

MOGUĆNOSTI RACIONALIZACIJE POTPOBUĐENIH REŽIMA RADA GENERATORA U EES SRBIJE

Dragan P.Popović, Miloš Stojković i Zoran Božović
Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd

Kratak sadržaj: U radu se sagledavaju potrebe za potpobuđenim režimima rada generatora u EES Srbije, kao i efekti takvih režima. Rezultati sprovedenih analiza minimalnih stanja prenosne mreže Srbije za vremenski horizont do 2025. godine, ukazali su na veliki praktičan značaj adekvatnog izbora naponskih referenci generatora na uspostavljene naponsko-reaktivne prilike. Primena razvijene metode upravljanja naponima ukazala je na realne mogućnosti racionalizacije potpobuđenih režima, kada se neizbežni "teret" ovih režima ravnomerno raspodeli na generatore koji su osposobljeni za to, odnosno da se to uradi srazmerno njihovim stvarnim mogućnostima i ograničenjima.

Ključne reči: potpobuđeni režimi, generatori, racionalizacija, EES Srbije

1. UVOD

Sa razvojem elektroenergetskih sistema (EES-a) i pojavom relativno dužih dalekovoda vrlo visokih napona, uz povećanje faktora snage potrošača, režimi tzv. malih opterećenja, odnosno minimalna stanja, dobili su poseban značaj. To je u prvom redu povezano sa činjenicom da u tim stanjima, najčešće reaktivna kapacitivna snaga generisana od strane dalekovoda prevazilazi induktivno opterećenje i gubitke reaktivne snage u mreži. U takvim pogonskim stanjima, pojava nekompensovanog "viška" reaktivne snage dovodi do povećanja napona u mreži do nivoa, pri kojem u skladu sa statičkim karakteristikama potrošača dolazi do uspostavljanja balansa reaktivne snage. Ako bi se taj balans reaktivnih snaga ostvarivao pri vrednostima napona koje prevazilaze maksimalno dozvoljene vrednosti za dati naponski nivo, neophodna je bila primena niza različitih mera usmerenih, bilo na smanjenju generisane reaktivne kapacitivne snage (isključenje jednog od paralelnih vodova, što je nepopularno, jer ugrožava sigurnost, isključenje statičkih kondenzatora i dr.), bilo na povećanju reaktivnog opterećenja (podešavanje izvoda transformatora na maksimalni prenosni odnos, rad sinhronih generatora i kompenzatora u potpobudi, poprečna kompenzacija kapacitivne provodnosti vodova primenom otočnih reaktora-prigušnica, uključenje rezervnih transformatora u paralelan rad i dr.).

Ugradnja otočnih reaktora-prigušnica je efektivna mera za poboljšanje balansa reaktivne snage u minimalnim stanjima, ali je praćena znatnim investicionim ulaganjima i odgovarajućim eksploatacionim problemima. S toga, u dosadašnjoj praksi ovi reaktori su ugrađivani tada, kada se prethodno iscrpe sve prethodno nabrojane mogućnosti, čiji je izvor sam EES, tj. njegova tzv. "unutrašnja rezerva", izražena u pravilnom i racionalnom korišćenju performansi njegovih elemenata. Znači, ako se želelo da se za izvesno vreme izbegne ugradnja relativno skupih prigušnica, ili pak da se ostvare odgovarajuće uštede u njihovom broju i snazi, a pomenute mere su se pokazale kao nedovoljne, nužno se nametala potreba za prevođenjem sinhronih generatora u režim

reaktivne kapacitivne snage. U tim i takvim uslovima, generatori postaju apsorberi nekompenzovanog "viška" reaktivne snage.

Primena potpobuđenih režima generatora u doba minimalnih opterećenja, danas je široko rasprostranjena u svetu. Paralelno sa razvojem EES-a, podrobnije je bila proučavana priroda, karakter i efekti potpobuđenih režima rada generatora. Najpre su oni bili kategorisani kao abnormalni režimi (a susretale se i formulacije - prinudni i izuzetni režimi). Zatim, sa sticanjem novih saznanja i praktičnih iskustava, bili su kategorisani kao specijalni režimi, što i odgovara njihovoj suštini.

Imajući u vidu da je prevođenje u potpobuđeni režim rada vezano sa sniženjem napona u izvornim tačkama sistema, jedno od ograničenja je minimalno dozvoljeni napon na visokonaponskoj strani generatora, odnosno na njegovim izvodima, s obzirom na rad sopstvene potrošnje i lokalnih potrošača. Sa aspekta samog generatora, s obzirom na nisku vrednost pobudne struje, ograničenje nameće obezbeđenje potrebne rezerve stabilnosti, što je posebno karakteristično za savremene turboagregate sa realtivno visokim tehničkim minimumom. S druge strane, u režimu potpobude dolazi do povećanja komponente fluksa rasipanja duž ose statora, što može da dovede do prekomernih zagrevanja konstrukcionih elemenata čeone zone generatora. Pojava ovih nestandardnih zagrevanja takođe je naročito bila izražena kod savremenih turbogeneratora velikih jediničnih snaga sa neposrednim hlađenjem, kod kojih zbog visokog iskorišćenja aktivnog materijala, gabarit nije bio u srazmeri sa povećanjem snage.

Sa ovim novim saznanjima, bilo je omogućeno da se pouzdanije definišu realna ograničenja u primeni potpobuđenih režima rada generatora, koji spadaju u kategoriju tzv. eksploatacionih mera, a uvođenjem odgovarajućih dopuna u automatici generatora (ograničivač minimalne pobude), bila je obezbeđena potrebna sigurnost u radu. Dakle, ako se striktno respektuju realna ograničenja u realnom pogonu, u pitanju je jedna jednostavna i efikasna mera, koju ujedno prati visoka ekonomičnost. Ona ne zahteva neke posebne nove investicije, sem onih, koje se odnose na obezbeđenje uslova za racionalnu upotrebu ovih režima.

Problematika naponsko-reaktivnih prilika u minimalnim stanjima, postala je posebno značajna i aktuelna i u našem EES, uvođenjem naponskog nivoa 400 kV [1] i daljim intenzivnim razvojem prenosne mreže naponskog nivoa 400 kV. Međutim, u dotadašnjoj praksi u nas (osma decenija prošlog veka), za razliku od prakse drugih elektroprivreda, potpobuđeni režimi rada nisu se koristili u praksi, u skladu sa mogućnostima. Razlozi za to su bili, počev od do tada stečenih navika pogonskog osoblja da elektrana ne radi u potpobudi, nedostatak preciznijih podataka o ograničavajućim faktorima u tim režimima (raspolagalo se sa pogonskim dijagramima u kojima su bile inkorporirane samo tzv. "teorijske" granice stabilnosti), nepostojanje odgovarajuće opreme za registraciju reaktivne kapacitivne snage i dr., a sve zajedno je bilo u tesnoj vezi sa činjenicom da tada u EES bivše Jugoslavije nije bilo posebno zaoštro pitanje minimalnih stanja.

