

Algoritam realizacije raspodele reaktivne snage „prema generatoru“ u termoelektrani Nikola Tesla A

Jelena Pavlović^{1, 2}, Bojan Radojčić³, Lazar Stančić³, Jasna Dragosavac², Sava Dobričić², Žarko Janda²

¹ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

² Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

³ JP EPS - Ogranak Termoelektrane Nikola Tesla, Obrenovac, Srbija

jelena.pavlovic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu je prikazan algoritam realizacije raspodele reaktivne snage „prema generatoru“. Raspodela „prema generatoru“ i raspodela „prema mreži“ su dva načina raspodele reaktivne snage koje koristi grupni regulator reaktivne snage (GRRS). Raspodela „prema generatoru“ obezbeđuje ravnomerno grejanje generatora dok raspodela „prema mreži“ obezbeđuje maksimalnu rezervu reaktivne snage i u pravcu povećanja i u pravcu sniženja generisane reaktivne snage. Raspodela reaktivne snage „prema generatoru“ je kompleksnija za realizaciju jer se može desiti da kriterijum raspodele obuhvata širu radnu oblast generatora po reaktivnoj snazi od pogonske karte. U tim situacijama je potrebno uvesti dodatno ograničenje reaktivne snage generatora, dok drugi generatori preuzimaju preostalu reaktivnu snagu, i dalje poštujući kriterijume raspodele reaktivne snage „prema generatoru“ i vodeći računa o ograničenjima preostalih generatora. Metode raspodele reaktivnih snaga ilustrovane su primerima rada van i u graničnom režimu. Na kraju su prikazani rezultati rada GRRS kada je aktivna raspodela „prema generatoru“, kao verifikacija algoritma i njegove realizacije.

Ključne reči: grupna regulacija, reaktivna snaga, sinhroni generator, reaktivna rezerva

1. Uvod

U toku rada grupne regulacije reaktivne snage (GRRS) dve metode raspodele reaktivne snage su se pokazale kao efikasne, raspodela „prema mreži“ i raspodela „prema generatoru“ [1], [2]. Raspodela „prema mreži“ vodi računa o dva kriterijuma, rezervi reaktivne snage i naponu na krajevima generatora. Ukupan opseg reaktivne snage je od Q_{\min} do Q_{\max} generatora, pri čemu se za određivanje Q_{\min} i Q_{\max} bira najstroži uslov između pogonske karte i zahteva po naponu na krajevima generatora. Reaktivna snaga se raspodeljuje među generatorima tako da svi budu procentualno podjednako opterećeni u odnosu na njihov ukupni opseg. Vrednost opterećenja generatora reaktivnom snagom u odnosu na njegov ukupni raspoloživi opseg u procentima naziva se koeficijent opterećenja, ili k_{opt} .

