezani na 400kV sabirnice uglavnom utiču na njihov napon. Stepen dekoplovanja je izražen težinskim koeficijentima (RUG) prikazanim u Tabeli I. U praksi nije uočen značajni međusobni uticaj između te dve grupe generatora u toku dve godine neprekidnog rada dva GRPRS. Na osnovu toga se zaključuje da vrednosti RUG koeficijenata, prikazane u Tabeli I, mogu biti upotrebljene radi procene nivoa dekoplovanja međusobnog uticaja generatora. Izgleda da tri puta manji RUG koeficijent znači da odgovarajući generator nema bitan uticaj na napon posmatranog čvora mreže.

Stoga grupe generatora uključenih u grupnu regulaciju, odnosno pod kontrolom GRPRS, mogu biti predstavljeni ekvivalentnim generatorima. Ako se pretpostavi da su ekvivalentne EMS svih generatora od interesa bliske jedinici, moguće je izračunati ekvivalentnu reaktansu grupe koordinisanih generatora gde X_{droop} odgovara Tevenenovoj reaktansi $X_{droopHV_Natural}$. Uočava se da je uticaj koordinisanih grupa generatora na promenu napona porastao, usled dejstva GRPRS, kako na 220 kV sabirnicama tako i na 400 kV sabirnicama. Još je značajnije to da koordinisana grupa generatora ne mora da emulira Tevenenovu ekvivalentnu reaktansu, već programirana vrednost reaktanse može biti i drugačija. U analiziranom primeru je bila $X_{droopHV} = 3\%$. Pitanje koje treba istražiti je kako izabrati odgovarajuću koordinisanu vrednost reaktanse i da li i kako ta vrednost treba da se menja u toku dana, nedelje ili sezone.

Tabela I Relativni uticaj generatora (RUG) na varijacije napona 220 kV i 400 kV sabirnica

SG.	RUG (220 V)	RUG (400 kV)	RUG (220 kV) sa GRPRS ($X_{droopHV_Natural}$)	RUG (400 kV) sa GRPRS ($X_{droopHV_Natural}$)	RUG (220 kV) sa GRPRS ($X_{droopHV}=3\%$)	RUG (400 kV) sa GRPRS ($X_{droopHV}=3\%$)
A1	5,900	1,327				
A2	5,900	1,327	26,781	6,024	33,333	6,944
A3	7,490	1,685				
A4	7,490	1,685				
A5	1,293	9,524	2,425	17,857	4,065	33,333
A6	1,132	8,333				
B1	2,263	16,667	2,263	16,667	2,263	16,667
B2	2,263	16,667	2,263	16,667	2,263	16,667

3.3 Optimalno podešenje naponsko-reaktivne karakteristike GRPRS

Glavni cilj je postići korektivnu akciju sa minimalnim dejstvom na sistem, u ovom slučaju sa jednim koordinisanim korakom naponske reference od 0,5%, koji se istovremeno zadaje svim koordinisanim generatorima. Dopuštena tolerancija napona VN sabirnica iznosi $\pm 0,6$ kV oko unapred definisane naponsko-reaktivne karakteristike za 400 kV nivo i $\pm 0,1$ kV za 220 kV nivo. U slučaju 220 kV sabirnica, relativno odstupanje visokog napona odgovara promeni od 0,0426% od nazivnog napona, koji u ovom slučaju iznosi 235 kV. Iz jednačine (4)

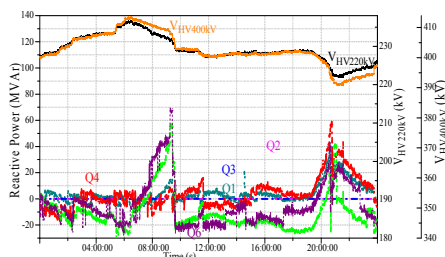
$$\Delta V_{e_220} \left(\frac{1}{X_{net_220}} + \frac{1}{X_{droop_220kV}} + \frac{1}{X_T} \right) = \frac{\Delta V_{ref_CQVC_220kV}}{X_{droop_220kV}}, \quad (4)$$