S druge strane, na teorijskom planu u nas, istraživanjima potpobuđenih režima rada posvećivana je odgovarajuća pažnja [2-10]. Ona su bila započeta uprošćenim i parcijalnim prilazima, da bi se u skladu sa razvojem potrebnih metodologija i metoda, sticanjem novih saznanja u pogledu relevantnih ograničavajućih faktora, kao i zahtevima realnog pogona EES, istraživanja proširila na kompletni EES. Time su dobijene pouzdanije osnove za procenu realnih potreba za potpobuđenim režimima

gledajući EES u celini, sagledavajući dalji razvoj prenosne mreže naponskog nivoa 400 kV u bivšoj Jugoslaviji, kao i osnove za realnije utvrđivanje onih ograničavajućih faktora koji imaju tzv. sistemski karakter. Imajući u vidu da se u takvim pogonskim stanjima smanjuje rezerva statičke (ugaone) stabilnosti, toj problematici je bila posvećena posebna pažnja.

Prvi koraci su bili izrada studije rada sinhronih generatora u potpobudi u sistemu Srbije [2], u okviru koje su utvrđena ograničenja u primeni potpobuđenih režima rada [3]. Pokazano je da su ograničenja, vezana za zagrevanje čeonice zone rotora i statora generatora, znatno oštrija u odnosu na ograničenja koja nameće statička stabilnost, što je naredna pogonska praksa i potvrdila. Da bi se dobila kompletnija slika, izvršena je i analiza uticaja multiagregatnosti na statičku stabilnost generatora, koji imaju automatske regulatore pobude proporcionalnog dejstva, u potpobuđenom režimu rada [4, 5]. Fenomen multiagregatnosti (prisustvo više generatora identičnih parametara u elektrani) je, uz analizu stabilnosti tzv. osnovnog kretanja (ekvivalentni generator u odnosu na sistem), uveo i analizu stabilnosti tzv. relativnog kretanja (interakcija generatora u višeagregatnoj elektrani). U ovom analizama, uspešno je bila primenjena poznata metoda D-razvoja (projektovanje granice statičke stabilnosti u ravni relevantnih parametara sistema regulacije pobude). Zatim, u radu [6] bio je formiran generalizovani matematički model statičke stabilnosti EES-a sa proizvoljnim brojem višeagregatnih elektrana.

U daljem radu na problematici statičke stabilnosti EES-a, došlo je do značajnog unapređenja metodologije. Korišćena je tada veoma atraktivna forma prostora stanja, u okviru multimašinskog prilaza. Izvršena je linearizacija aktuelnih diferencijalnih jednačina, uz formiranje odgovarajućih matrica stanja, čije sopstvene vrednosti su indikatori (ne)stabilnosti [7, 8]. Ova unapređena metodologija je primenjena u okviru studije [9], koja se bavila analizom potpobuđenih režima rada turbogeneratora TE Nikola Tesla A i B [9], čiji su glavni rezultati bili izloženi u [10]. Pokazano je da potpobuđeni režimi rada elektrana, u okviru utvrđenih mogućnosti, odnosno granica, u značajnoj meri relaksiraju naponsko-reaktivne prilike u minimalnim stanjima EES-a bivše Jugoslavije, pri čemu je sagledan posebni doprinos TE N. Tesla A i B, s obzirom na veličinu i položaj ovih termoelektrana. Takođe, i u ovim uslovima, pokazano je da su ograničenja, vezana za zagrevanje čeonice zone rotora i statora generatora, znatno oštrija u odnosu na ograničenja koja nameće obezbeđenje potrebne rezerve statičke stabilnosti. To je potvrdila i dosadašnja pogonska praksa.

Osnovni cilj ovoga rada, uz prethodno datu kraću rekapitulaciju kako je u nas problematika potpobuđenih stanja generatora tretirana u prošlosti, da, u okviru raspoloživog prostora, izloži stečena nova saznanja na ovoj veoma važnoj problematici. Najpre će biti utvrđivane globalne potrebe za potpobuđenim stanjima generatora, za ostvarena i perspektivno sagledana minimalna stanja EES-a Srbije, na bazi analize mogućnosti ostvarenja bilansa reaktivne snage. Dalje, biće reči o relevantnim efektima primene potpobuđenih režima rada generatora, vezanih za zagrevanje čeonih delova statora generatora i obezbeđenje potrebne rezerve statičke i tranzijentne stabilnosti. Zatim, biće reči o daljim unapređenjima računarskog programa *VOLTCONT*, koja se odnose na utvrđivanje mogućnosti harmonizacije potpobuđenih režima rada generatora u EES Srbije. Na kraju, daju se neki od karakterističnih primera primene unapređene verzije ovoga računarskog programa, za perspektivno sagledano minimalno stanje EES-a Srbije, za 2020. godinu.

2. SAGLEDAVANJE GLOBALNIH POTREBA ZA POTPOBUĐENIM REŽIMIMA RADA GENERATORA U EES SRBIJE

Za objašnjenje globalnih odnosa u minimalnim stanjima poslužiće sledeća jednačina balansa reaktivnih snaga posmatranog EES-a, koji radi u interkonekciji sa susednim EES:

$$\sum Q_G + \sum Q_V = \sum Q_P + \sum Q_{PR} + \sum Q_g + \sum Q_S \quad (1)$$

gde je:

$\sum Q_G = \sum Q_{GI} + \sum Q_{GC}$ - ukupna reaktivna snaga izvora u razmatranom EES, koja se u opštem slučaju izražava kao algebarski zbir reaktivne induktivne Q_{GI} (+Mvar) i kapacitivne Q_{GC} (-Mvar) snage;

$\sum Q_V$ - ukupna reaktivna snaga generisana od strane kapaciteta vodova;

$\sum Q_P$ - ukupna reaktivna snaga potrošača;

$\sum Q_{PR}$ - ukupna reaktivna snaga uključenih prigušnica, ako one postoje;

$\sum Q_g$ - ukupni gubici reaktivne snage u razmatranom EES;

$\sum Q_S$ - total razmene reaktivne snage sa susedima (algebarski zbir tokova reaktivnih snaga po interkonektivnim dalekovodima razmatranog EES-a).

Generalno gledano, za jednu već formiranu mrežu ili varijantu njenog daljeg razvoja, fundamentalni uticaj na veličinu generisanja od strane dalekovoda ($\sum Q_V$) imaju njeni pogonski naponi (direktna kvadratna zavisnost), na koje, pak, uz sve ostale relevantne faktore, dominantni uticaj vrše naponi izvora, koji su podržane, odnosno regulisane veličine. S druge strane, gubici reaktivne snage ($\sum Q_g$) su po pravilu u obrnutoj kvadratnoj zavisnosti od napona, ako ne dolazi do neke značajnije preraspodele tokova (pre svega reaktivnih) snaga u mreži, pri promeni napona. Dakle, vrednosti napona na krajevima generatora nalaze se u veoma složenoj interakciji sa prethodno pomenutim kvantitetima ($\sum Q_V$, $\sum Q_g$), kao i sa kvantitetima $\sum Q_G$, $\sum Q_S$. To znači da adekvatan izbor napona generatora (tzv. naponskih referenci) ima poseban praktičan značaj u minimalnim stanjima, sa kojima se, uz zadovoljenje naponskih (gornjih) ograničenja, kako će to biti pokazano, može da izvrši minimizacija ukupnih potreba za potpobuđenim režimima rada ili pak da se ovi režimi uvedu samo kod onih elektrana koje za to imaju uslove.