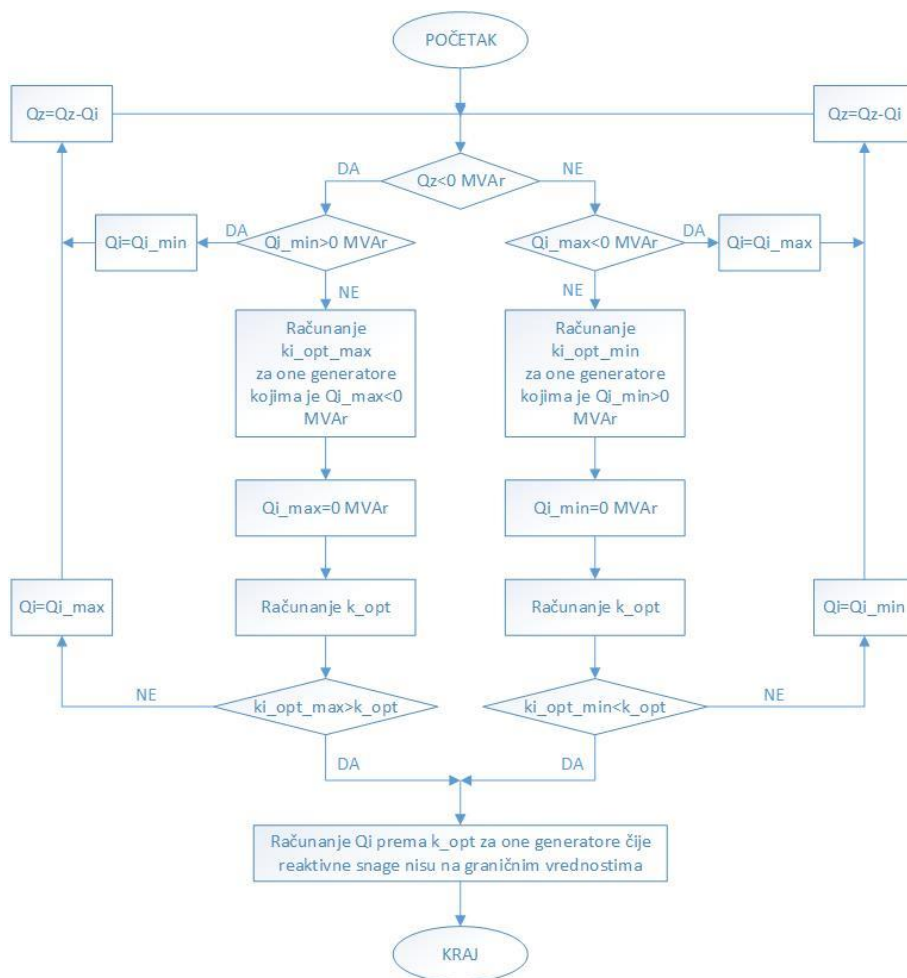
Raspodela „prema generatoru“ uzima u obzir iste uslove kao i raspodela „prema mreži“ i na taj način se izračunavaju identične granične vrednosti opsega, Q_{\min} i Q_{\max} , kao i u raspodeli „prema mreži“. Međutim, raspodela „prema generatoru“ uzima u obzir znak potrebne reaktivne snage i celokupni radni opseg deli na induktivni i kapacitivni deo. Ako je ukupna zahtevana reaktivna snaga svih generatora koji su u GRRS veća od nule, reaktivna snaga se među generatorima raspoređuje tako da svi budu procentualno ravnomerno raspoređeni u odnosu na opseg $[0 \text{ Mvar}, Q_{\max}]$, tj. u odnosu na induktivni deo ukupnog opsega. Slično, ako je ukupna željena reaktivna snaga manja od nule, reaktivna snaga će se rasporediti među generatorima tako da svi budu ravnomerno opterećeni u odnosu na kapacitivni deo radnog opsega, tj. na $[Q_{\min}, 0 \text{ Mvar}]$. Ovim načinom raspodele reaktivnih snaga se postiže ravnomernije zagrevanje generatora, uz odstupanja od ravnomerne raspodele reaktivne rezerve [2]. Koeficijent opterećenja se u ovom slučaju računa kao odnos ostvarene reaktivne snage generatora i kapacitivnog/induktivnog dela radnog opsega $[Q_{\min}, Q_{\max}]$ u zavisnosti od znaka ukupne zahtevane reaktivne snage.

2. Specifični zahtevi za realizaciju algoritma i njegov prikaz

Na Termoelektrani Nikola Tesla A (TENT A) pogonske karte A1 i A2 su takve da se pri visokim aktivnim snagama ceo radni opseg nalazi u induktivnoj radnoj oblasti, $Q_{\min} > 0 \text{ Mvar}$. U slučaju da se pri velikim aktivnim snagama zahteva rad u kapacitivnom režimu, generatori kojima je $Q_{\min} > 0 \text{ Mvar}$ se održavaju na Q_{\min} , dok preostali generatori idu dublje u kapacitivnu oblast. Ovo je slučaj kada je razlika između raspodele „prema mreži“ i raspodele „prema generatoru“ najizraženija. Slično, čak i kada je zahtevana ukupna reaktivna snaga veća od 0 Mvar, budući da je radni opseg u odnosu na koji se gleda $k_{\text{opt}} [0 \text{ Mvar}, Q_{\max}]$, može se desiti (pri velikim aktivnim snagama) da je izračunata reaktivna snaga koju generator treba da ostvari manja od Q_{\min} .

Tada se reaktivna snaga tog generatora postavlja na Q_{\min} , a nastala razlika u reaktivnoj snazi se preraspodeljuje među preostalim generatorima.