Odakle sledi da zahtevana vrednost $X_{droopHV_220}$ iznosi 2,4%. Stvarno podešena koordinisana vrednost je izabrana da bude $X_{droopHV_220} = 3\%$. Na takav način je uticaj generatora A1 ÷ A4 malo pojačan smanjenjem ekvivalentne reaktanse sa 3,7% na 3%. Snimci iz eksploatacije potvrđuju da sa postojećim podešenjima nema značajne međusobne interferencije između napona ovih dveju VN sabirnica u koordinisanoj kontroli. Pošto smanjenje $X_{droopHV_220}$ za 1% dovodi do porasta od približno 30MVAR reaktivnog odziva na jedan koordinisani korak promene reference, uprava termoelektrane nije bila zainteresovana za dalje smanjenje vrednosti $X_{droopHV_220}$.

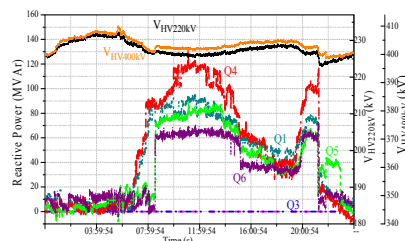
3.4 Sezonski uticaj na podešenja GRPRS

Na slici 4 su prikazane dnevne promene generisane reaktivne snage termoelektrane čije generatore koordiniše GRPRS u različitim sezonama. Promene naponske reference se komanduju od strane dispečera obično dva puta dnevno u različitim sezonama. Podešena vrednost X_{droop} izgleda da je dovoljno dobro prilagođena svim sezonama. Vidi se da su naponi u prenosnoj mreži visoki tokom celog dana u proleće. Generatori su primorani da apsorbuju reaktivnu snagu iz mreže. GRPRS uspešno održava radnu tačku termoelektrane na maksimalnom dozvoljenom kapacitivnom nivou i sprečava

generatore da rade u oblasti van njihovih pogonskih karata, Slika 4a. Za vreme maksimalnog opterećenja prenosne mreže, na primer zimi (Slika 4b), radna tačka termoelektane se nalazi na naponsko-reaktivnoj karakteristici koju održava GRPRS, blizu maksimalno raspoloživog nivoa induktivne reaktivne snage.



Slika 4a: Dnevne reaktivne snage i VN napon, April 2012



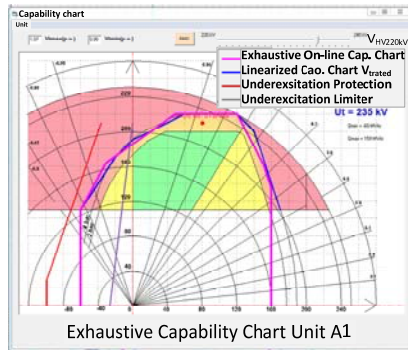
Slika 4b: Dnevne reaktivne snage i VN napon, Januar 2012

Na opisanom primeru je demonstrirana korist od implementacije GRPRS. Međutim, detaljnija analiza je potrebna da bi se optimizirale sezonske promene naponsko-reaktivnih karakteristika i reference napona.