Naredne tabele 1, 2 i 3, daju prikaz kako je ostvaren bilans po reaktivnoj snazi u prenosnoj mreži Srbije, za ostvareno minimalno stanje 5. juna 2005. godine, i za očekivana minimalna stanja 2010. i 2015. godine, respektivno [11]. U ovim tabelama, sa $\sum Q_P$ označena je ukupna potrošnja reaktivne snage na krajevima TS 110/X kV prenosne mreže Srbije, a ukupna proizvedena reaktivna snaga od strane dalekovoda 400, 220 i 110 kV, označena je sa $\sum Q_V$.

Tabela 1. Prikaz ostvarenja bilansa reaktivne snage za ostvareno minimalno stanje 5. juna 2005. godine

Stanje	$\Sigma Q_p(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_G(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_g(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_v(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_s(\text{Mvar})$
Normalno	809.7	89.2	409.9	1185.8	55.4
Neraspoloživost TE NT A 5-6	809.7	6.0	368.1	1187.4	15.6

Tabela 2. Prikaz ostvarenja bilansa reaktivne snage za očekivano minimalno stanje 2010. godine

Stanje	$\Sigma Q_p(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_G(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_g(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_v(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_s(\text{Mvar})$
Normalno	856.8	-275.4	411.3	1409.2	-134.3
Neraspoloživost TE NT B 1	856.8	-205.8	402.6	1418.2	-47.0

Tabela 3. Prikaz ostvarenja bilansa reaktivne snage za očekivano minimalno stanje 2015. godine

Stanje	$\Sigma Q_p(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_G(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_g(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_v(\text{Mvar})$	$\Sigma Q_s(\text{Mvar})$
Normalno V1	903.2	-422.6	286.3	1420.9	-191.2
Neraspoloživost TE NT A 5	903.2	-400.4	299.9	1422.1	-181.4
Normalno V2	903.2	-461.5	300.7	1413.1	-243.3
Neraspoloživost TE NT B 1	903.2	-393.4	323.1	1418.2	-201.4

U tabeli 1, koja se odnosi na ostvareno minimalno stanje 5. juna 2005. godine, daje se prikaz kako je ostvaren bilans po reaktivnoj snazi, ne samo za tzv. normalno uklopno stanje, već i za slučaj ispada, odnosno neraspoloživosti agregata 5 i 6 u TE NT A. Takođe, u tabeli 2, koja se odnosi na očekivano minimalno stanje 2010. godine, uz tzv. normalno uklopno stanje, obuhvaćen je i slučaj ispada, odnosno neraspoloživosti agregata 1 u TE Nikola Tesla B. U tabeli 3, koja se odnosi na očekivano minimalno stanje 2015. godine, daje se prikaz kako je ostvaren bilans po reaktivnoj snazi za dve, od niza razmatranih, varijante (V1 i V2) podešenja naponskih referenci tada angažovanih generatora u EES Srbije [11]. To je takođe urađeno za tzv. normalna uklopna stanja i za slučaj ispada, odnosno neraspoloživosti agregata 5 u TE Nikola Tesla A (u varijanti V1) i neraspoloživosti agregata 1 u TE Nikola Tesla B.

Analizom članova izraza (1), za razmatrana minimalna stanja mreže Srbije naponskih nivoa 400 kV, 220 i 110 kV, uočeno je da dominantni uticaj ima veličina generisane reaktivne snage od strane vodova ΣQ_v . U razmatranim varijantama minimalnih stanja prenosne mreže Srbije, veličina ΣQ_v se kretala u opsegu (1.46 - 1.64) ΣQ_p , za razliku od maksimalnih stanja, gde je po pravilu veličina ΣQ_p značajno premašivala ΣQ_v . U minimalnim stanjima, ukupni gubici reaktivne snage ΣQ_g nalazili su se u opsegu (0.32 - 0.47) ΣQ_p . U takvim uslovima bila je neophodna redukcija ukupne reaktivne snage izvora ΣQ_G , a s obzirom na njihov različiti prostorni raspored i

ostale faktore od uticaja, u praktičnoj realizaciji toga, respektujući navedena naponska ograničenja, dolazilo se i do potreba za reaktivnom kapacitivnom snagom pojedinih izvora.

Za ostvareno minimalno stanje 5. juna 2005. godine, od generatora u EES Srbije ($\sum Q_G$) se zahtevalo da ukupno "daju" svega 89.2 Mvar. Otuda i potreba da pojedini generatori u EES Srbije rade u potpobudi (TE Drmno - 6.4 Mvar, TE NT A 3, 4 - 10.2 Mvar i TE NT A 5, 6 - 17.2 Mvar). Naravno, ovo stanje je rezultat zadatih vrednosti naponskih referenci tada angažovanih generatora u EES Srbije. Sprovedene analize razmatranog minimalnog stanja, sa i bez tranzita [11], su omogućile generalnu konstataciju da postoje svi realni uslovi da se ostvare povoljne naponsko-reaktivne prilike, sa minimalnim zahtevima za potpobuđenim režimima angažovanih generatora u EES Srbije. To je potvrdila, i potvrđuje, aktuelna pogonska praksa.

Međutim, ti uslovi biće zaoštreniji za očekivana minimalna stanja 2010. i 2015. godine, s obzirom, između ostalog, na uvođenje sagledanih novih elemenata (dalekovoda) prenosne mreže Srbije, saglasno rezultatima Studije [12]. Za očekivano minimalno stanje 2010. godine, od generatora u EES Srbije se zahtevalo da ukupno "prime" -275.4 Mvar, a za očekivano minimalno stanje 2015. godine, da ukupno "prime" -422.6 Mvar u varijanti V1, odnosno -461.5 Mvar, u varijanti V2. Dakle, kako se to i očekivalo, u cilju realizacije povoljnih naponsko reaktivnih prilika u prenosnoj mreži Srbije, povećala se potreba za potpobuđenim režimima rada generatora u EES Srbije. Međutim, kako će to biti pokazano u narednom izlaganju, i tada postoje realne mogućnosti za ostvarenje povoljnih naponsko-reaktivnih prilika.

Takođe, i za očekivana minimalna stanja 2020. i 2025. godine, razmatrana u okviru Studije [13], konstatovana je i dalje značajna potreba za potpobuđenim režimima rada generatora u EES Srbije. Dobijeni rezultati analiza [13] su ukazali da i obe planirane nove proizvodne jedinice (TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3), u pojedinim analiziranim minimalnim stanjima, dolaze u situacije kada treba da primaju reaktivnu snagu. To je posebno izraženo u minimalnim stanjima, koja se očekuju 2025. godine, s obzirom na tada planirani visoki stepen izgrađenosti prenosne mreže Srbije [12]. Ujedno, rezultati sprovedenih analiza minimalnih stanja, još jednom su potvrdili veliki praktični značaj adekvatnog izbora naponskih referenci generatora na uspostavljene naponsko-reaktivne prilike u prenosnoj mreži Srbije, odnosno ukazali su na mogućnost *racionalizacije* primene potpobuđenih režima rada. Pri tome, uz dominantni uticaj TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 (odnosno napona na krajevima njihovih generatora) na uspostavljene naponsko-reaktivne prilike, uočena je i veoma velika njihova međuzavisnost, kao i njihova međuzavisnost sa ostalim relevantnim elektranama, a posebno sa elektranama TE Nikola Tesla A i B 1, 2. To praktično znači da je veoma bitno da se izvrši *harmonizacija* vrednosti napona na krajevima generatora u ovim elektranama, u cilju uspostavljanja povoljnih naponsko-reaktivnih prilika u prenosnoj mreži Srbije. Odnosno, reč *harmonizacija* govori o mogućnosti da se "teret" potpobuđenih režima ravnomerno raspodeli na agregate koji su osposobljeni za to, odnosno da se to uradi srazmerno njihovim stvarnim mogućnostima. Kako će to biti pokazano u završnom poglavlju ovoga rada, ulaskom TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3, ostvaruje se široki manevarski prostor za ostvarenje ove harmonizacije.