Na slici 1 prikazan je algoritam raspodele reaktivne snage „prema generatoru“ koji uzima u obzir specifičnosti pogonskih karti za generatore A1 i A2. Štaviše, algoritam je univerzalan i vrši očekivanu raspodelu reaktivne snage bez obzira to da li su Q_{\min} i Q_{\max} generatora u induktivnoj oblasti, kapacitivnoj oblasti, ili radni opseg ima i kapacitivni i induktivni deo. Na slici je prikazana provera samo jednog, i-tog generatora u pogledu dozvoljenog radnog opsega. Ta provera se ponavlja za svaki generator koji je uključen u GRRS, pre konačnog izračunavanja reaktivnih snaga za svaki generator i izdavanja komandi.



Slika 1. Algoritam raspodele reaktivne snage „prema generatoru“

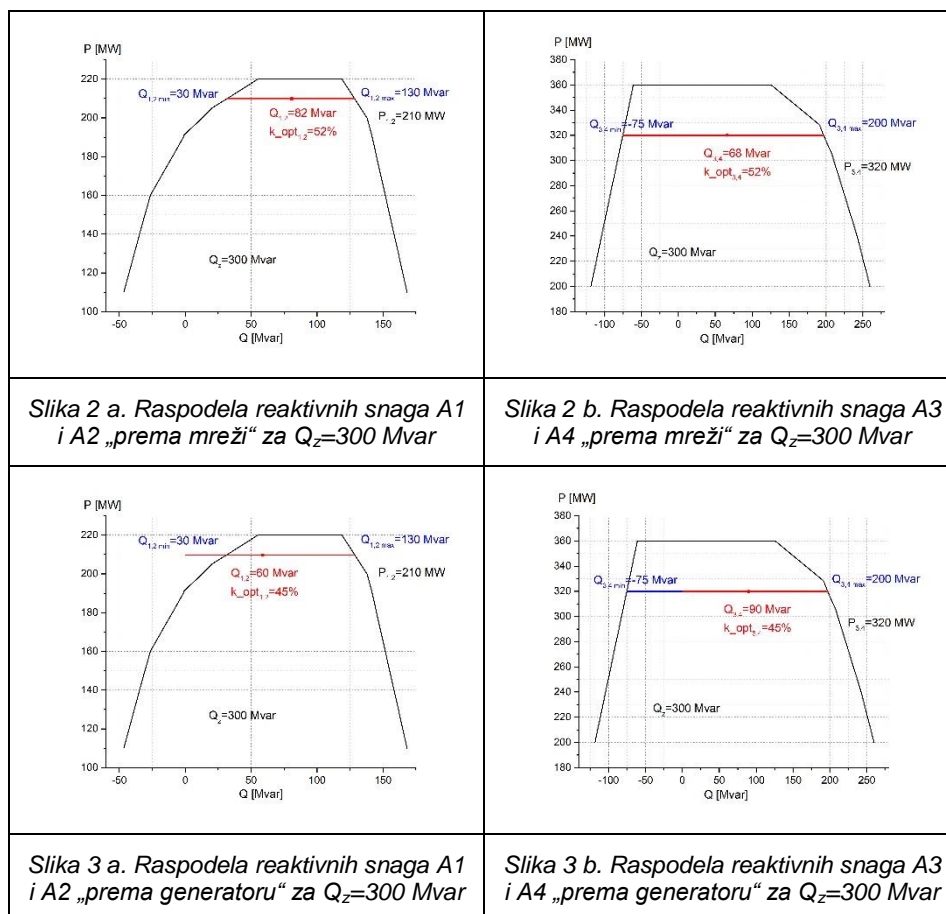
Kada je potrebno da se reaktivna snaga generatora fiksira na graničnu vrednost opsega, tada drugi generatori koji su uključeni u GRRS preuzimaju deo zahteva za reaktivnom snagom koji prvi generator nije mogao da ispuni. Tada je ponovo potrebno izvršiti algoritam raspodele reaktivne snage za slučaj da neki od preostalih generatora ne može na ispuni novonastale zahteve. Stoga se ovaj algoritam izvršava onoliko puta koliko se generatora fiksira na minimalnu ili maksimalnu vrednost svog reaktivnog opsega. Tek nakon provere da se više ni jednom novom generatoru ne fiksira reaktivna snaga, tj. kada su zahtevi za reaktivnom snagom ka svim preostalim generatorima unutar njihovih radnih opsega, GRRS izdaje komande ka pobudama svih generatora uključenih u grupnu regulaciju.