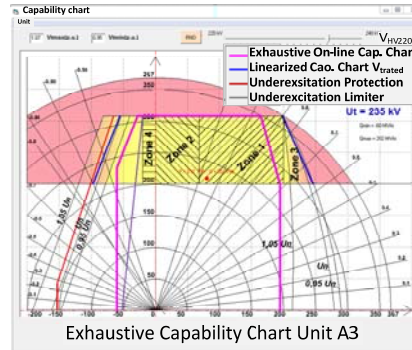
4. Optimalna raspodela reaktivne snage

Raspodela Q se automatski izvršava od strane Q kontrolera, Slika 2. Postavlja se pitanje koji kriterijum treba upotrebiti za optimizaciju Q raspodele. Sa aspekta prenosnog sistema, to je maksimizacija reaktivnih rezervi na svim generatorima. Polazeći od toga da generator koji prvi dostigne limit maksimalne pobudne struje pretvara svoje sabirnice iz P-V čvora u P-Q čvor, i tako doprinosi daljem padu napona u prenosnom sistemu kome već nedostaje Q, optimizacija prema navedenom kriterijumu izgleda logičan izbor. To znači da radne tačke svih generatora treba da budu podešene tako da su ekvidistantne u odnosu na kapacitivni i reaktivni limit određen generatorovom pogonskom kartom. U zoni induktivnog faktora snage pogonska karta generatora je ograničena termičkom slikom generatora, dominantno rotora, dok u zoni kapacitivnog faktora snage je pogonska karta dodatno sužena zbog granice stabilnosti. Sa systemske tačke gledišta, je takođe važno uzeti u obzir, u okviru modela, i dodatne elemente (generator, blok transformator, svu opremu direktno napojenu sa terminala generatora) putem formiranja modela ekvivalentnog generatora povezanog sa prenosnim sistemom s eksplicitnim uključenjem mogućnosti generatora. Stoga treba identifikovati detaljnu pogonsku kartu ekvivalentnog generatora u tački priključenja [7] i uključiti je u model. Pri tome treba uzeti u obzir uticaj mogućih varijacija kontrolnih promenljivih (podešenje generatorskog napona) kao i uticaj napona VN sabirnica na granične mogućnosti generatora [7]. Napred navedeno predstavlja jezgro podprograma za Q raspodelu koji je inkorporisan u algoritam rada GRPRS [5]. Pogonske karte implementirane u okviru GRPRS

za različite ekvivalentne generatore su prikazane na Slici 5a (generatori A1 i A2) i Slici 5b (generatori A3 i A4).



Slika 5a: Pogonska karta – generator A1



Slika 5b: Pogonska karta - generator A4sa Q tarifnim zonama

Nove pogonske karte uključuju originalne karte sa superponiranim ograničenjima pobudnog sistema, zaštite od podpobude i limitom reaktivne snage koji zavisi od veličine napona na VN sabirnicama. Zahtev za reaktivnu podršku pri radu sa obavezom održavanja faktora snage može biti nepraktičan pri niskom opterećenju (Slika 4a) ili uslovima niskog napona u prenosnoj mreži (Slika 4b). Pošto radna tačka takođe zavisi od napona prenosne mreže u tački priključenja, na koji utiče OS, onda OS direktno utiče na raspoloživu reaktivnu mogućnost generatora. Stoga GRPRS može izvršavati još dve dodatne funkcije: i) može pravovremeno slati informaciju o raspoloživim reaktivnim mogućnostima OS-u, ii) može služiti kao interfejs između kontrolnog centra i tržišnih operatora. Raspoloživa reaktivna snaga u bilo kom trenutku vremena može biti različita od ugovorne obaveze pošto na nju utiču radni uslovi u prenosnoj mreži koje kontroliše OS kao što utiče i veličina generatora i njegovo mesto u prenosnoj mreži [8]. GRPRS takođe može biti upotrebljen za određivanje cene proizvodnje reaktivne snage svakog generatora i tako posredno upotrebljen za lokalnu strukturu trgovanja reaktivnom snagom za potrebe prenosnog sistema. Na slici 5b je prikazano kako GRPRS može slati kontrolnom centru, u realnom vremenu, i informaciju o raspoloživoj reaktivnoj podršci prenosnoj mreži u tački priključenja termoelektrane i informaciju o tarifnoj zoni u kojoj generator trenutno radi. Definicije tarifnih zona [9] su van oblasti ovog rada i prikazane su na Slici 5b samo u svrhu ilustracije.

5. Zaključak

U radu je opisan razvijeni GRPRS upotrebljen za kontrolu VN naponsko-reaktivne karakteristike jedne termoelektrane i diskutovana je mogućnost

uključenja elektrana opremljenih sa GRPRS u budući sistem sekundarne kontrole napona Srpskog elektroenergetskog sistema. GRPRS može unaprediti ukupne tehno-ekonomske performanse elektroenergetskog sistema obezbeđujući pravovremene informacije Operatoru Sistema (OS) o raspoloživim reaktivnim mogućnostima pojedinih generatora. Mogućnost upotrebe razvijenog GRPRS radi određivanja cene usluge proizvodnje reaktivne snage i podrške lokalnom tržištu reaktivne snage su naročito naglašene. Na takav način GRPRS može biti upotrebljen kao "smart" uređaj sa otvorenim mogućnostima za komunikaciju bez dodatnih troškova.