3. EFEKTI PRIMENE POTPOBUĐENIH REŽIMA RADA GENERATORA

3.1. Zagrevanja čeonih delova statora generatora

U potpobuđenim režimima, kako je to već istaknuto, dolazi do pojačanog zagrevanja čeonih delova statora generatora, naročito izraženo kod generatora većih snaga kao rezultat povećane aksijalne komponente magnetnog polja, odnosno preraspodele fluksa u odnosu na natpobuđeni režim. Pri tome, krajnji paketi lima statora, kao i pritezne ploče izložene su znatno većem zagrevanju nego ostali delovi sinhronne mašine. Stoga je, da bi bilo izbegnuto prekoračenje dozvoljenih temperatura u tzv. kritičnim mestima čeonog zone, neophodno bilo da se ograniči struja statora, odnosno da se za angažovanu aktivnu snagu generatora utvrdi maksimalno dozvoljena reaktivna kapacitivna snaga.

Zahtevi savremenih EES za potpobuđenim režimima uticali su da proizvođači sinhronih generatora problemu zagrevanja čeonog zone posvete posebnu pažnju. Najpre su vršene analize i proračuni magnetnog polja u čeonj zoni, kao i gubitaka, koja su ukazivala na mesta najvećih magnetnih indukcija. S obzirom na to da se na ovaj način stepen zagrevanja mogao samo približno da odredi, bila su neophodna i neposredna merenja na gotovim mašinama. Dalje, radi proširenja mogućnosti rada u potpobuđi kod savremenih turbogeneratora velikih snaga (300, 500, 600 i 1000 MW) povećan je intenzitet hlađenja u čeonj zoni, a takođe su uvedena različita konstrukciona poboljšanja čeonih elemenata (uvođenje elektroprovodnih ekrana iznad pritezni ploča ili između njih i statorskih limova, nemagnetni materijali za pritezne ploče, magnetni prsten koji je istovremeno magnetni šant i mehanički držač za bočne veze namotaja statora, stepenasti presek krajnjih paketa limova, razređivanje zubaca u tom delu i dr.).

Na primer, u Francuskoj je usvojeno da generatori moraju biti tako proračunati da mogu da primaju reaktivnu snagu jednaku 0.35 od nominalne prividne snage, pri nominalnoj aktivnoj snazi. Tome odgovaraju faktori snage (kapacitivni) $\cos\varphi=0.932$ i 0.925 pri $\cos\varphi_n=0.9$ i 0.85 , respektivno. Dalje, u okviru međunarodnog elektrotehničkog Komiteta (Radna grupa za obrtne mašine) 1980. godine dat je predlog [14] o takvoj standardizaciji da generatori koji imaju odnos kratkog spoja ne manji od 0.4 mogu trajno da primaju reaktivnu snagu pri $\cos\varphi=0.95$, bez sniženja aktivne snage. Dakle, sudeći prema svetskoj praksi, potpobuđeni režimi turbogeneratora velikih snaga primenjuju se u realnom pogonu EES, sa značajnim iznosima vrednosti reaktivne kapacitivne snage.

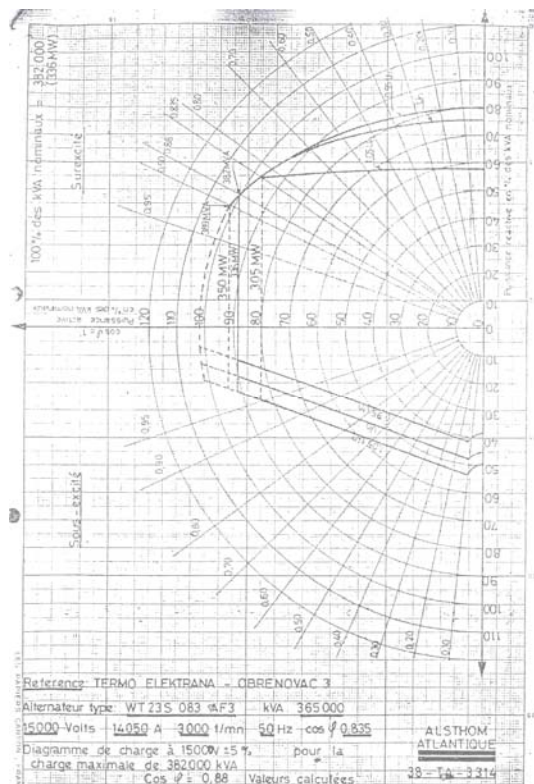
U kontekstu prethodnog, navodi se karakterističan primer kako je problem zagrevanja čeonog zone turbogeneratora TGV 200 sovjetske proizvodnje (generatori A1 i A2 u TE N. Tesla A) detaljno proučavan i rešavan [15]. Izvršene analize i merenja za ovaj tip mašine proizvedene 1962. doprinela su da se izvrši njegova modernizacija radi proširenja zone rada u potpobuđi. Povećan je pritisak vodonika sa 0.3 na 0.4 MPa i izvršene su odgovarajuće konstrukcione promene u čeonom delu. Za tako modernizovani generator TGV-200, naredbom tada glavnog ministarstva energetike SSSR 1973. god. [16] date su dozvoljene granice rada u potpobuđi u vidu sledeće tabele 4. Isto ministarstvo izdaje 1974. za TGV-200 novu instrukciju [17] u vidu odgovarajućeg pogonskog dijagrama (u kapacitivnom kvadrantu P, Q ravni generatora uvedene vrednosti iz tabele 4 koja se odnosi na modernizovani generator). Ti podaci su i dalje na snazi, što je potvrdio dobijeni izveštaj sovjetskog isporučioaca dobijen na zahtev ZJE, odnosno oni su tada važili za sve turbogeneratore tipa TGV-200, koji su ugrađeni u termoelektranama bivše Jugoslavije od 1966. do 1974. godine.

Što se tiče ostalih generatora u TE N.Tesla (A3, A4, A5, A6, B1 i B2), od njihovih proizvođača je dobijen odgovor o dozvoljenim granicama zagrevanja, kao je to prikazano na slici 1 (pogonska karta za generatore A3, A4 i A5 u TE N.Tesla A) i slici 2 (pogonska karta za generatore B1 i B2 u TE N.Tesla B).