3. Primeri raspodele reaktivne snage

Pretpostavimo da su generatori A1, A2, A3 i A4 uključeni u GRRS i opterećeni aktivnim snagama $P_1=P_2=210$ MW i $P_3=P_4=320$ MW. Takođe pretpostavimo da su dominantna ograničenja generatora po pogonskim kartama, a ne po naponima na krajevima generatora. Tada imamo da je za A1 i A2 $Q_{\min}=30$ Mvar i $Q_{\max}=130$ Mvar, a za A3 i A4 $Q_{\min}=-75$ Mvar i $Q_{\max}=200$ Mvar. Radni opsezi su označeni crvenom linijom na slikama 2 i 4. Ukupan radni opseg sva četiri generatora je [-90 Mvar; 660 Mvar].

Neka je zadata ukupna reaktivna snaga $Q_z=300$ Mvar. Na slici 2 i 3 prikazane su izračunate reaktivne snage po generatorima za raspodelu reaktivnih snaga „prema mreži“ i „prema generatoru“ respektivno. Uz vrednosti reaktivnih snaga u Mvar date su i vrednosti koeficijena opterećenja u %. Vidi se da su za obe raspodele koeficijenti opterećenja isti za sve generatore i podudaraju se sa odnosom ukupne željene reaktivne snage i ukupnog radnog opsega. Razlika u vrednosti koeficijenta opterećenja pri primeni različitih raspodela posledica je redefinisivanja radnog opsega u raspodeli „prema generatoru“ koja se u ovom slučaju svodi na opseg [0 Mvar, Q_{\max}].

Na slici 3 a uočljivo je da je taj radni opseg širi od dozvoljene radne oblasti prema pogonskoj karti. Sledeći primer prikazuje rad generatora u graničnom režimu u slučaju male zahtevane reaktivne snage. Uslovi, aktivne snage i granice su isti kao i u prethodnom primeru, ali je sada zahtevana vrednost ukupne reaktivne snage $Q_z=40$ Mvar. Na slikama 4 i 5 prikazane su raspodele reaktivnih snaga u ovom slučaju za raspodelu „prema mreži“ i „prema generatoru“ respektivno. U raspodeli „prema mreži“ radni opseg je u celosti ostvariv, pa se sva četiri generatora opterećuju jednako, po 17% tog opsega. Međutim, u raspodeli „prema generatoru“, posmatrajući samo opseg, reaktivne snage generatora 1 i 2 bi se nalazile van pogonske karte. Zato se one drže na minimalnoj dozvoljenoj vrednosti od 30 Mvar, dok se preostala reaktivna snaga ravnomerno raspoređuje na generatore A3 i A4.