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] H.Lefebvre, D. Fragnier, J.Y. Boussion, P. Mallet, M. Bulot, "Secondary coordinated voltage control system: feedback of EDF", *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE. Vol. 1. IEEE, 2000.*
- [2] J. B. Davies and L. E. Midford, "High side voltage control at Manitoba hydro," *Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE. Vol. 1. IEEE, 2000.*
- [3] S. Corsi, M. Pozzi, C. Sabelli, A. Serrani, "The Coordinated Automatic Voltage Control of the Italian Transmission Grid, Part II : Control apparatuses and field performance of the consolidated hierarchical system", *Power Systems, IEEE Transactions on Vol.19. No 4. 2004. pp 1733-1741.*
- [4] J. Dragosavac, Ž. Janda and J.V.Milanović, "PLC Based Model of Reactive Power Flow in Steam Power Plant for Coordinated Q-V Control", *Power Systems, IEEE Transactions on Vol.26. No 4. 2011. pp 2256-2263.*
- [5] J. Dragosavac, Ž. Janda and J.V.Milanović, "Coordinated Reactive Power – Voltage Controller for Multi Machine Power Plant", *Power Systems, IEEE Transactions on Vol.27. No 3. 2012. pp 1540-1549.*
- [6] J. Dragosavac, Ž. Janda, J.V.Milanović and D. Arnautović, "Robustness of Commissioned Coordinated Q-V Controller for Multi-machine Power Plant", *Power Systems, IEEE Transactions on Vol.28. No 2. 2013. pp 1415-1424.*
- [7] J. Dragosavac, Z. Janda, J.V. Milanovic, D. Arnautovic and B. Radojicic, "On-line Estimation of Available Generator Reactive Power for Network Voltage Support", *(8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER 2012), 1-3 Oct. 2012, page 30).*

- [8] J. Z.,E. Nobile, A. Bose, and K. Bhattacharya, "Localized Reactive Power Markets Using the Concept of Voltage Control Areas", *Power Systems, IEEE Transactions on* Vol.19. No 3. 2004. pp 1555-1561.
- [9] A.Rabiee, H.A.Shayanfar, N. Amjady, "Reactive Power Pricing", *Power and Energy Magazine, IEEE*, Vol.7, No 1, January-February 2009, pp 18 – 32.

Abstract: The paper, discusses the possibility to use coordinated Q-V controller (CQVC) to perform secondary voltage control at the power plant level. The CQVC performs the coordination of the synchronous generators' (SG) reactive power outputs in order to maintain the same total reactive power delivered by the steam power plant (SPP), while at the same time maintaining a constant voltage with programmed reactive droop characteristic at the SPP HV busbar. This busbar is the natural pilot node for secondary voltage control at HV level as the node with maximum power production and maximum power consumption. In addition to voltage control, the CQVC maintains the uniform allocation of reactive power reserves at all SGs in the power plant. This is accomplished by setting the reactive power of each SG at given operating point in accordance to the available reactive power of the same SG at that point. Different limitations imposed by unit's and plant equipment are superimposed on original SG operating chart (provided by the manufacturer) in order to establish realistic limits of SG operation at given operating point. The CQVC facilitates: i) practical implementation of secondary voltage control in power system, as it is capable of ensuring delivery of reactive power as requested by regional/voltage control while maintaining voltage at system pilot node, ii) the full deployment of available reactive power of SGs which in turn contributes to system stability, iii) assessment of the reactive power impact/contribution of each generator in providing voltage control as ancillary service. Furthermore, it is also possible to use CQVC to pricing reactive power production cost at each SG involved and to design reactive power bidding structure for transmission network devices by using recorded data. Practical exploitation experience acquired during CQVC continuous operation for over two years enabled implementation of the optimal setting of reference voltage and droop on daily, monthly and seasonal basis. Finally, the paper suggests and elaborates on studies related to application of several coordinated Q-V controllers in power system to facilitate secondary voltage control. It is shown that the CQVC can be used to maintain desired voltage at assigned pilot node in the power system with predefined reactive droop characteristic, and such maintain the required voltage profile across the transmission network based on commands received from upper hierarchical control level.

Keywords: coordinated reactive power – voltage control, secondary voltage control, reactive power, reactive power reserves

Assessment of the Operating Conditions of Coordinated Q–V Controller within Secondary Voltage Control System

Rad primljen u uredništvo 20.10.2014. godine
Rad prihvaćen 28.10. 2014. godine