Tabela 4. Dozvoljene granice rada u potpobudi turbogeneratorsa TGV-200

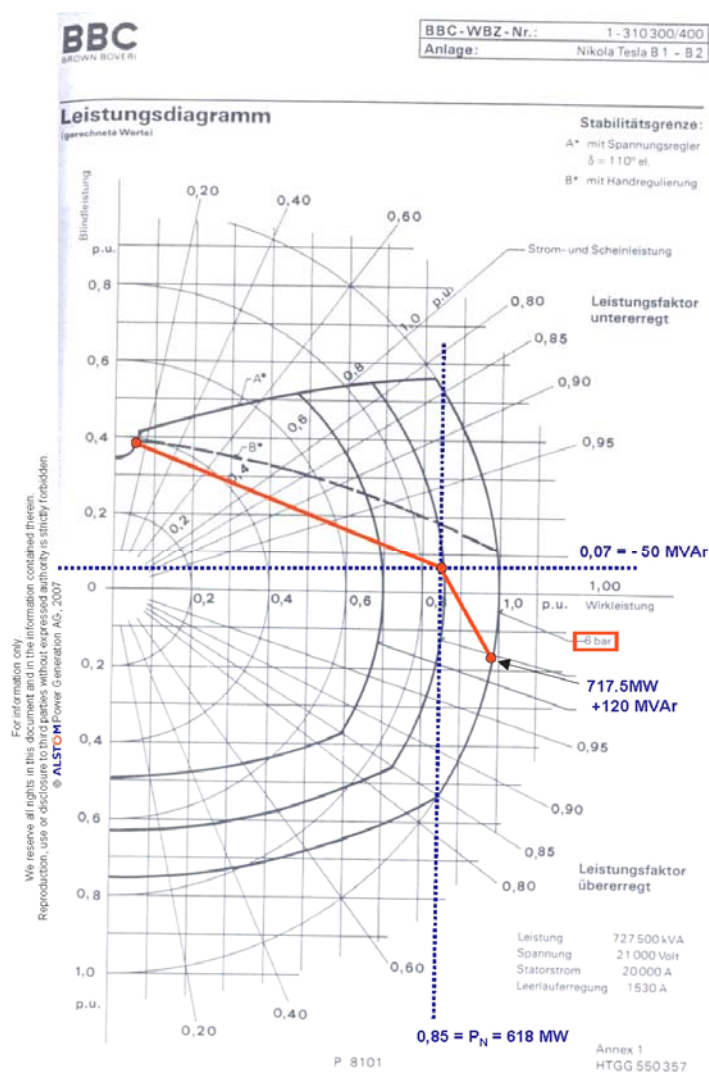
Tip turbogeneratorsa	Dodatni uslovi	Natpritisak vodonika MPa	Dozvoljena reaktivna snaga (Mvar) koju mašina prima iz mreže pri aktivnoj snazi P_n					
			100	95%	90%	80%	60%	40%
TGV-200 $P_n=200$ MW $\cos \varphi_n=0,85$ $U_n=15,75$ kV	Pre modernizacije sistema hladenja	0.3	50*	20*	8*	17	35	50
	Posle modernizacije sistema hladenja	0.3	0	15	25	40	53	60
		0.4	16	30	40	50	65	75

* Generator odaje reaktivnu snagu (natpobuđen)



Slika 1. Pogonski dijagram za generatore A3, A4 i A5 u TE N.Tesla A

Na taj način, saglasno tabeli 4 i prikazanim dijagramima na slikama 1 i 2, uočavaju se realne mogućnosti primene potpobuđenih režima rada generatora od 200, 300 i 600 MW TE N.Tesla. Takođe, takvi pogonski dijagrami postoje i za ostale, relevantne generatore u EES Srbije. Saglasno ucrtanim granicama, koje se odnose na kapacitivni kvadrant pogonskog dijagrama, izvršeno je i podešenje ograničivača minimalne pobude ovih generatora, u okviru automatskog sistema njene regulacije. To je omogućilo nesmetanu praktičnu primenu potpobudnih režima u dosadašnjoj pogonskoj praksi, kada su to zahtevala minimalna stanja EES-a Srbije.



Slika 2. Pogonski dijagram za generatore B1 i B2 u TE N.Tesla B

3.2. Obezbeđenje potrebne rezerve statičke i tranzijentne stabilnosti

U uvodu ovoga rada bilo je posebno apostrofirano pitanje ograničenja koje nameće obezbeđenje potrebne rezerve stabilnosti, s obzirom na nisku vrednost pobudne struje generatora, što je posebno karakteristično za savremene turboagregate sa realtivno visokim tehničkim minimumom. U cilju dobijanja šire osnove za izbor odnosa kratkog spoja generatora u TE Kolubara B i TE N.Tesla B3, analize statičke stabilnosti EES-a Srbije, u njegovom širokom okruženju, obuhvatile su i minimalna stanja, koja se očekuju 2015., 2020. i 2025. godine [13]. To je urađeno, između ostalog, i zbog činjenice da je u cilju uspostavljanja povoljnih naponsko-reaktivnih prilika u minimalnim stanjima, kako je to već bilo naglašeno, bilo neophodno da pojedini generatori, uključujući i razmatrane nove turbogeneratore, budu u potpobuđenim režimima rada. S toga se nametnulo sledeće pitanje: kako i koliko su takva potpobuđena stanja od uticaja na dinamičke performanse EES-a Srbije? Tu se u prvom redu odnosi na statičku i tranzijentnu (ugaonu) stabilnost. A zašto? Odgovor proizilazi iz činjenice da u uslovima minimalnih stanja dolazi do rasterećenja angažovanja generatora u pogledu odate reaktivne snage, pa sve do prelaska u kapacitivni kvadrant, odnosno do prelaska u potpobuđene režime rada. A kakve bi bile posledice toga? Pitanje je imalo smisla, jer se u tim novim uslovima pogona, operiše sa manjim vrednostima struja pobude angažovanih generatora, odnosno elektromotornih sila, koje su njima srazmerne.

Dobijeni rezultati analiza koji se odnose na minimalna stanja [13, 18, 19, 20], evidentno su ukazali na izrazito stabilno ponašanje (u statičkom i tranzijentnom pogledu) turbogeneratora u TE Kolubara B i TE N.Tesla B3, kao i ostalih generatora u EES Srbije. Objašnjenje za ovo izrazito stabilno ponašanje EES-a Srbije i u razmatranim minimalnim stanjima, između ostalog, leži u činjenici da relaksacija u pogledu odate reaktivne snage, obuhvata praktično sve angažovane generatore, tako da ugaoni pomeraji između njih, a koji su relevantni za ugaonu stabilnost (statičku i tranzijentnu), praktično ne trpe značajnije promene. Naravno, sve ovo je moglo da se uoči samo u okviru tzv. višemašinskog prilaza analizi statičke i tranzijentne stabilnosti, kako je to i urađeno u Studiji [13]. Dakle, i u ovim novim, perspektivno sagledanim minimalnim stanjima, za vremenski horizont do 2025. godine, utvrđeno je da su ograničenja, vezana za zagrevanje čeonih zona rotora i statora generatora (saglasno njihovim aktuelnim pogonskim dijagramima), znatno oštija u odnosu na ograničenja koja nameće obezbeđenje potrebne rezerve stabilnosti.