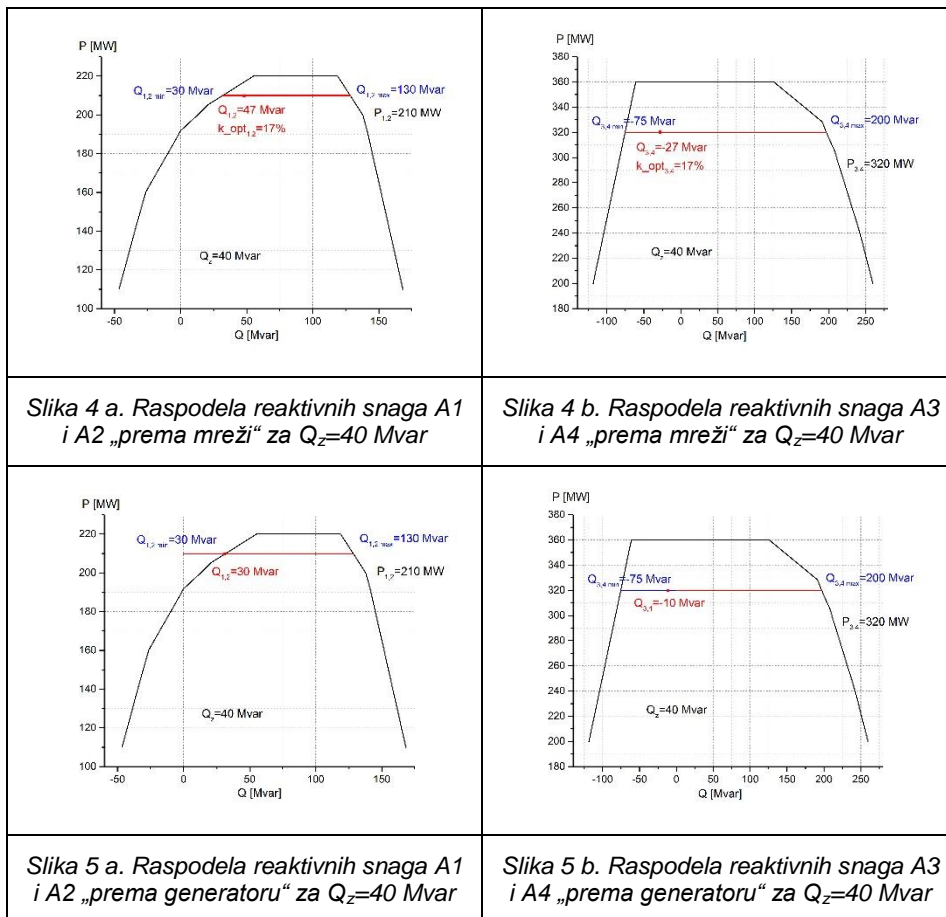


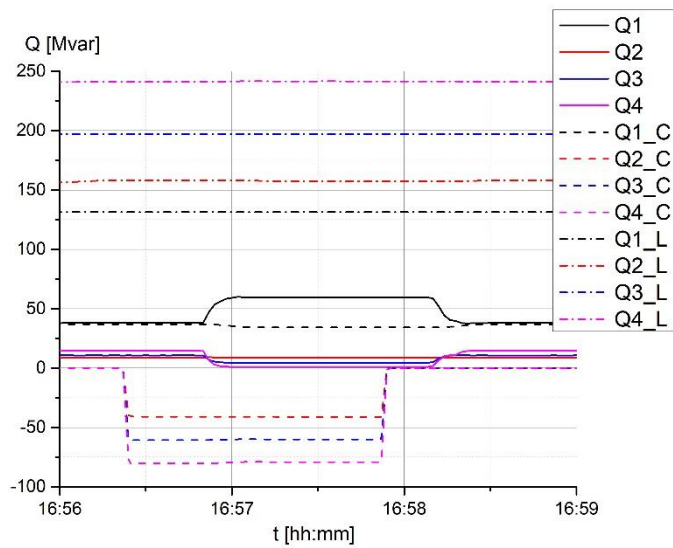
4. Rezultati rada algoritma

Na slikama 6 i 7 prikazan je primer rada GRRS na simulatoru termoelektrane Nikola Tesla A prilikom promene načina raspodele reaktivne snage. Na slici 6 prikazane su ostvarene reaktivne snage generatora A1, A2 A3 i A4, kao i njihove minimalne i maksimalne dozvoljene vrednosti koje je GRRS proračunao u datim uslovima. Na slici 7 prikazani su koeficijenti opterećenja po reaktivnoj snazi svakog od generatora za isti vremenski period. Sva četiri generatora su bila uključena u grupnu regulaciju.

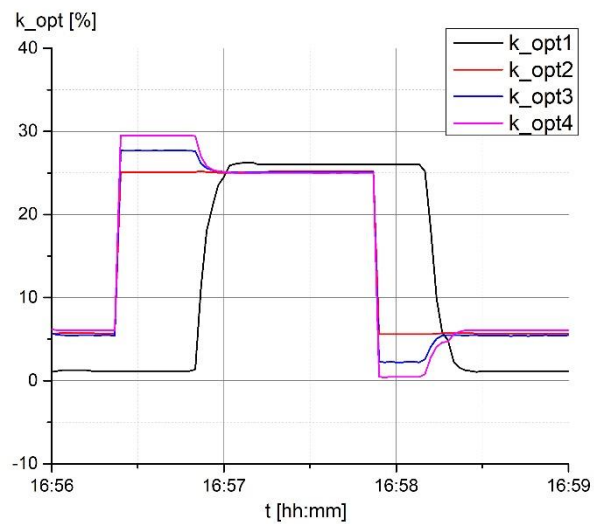
Na početku je izabrani način raspodele reaktivne snage bio „prema generatoru“ pa je u trenutku 16:56:24 promenjen u način raspodele „prema mreži“. Kako je ukupna zahtevana reaktivna snaga veća od nule, prema načinu raspodele „prema generatoru“, granice u kapacitivnom režimu generatora koje su prema pogonskoj karti negativne postavljaju se na nulu.