4. UNAPREĐENA VERZIJA RAČUNARSKOG PROGRAMA VOLTCONT

U radovima [21, 22] detaljno je bio izložen razvoj i praktična primena jedne nove metode i odgovarajućeg računarskog programa – *DEFNAPON (DEFinisanje NAPONa)* [21], odnosno *VOLTCONT (VOLTages CONTrol)*, za internacionalnu upotrebu [22], za brzo i dovoljno tačno definisanje napona angažovanih generatora u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja. Verifikacija predložene metode bila je obavljena u okviru statičkog simulacionog modela, na primerima ostvarenog i perspektivnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju [21, 22]. Zatim, u radovima [22, 23], bila je izvršena verifikacija ove metode u okviru dinamičkog simulacionog modela, za identična ostvarena i perspektivna stanja prenosne mreže Srbije, koja su razmatrana u [21].

U nastavku radu na ovoj problematici sagledavani su uslovi i praktične mogućnosti primene ove metode u realnom vremenu. To je je predmet istraživanja na aktuelnom

Projektu br.17011 - "Upravljanje naponima generatora u realnom vremenu u cilju unapređenja naponsko-reaktivnih stanja prenosne mreže Srbije", koji je finansiran od strane Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, uz logističku pomoć i podršku Elektromreže Srbije. Takvu vrstu primene bi omogućio pouzdan i kvalitetan rad estimatora stanja, koji se nalazi u sastavu novog SCADA/EMS sistema, implementiranog u Nacionalnom Dispečerskom Centru Elektromreže Srbije. Prva iskustva u pogledu uslova i mogućnosti primene ove metode u realnom vremenu, uz njena dalja unapređenja, sticana su na modelu realne elektroenergetske interkonekcije, koju je sačinjavao EES Srbije, u njegovom širokom okruženju, o čemu je detaljnije bilo reči u radovima [24-27].

Dalje aktivnosti na problematici upravljanja naponima generatora bile su koncentrisane na unapređenjima samog računarskog programa. Ta unapređenja su se ogledala u pogledu mogućnosti relaksiranja tokova reaktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodima, poboljšanja ekonomije pogona u maksimalnim stanjima i prostornom relociranju rezerve u reaktivnoj snazi generatora, a bilo je započeto pitanje harmonizacije potreba za potpobuđenim režimima rada generatora [26]. Sva ova unapređenja su bila vezana za različite načine formiranja i rešavanja sledeće matrične jednačine:

$$\Delta V_G = \left(\frac{\partial Q_G}{\partial V_G} \right)^{-1} \Delta Q_G \quad (2)$$

U unapređenoj verziji ove metode [24-26], u najopštijem slučaju, red matrične jednačine oblika (2), bio je povećan za broj interkonektivnih dalekovodova, na kojima se opserviraju tokovi reaktivnih snaga (N_{ID}), odnosno taj red je iznosio $N_{GI} + N_{ID}$. Oznaka N_{GI} predstavlja broj generatorskih čvorova u EES od interesa (u našem slučaju to je EES Srbije). Taj novi red matrične jednačine je dobijen eliminacijom (Gausovom) svih potrošačkih čvorova u razmatranoj interkonekciji, sem odabranih graničnih čvorova i eliminacijom svih generatorskih, koji se ne nalaze u EES od interesa. U takvim uslovima, rešavanjem matrične jednačine (2) (primenom LU faktorizacije) i dalje srazmerno niskoga reda ($N_{GI} + N_{ID}$), specificirajući željene korekcije odatih reaktivnih snaga odabranih generatora i/ili željene korekcije tokova reaktivnih snaga na odabranim interkonektivnim dalekovodima, u odnosu na posmatrano stanje (ΔQ_G), dobijaju se potrebne korekcije napona posmatranih generatora (ΔV_G). Međutim, u pojedinim slučajevima, moguće je veoma uspešno da se reši problem i sa redukovanim redom ove jednačine, kada figurišu samo elementi na kojima se vrše željene korekcije. O tome će biti više reči u nastavku ovog potpoglavlja rada, kao i u završnom delu rada, koji se odnosi na praktičnu primenu unapređene verzije računarskog programa *VOLTCONT*.

Započeto pitanje harmonizacije potreba za potpobuđenim režimima rada generatora, nastavljeno je u daljem radu na ovoj problematici, proširivanjem mogućnosti Opcije III primene računarskog programa *VOLTCONT*, u okviru koje se, primenom matrične jednačine (2), vrši određivanje novih vrednosti napona generatora za zadate nove vrednosti njihovih reaktivnih snaga. U okviru ove opcije, postoje dve osnovne mogućnosti primene.

U prvoj, učestvuju svi generatori u EES od interesa, odnosno red matrične jednačine (2) iznosi N_{GI} . U drugoj mogućnosti, učestvuju samo selektivno odabrani generatori. Ta selekcija može da se obavlja "ručno" i automatski.

U "ručnom" modu, računarski program komunicira sa unapred pripremljenom datotekom, u okviru koje se definišu generatori i željene promene njihovih reaktivnih snaga, odnosno red matrice jednačine (2) se tada znatno redukuje, jer je red jednak broju selektivno odabranih generatora. U okviru automatskog moda, generatori koji se dalje observiraju, automatski se biraju, zavisno od vrednosti odgovarajućeg indikatora i veličina *FAKTOR* i *Smax*, koje se interaktivno učitavaju. Za potrebe analiza *minimalnih stanja*, koja su i predmet ovoga rada, postoji niz sledećih scenarija automatske selekcije generatora:

1. Obuhvataju se samo generatori čija je nominalna prividna snaga S_n veća od unapred zadate vrednosti S_{max} ($S_n > S_{max}$), nezavisno od stanja u kome se nalaze, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g = -FAKTOR * S_n$;
2. Obuhvataju se samo generatori čija je nominalna prividna snaga S_n veća od unapred zadate vrednosti S_{max} ($S_n > S_{max}$), i nalaze se u potpobuđenim stanjima, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g = -FAKTOR * S_n$;
3. Obuhvataju se samo generatori, kod kojih je $S_n > S_{max}$, i nalaze se u potpobuđenim stanjima, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g = Q_{gmin}$, gde Q_{gmin} predstavlja dozvoljenu reaktivnu kapacitivnu snagu generatora (koja odgovara podešenju ograničivača minimalne pobude generatora);
4. Obuhvataju se samo generatori kod kojih je $S_n > S_{max}$, i nalaze se u potpobuđenim stanjima, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g = FAKTOR * Q_{gmin}$;
5. Obuhvataju se samo generatori kod kojih je $S_n > S_{max}$, nezavisno od stanja u kome se nalaze, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g = FAKTOR * Q_{gmin}$;
6. Obuhvataju se samo turbogeneratori kod kojih je $S_n > S_{max}$, nezavisno od stanja u kome se nalaze, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g = FAKTOR * Q_{gmin}$;
7. Obuhvataju se samo turbogeneratori kod kojih je $S_n > S_{max}$, i nalaze se u potpobuđenim stanjima, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g = FAKTOR * Q_{gmin}$;
8. Obuhvataju se samo hidrogeneratori kod kojih je $S_n > S_{max}$, nezavisno od stanja u kome se nalaze, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g = FAKTOR * Q_{gmin}$;
9. Obuhvataju se samo hidrogeneratori kod kojih je $S_n > S_{max}$, i nalaze se u potpobuđenim stanjima, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g = FAKTOR * Q_{gmin}$;

Uz prethodno navedeno, za potrebe analiza *maksimalnih stanja*, takođe postoje mogućnosti za kreiranje niza različitih scenarija automatske selekcije generatora, koji se dalje observiraju.

Na taj način, korisniku ovoga računarskog programa, date su široke mogućnosti u pogledu kreiranja niza različitih varijanti. Na primer, ako je $FAKTOR=0$, analizira se mogućnost da se eventualno izbegnu potpobuđeni režimi rada generatora, kod kojih je $S_n > S_{max}$, što se pokazalo efikasnim, za minimalna stanja, koja nisu ekstremna. Ili, ako se za S_{max} zada dovoljno mala vrednost, praktično se obuhvataju svi angažovani generatori. Ujedno, zadavanjem različitih vrednosti za $FAKTOR$, definiše se i željena "dubina" rada u potpobudi.

Pored prethodno navedenih mogućnosti, korisniku ovoga programa pruža se mogućnost zadavanja napona angažovanih generatora u polaznom ustaljenom stanju,

posredstvom indikatora $INAPON$ i veličine $FNAPON$. Ako je indikator $INAPON=0$, naponi generatora u polaznom stanju su unapred poznati, odnosno bile bi preuzete njihove vrednosti koje se nalaze u okviru SCADA/EMS sistema, implementiranog u Nacionalnom Dispečerskom Centru Elektromreže Srbije. Dakle, to bi bilo u kontekstu primene ove unapredene verzije računarskog programa $VOLTCONT$ u realnom vremenu. Za primenu u studijskom modu (indikator $INAPON > 0$) postoji niz mogućnosti, zavisno od zadate vrednosti za $FNAPON$. Tada, naponi generatora u polaznom stanju mogu da imaju vrednosti $FNAPON \cdot U_{gn}$, gde U_{gn} predstavlja nominalnu vrednost napona generatora.

Dakle, izborom Opcije III, po određivanju tokova snaga u polaznom stanju razmatrane interkonekcije, određuju se elementi matrice osetljivosti $\partial Q_G / \partial V_G$, čiji red i struktura se automatski određuju, zavisno od izabranog scenarija (1-9) i definišu se željene korekcije reaktivnih snaga selektivno odabranih generatora. Sa tako korigovanim reaktivnim snagama angažovanih generatora, dalje se vrši određivanje novih vrednosti napona generatora, rešavanjem matricne jednačine (2). Ujedno, proverava se da li su novo dobijene vrednosti napona generatora u okviru raspoloživog naponsko-regulacionog opsega $\pm 5\% U_{gn}$. Ako nisu u tom opsegu, to je upozorenje korisniku programa, da nastavi traganje za rešenjem, u kome je zadovoljeno ovo ograničenje.

Dalje, u okviru ove izabrane opcije, sa dobijenim novim vrednostima napona generatora, koji se nalaze u u okviru raspoloživog naponsko-regulacionog opsega, i koji omogućuju ostvarenje novih zadatih vrednosti reaktivnih snaga, vrši se određivanje novih tokova snaga u razmatranoj interkonekciji. Po određivanju novog ravnotežnog stanja, vrši se provera zadovoljenja naponskih ograničenja u razmatranoj mreži. Ako nisu zadovoljena ova ograničenja, to je takođe signal korisniku da nastavi sa traganjem za zadovoljavajućim rešenjem.

Prethodno pomenuti segmenat u odvijanju računarskog programa $VOLTCONT$ (određivanje novih tokova snaga, za nove vrednosti napona generatora, dobijene rešavanjem matricne jednačine (2)) je veoma značajan, jer se dolazi do tačnijih novih vrednosti reaktivnih snaga observiranih generatora. Ujedno, određuju se nove vrednosti reaktivnih snaga kod ostalih generatora, nastale kao rezultat novih vrednosti napona observiranih generatora, što je takođe od velikog praktičnog značaja.

Za dobijeno novo regularno stanje, obavlja se poređenje dobijenih rezultata sa rezultatima dobijenih uprošćenim prilazom (primena matricne jednačine (2)), odnosno izračunava se veličina greške u određivanju novih vrednosti reaktivnih snaga opserviranih generatora. Dakle, u pitanju je dalja verifikacija predložene metode upravljanja, u okviru statičkog prilaza, ako bi se ona autonomno primenjivala. Međutim, u unapredenoj verziji računarskog programa $VOLTCONT$, ova jednostavna i aproksimativna metoda je spregnuta sa daljim određivanjem novih tokova snaga, čime je omogućeno dobijanje pouzdanih rezultata.

Na kraju, u okviru ove izabrane Opcije III, analogno Opciji II, obavlja se odgovarajuća globalna analiza efekata uvođenja novog plana napona generatora, odnosno daju se sledeći pokazatelji:

- Ukupna promena reaktivnih snaga observiranih generatora, odnosno generatora kod kojih je izvršeno upravljanje naponima;
- Ukupna promena reaktivnih snaga ostalih generatora;

- Veličina i struktura gubitaka aktivne i reaktivne snage u razmatranom EES i promene u odnosu na polazno stanje;
- Veličina i struktura generisanja reaktivne snage od strane dalekovoda u razmatranom EES i promene u odnosu na polazno stanje;
- Veličina reaktivne rezerve generatora u razmatranom EES i njena promena u odnosu na polazno stanje;
- Tokovi reaktivnih snaga na interkonektivnim dalekovodima i promene ovih tokova u odnosu na polazno stanje.

U unapređenju ovog računarskog programa i dalje je primenjen je *Visual Fortran Professional Edition 6.0.0.* Unošenje ulaznih podataka i prikazivanje rezultata njihove obrade je omogućeno posebnim editorima za čiji je razvoj korišćen *Microsoft Visual Studio 2008*. Ovim komponentama program je dobio na brzini manipulacije podacima i vizuelizaciji složenih problema kojima se bavi. U cilju dalje nadgradnje programa išlo se na što veću modularnost pomenutih aplikacija, što nameće ubrzani razvoj softvera kojim se objedinjuje rešavanje matematičkih i grafičkih problema istovremeno. Omogućeno je obuhvatanje interkonekcija sa 10000 čvorova, 30000 grana, 2000 generatora, 4000 transformatora i 200 regulacionih basena.

5. MOGUĆNOSTI HARMONIZACIJE POTPOBUĐENIH REŽIMA RADA GENERATORA U EES SRBIJE

Sagledavanje mogućnosti i efekata primene unapređene verzije računarskog programa *VOLTCONT* urađeno je na modelu realne elektroenergetske interkonekcije, koju sačinjavaju EES Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Makedonije, Mađarske, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije. Pri tome su modelovane kompletne visokonaponske mreže 220 kV i 400 kV u pomenutim EES (u EES Grčke, i relevantni delovi mreže 150 kV), uz napomenu da je kompletno modelovana mreža 110 kV u EES Srbije i sve TS 110/x kV. Karakteristični primeri primene predložene metode u funkciji harmonizacije potreba za potpobuđenim režimima rada generatora odnose se na minimalna stanja Srbije, koje se očekuje 2020. godine [12, 13], uz pretpostavku da su angažovani i generatori u TE Kolubara B i TE N.Tesla B 3.