Donja granica reaktivne snage za generator A1 je prema pogonskoj karti veća od nule i ona zadržava svoju vrednost. Nakon promene načina raspodele reaktivne snage na „prema mreži“ donje dozvoljene vrednosti reaktivne snage za generatore A2, A3 i A4 se određuju prema pogonskim kartama i nalaze se u kapacitivnoj oblasti. Sa promenom granica generatora A2, A3 i A4 menjaju se i koeficijenti opterećenja tih generatora i oni se sada bitno razlikuju od koeficijenta opterećenja generatora A1. GRRS vrši svoju funkciju uspostavljanja ravnomerne raspodele reaktivnog opterećenja među generatorima i povećava reaktivnu snagu generatora A1 i smanjuje reaktivnu snagu generatora A2, A3 i A4. Na slici 7 uočljivo je izjednačavanje koeficijenata opterećenja generatora nakon dejstva GRRS (trenutak 16:57:06).





Slika 6. Preraspodela reaktivne snage pri promeni načina raspodele na simulatoru



Slika 7. Koeficijenti opterećenja generatora reaktivnom snagom pri promeni načina raspodele na simulatoru

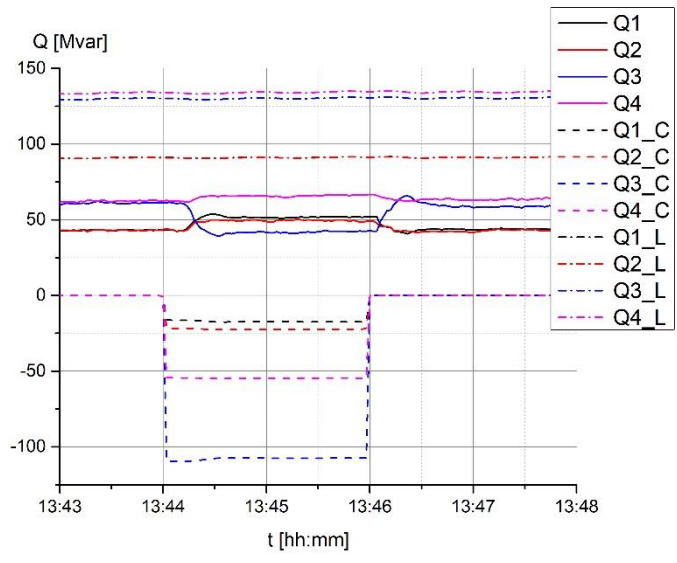
Nakon kratkog vremena, u trenutku 16:57:52 ponovo se prelazi na način raspodele reaktivne snage „prema generatoru“. Minimalna ograničenja po reaktivnoj snazi za generatore A2, A3 i A4 se postavljaju na nulu, što dovodi do promene koeficijenata opterećenja generatora. GRRS ponovo reaguje sa ciljem njihovog izjednačavanja. Na slici 6 se još može uočiti da prilikom promene načina raspodele reaktivne snage ne dolazi do promene ukupne reaktivne snage generatora na 220 kV naponskom nivou.

Na slikama 8 i 9 prikazan je primer rada GRRS prilikom promene načina raspodele reaktivne snage na termoelektrani Nikola Tesla A. Na slici 8 prikazane su ostvarene reaktivne snage generatora A1, A2 A3 i A4, kao i njihove minimalne i maksimalne dozvoljene vrednosti koje je GRRS proračunao u datim uslovima. Na slici 9 prikazani su koeficijenti opterećenja po reaktivnoj snazi svakog od generatora za isti vremenski period. Sva četiri generatora su bila uključena u grupnu regulaciju.

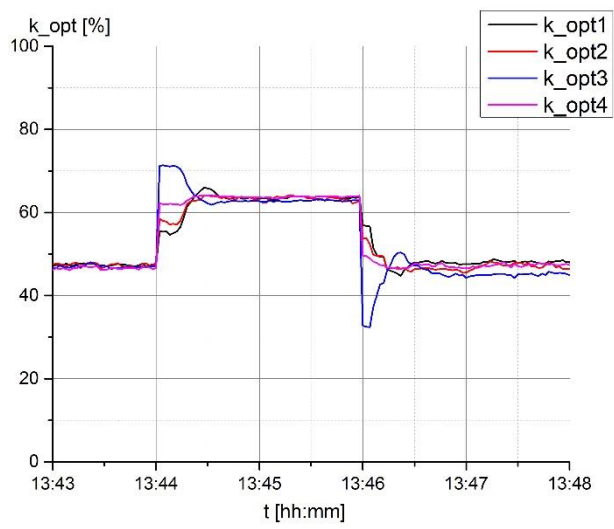
U početku je izabran način raspodele reaktivne snage bio „prema generatoru“. U 13:44 način raspodele je promenjen na „prema mreži“, da bi u 13:46 ponovo bio vraćen u „prema generatoru“. Prilike u elektrani su bile takve da su minimalna ograničenja po pogonskim kartama svih genetarota bila manja od nule i da je minimalno ograničenje generatora A3 bilo znatno manje u odnosu na ostale mašine. Zato je, prilikom prelaska iz načina raspodele „prema generatoru“ na „prema mreži“, došlo do smanjenja reaktivne snage generatora A3 i kompenzacije potrebne reaktivne snage preostalim agregatima. Uočljive su približno iste vrednosti koeficijenata opterećenja nakon dejstva GRRS, kao i održavanje iste ukupne reaktivne snage bez obzira na izabrani način raspodele reaktivne snage.

5. Zaključak

U grupnom regulatoru reaktivne snage može se izabrati jedan od dva načina raspodele reaktivnih snaga, „prema mreži“ ili „prema generatoru“. Realizacija raspodele „prema generatoru“ na TENT A se pokazala specifičnom zbog oblika pogonskih karti pri velikim aktivnim snagama za generatore A1 i A2, kada generator može raditi isključivo u induktivnom režimu. U situacijama zahtevane male ukupne reaktivne snage (ili čak negativne) reaktivna snaga tog generatora se postavlja na njegov minimum, a preostala zahtevana reaktivna snaga raspoređuje na agregate koji su u povoljnijim radnim režimima. To se postiže nizom provera u algoritmu, kako svakog generatora ponaosob, tako i uticaja fiksiranja reaktivne snage jednog generatora na preostale. Provere su realizovane nizom softverskih petlji koje se izvršavaju sve dok se ne izoluju svi generatori koji će raditi na svojim granicama po reaktivnoj snazi, a preostala reaktivna snaga se ne raspodeli na one generatore koji takvom raspodelom neće ući u zabranjenu oblast rada. Tek nakon pronalaženja optimalne raspodele GRRS će izdati komande pobudama.



Slika 8. Preraspodela reaktivne snage pri promeni načina raspodele na elektrani



Slika 9. Koficijenti opterećenja generatora reaktivnom snagom pri promeni načina raspodele na elektrani

Zahvalnica

Ovaj rad je podržalo Ministarstvo nauke, tehnološkog razvoja i inovacija u okviru programa o realizaciji i finansiranju naučnoistraživačkog rada NIO u 2022. godini

Literatura

- [1] J. Dragosavac, Ž. Janda, J. Pavlović, Z. Ćirić, "Reactive Power Dispatching Among Generating Units Connected to Point of Common", *13th IEEE PowerTech 2019* (Milano, Italy, June 23-27, 2019)
- [2] J. Pavlović, B. Radojičić, L. Stančić, J. Dragosavac, S. Dobričić, Ž. Janda, „Komparativna analiza različitih metoda dispečinga reaktivnih snaga između generatora u elektrani“, *35. Savetovanje CIGRE Srbija 2021* (Zlatibor 2021.)

Abstract. The algorithm of reactive power dispatching "per generator" realization is presented in the paper. Dispatching "per generator" and "per grid" are two modes of reactive power dispatching used by coordinated reactive power and voltage regulator (GRRS). Reactive power dispatching "per generator" ensures equal heating of the generators, while dispatching "per grid" ensures maximal reactive power reserve when generated reactive power either increases, or decreases. Reactive power dispatching "per generator" is more complex for realization because the dispatching criterion may have wider generator's reactive power operation area than the working capability curve. In these cases, the additional limiting of the generator reactive power is necessary, while other generators take over the remaining reactive power, still considering the reactive power dispatching criteria "per generator" and the limits of the remaining generators. Both reactive power dispatching modes are presented in two examples, while operating near and far from the limit area. Eventually, as the verification of the algorithm and its realization, the operating results of GRRS while dispatching "per generator" is active, are presented.

Keywords: joint control, reactive power, synchronous generator, reactive reserve.

Algorithm of Reactive Power Dispatching “per generator” Realization on TPP Nikola Tesla A

Jelena Pavlović, Bojan Radojičić, Lazar Stančić, Jasna Dragosavac,
Sava Dobričić, Žarko Janda

Rad primljen u uredništvo: 24.12.2022. godine.

Rad prihvaćen: 28.12.2022. godine.