Analize su startovale sagledavanjem najpre globalnih aspekata, odnosno utvrđivalo se kakvog su mogućeg karaktera naponsko-reaktivnih prilika u razmatranom minimalnom stanju. Korišćene su opcije u kojima je indikator $INAPON > 0$, a faktor $FNAPON$ je imao dve vrednosti: 1.00 i 0.95. Za prvu vrednost, kada su svi generatori imali nominalnu vrednost, u uspostavljenom polaznom stanju, došlo je do narušavanja gornjeg naponskog ograničenja u nizu čvorova prenosne mreže Srbija. Za drugu vrednost, koja predstavlja donju granicu naponsko-regulacionog opsega (- 5 % Ugn), u uspostavljenom stanju su bila eliminisana sva prethodno narušena ograničenja, ali uz potpobuđena stanja većeg broja generatora u EES Srbije. Stoga, postavljalo se pitanje, da li je bilo moguće da se izvrši racionalizacija primene potpobuđenih režima rada u situacijama kada su oni neophodni? Jer, generalno gledano, sigurno je da ravnomernija raspodela tih režima na generatore koji su najpogodniji za to, od posebnog praktičnog značaja u pogledu životnog veka generatora.

U pomenutom kontekstu, analiziran je niz scenarija, saglasno mogućnostima koju je pružao računarski program *VOLTCONT*. Jedan od analiziranih scenarija, koji može da bude dovoljno indikativan, je onaj u kome su predmet observacije bili minimalno opterećeni (po aktivnoj snazi) generatori u TE Kolubara B1, TE N.Tesla B1, TE N.Tesla B3, TE N.Tesla A1, A3 i A5 i TE Kostolac B1. Zadatak je bio da se izvrši

harmonizacija potpobuđenih režima rada pomenutih generatora. Za taj cilj, najpre je korišćen tzv. "ručni" mod, u kome računarski program *VOLTCONT* komunicira sa unapred pripremljenom datotekom, u okviru koje se definišu generatori i željene promene njihovih reaktivnih snaga. Rezultati toga se daju u tabeli 5.

Tabela 5. Harmonizacija potpobuđenih režima generatora u TE Kolubara B1, TE N. Tesla B1, TE N. Tesla B3 i TE N. Tesla A1, 3 i 5 i TE Kostolac B1- za "ručni" mod

Redni broj	Elektrana	Q_{GO} (Mvar)	U_{GO} (r.j)	Q_{GZ} (Mvar)	U_G (r.j)	Q_G (Mvar)	ΔQ_G (%)
1	TE Kolubara B1	-8.4	1.000	-50.0	0.983	-49.8	0.317
2	TE N.Tesla B1	-43.5	1.000	-90.0	0.988	-90.8	-0.875
3	TE N.Tesla B3	-16.1	1.000	-100.0	0.980	-99.4	0.645
4	TE N.Tesla A1	-63.5	0.957	-20.0	0.983	-19.4	0.645
5	TE N.Tesla A3	-34.7	0.975	-20.0	0.984	-20.5	-2.304
6	TE N.Tesla A 5	-91.3	0.975	-40.0	0.990	-40.1	-0.147
7	TE Kostolac B1	-103.6	0.958	-40.0	0.986	-38.5	3.711

U ovoj tabeli, oznake Q_{GO} i U_{GO} predstavljaju vrednosti reaktivne snage i napona na krajevima izabranih generatora u polaznom stanju. Zahtevalo se određivanje novog plana napona generatora (U_G), pri kome će generatori TE Kolubara B1, TE N.Tesla B1 TE N.Tesla B3 više da participiraju u reaktivnoj kapacitivnoj snazi, odnosno da nove reaktivne snage iznose -50.0, -90.0 i -100 Mvar, respektivno. Ujedno, cilj je bio da se pritom dođe do rasterećenja generatora u TE N. Tesla A 1, 3 i 5 i TE Kostolac B1, odnosno da nove reaktivne snage iznose -20.0, -20.0, -20.0 i -40 Mvar, respektivno. Oznaka Q_{GZ} dakle predstavlja ove zadate nove vrednosti reaktivnih snaga generatora, a oznaka U_G predstavlja nove vrednosti napona generatora, pri kojima se ostvaruju zadate reaktivne snage Q_{GZ} , dobijene primenom matrične jednačine (2), reda 7 (obuhvaćeni samo elementi opserviranih generatora). Dalje, oznaka Q_G predstavlja nove vrednosti reaktivnih snaga, dobijene proračunom tokova snaga i naponskih prilika u razmatranoj, kompletnoj interkonekciji, za nove vrednosti napona generatora (U_G), a oznaka ΔQ_G je greška koju čini metoda $(\Delta Q_G (\%) = (Q_{GZ} - Q_G) * 100 / Q_G)$, kada bi se autonomno primenjivala, odnosno kada se ne bi vršio proračun novih tokova snaga. Dakle, evidentno je da je u novom stanju "teret" potpobuđenih režima ravnomernije raspoređen na posmatrane generatore, uz postizanja visoke tačnosti.

Dalje, odabran je scenario br.6 automatske selekcije generatora, u kome se obuhvataju samo turbogeneratori kod kojih je $S_n > 300$ MVA, i nalaze se u potpobuđenim stanjima, a zadaje se nova vrednost reaktivne snage u iznosu $Q_g =$

FAKTOR*Qgmin. Kako je to već bilo rečeno, Qgmin predstavlja dozvoljenu reaktivnu kapacitivnu snagu generatora, koja odgovara podešenju ograničivača minimalne pobude generatora. Rezultati izbora ovoga scenarija za FAKTOR=0.5 daju se u tabeli 6, a ZA FAKTOR=0.7 u tabeli7. Oznake u njima imaju ista značenja kao u prethodnoj tabeli 5.

Prikazani rezultati pokazuju da se u razmatranim novim stanjima, "teret" potpobuđenih režima ravnomernije raspoređuje na posmatrane generatore, saglasno njihovim mogućnostima. Pri tome i dalje se ostaje u propisanim granicama, koje diktiraju raspoloživi naponsko-regulacioni opseg i karakteristike ograničivača minimalne pobude generatora.

Na kraju, naravno, ako bi to uopšte trebalo posebno da se naglašava, prethodno prikazano je urađeno u okviru raspoloživih podataka i podloga. Ukoliko bi se, u periodu koji je pred nama, neka od bitnih predviđanja ne ispunjavaju željenom, odnosno planiranom dinamikom, ili ako dođe do većeg raskoraka između prognoziranog i ostvarenog, sigurno je da bi bila poželjna aktualizacija analiza ovakve vrste. Takođe, trebalo bi da se napomene, da odabrani praktični primeri nemaju pretencioznost da budu u funkciji neposrednog i celovitog rešavanja problema naponsko-reaktivnih prilika u minimalnim stanjima prenosne mreže Srbije. Primeri su, dakle u prvom redu tako birani da ilustruju karakteristike i mogućnosti predložene metode, dovodeći je do velikih iskušenja, a da se ujedno sagleda i njena upotrebnost, u kontekstu šire celine koju daje unapređena verzija računarskog programa *VOLTCONT*, sa kojom će se moći da rešavaju postavljeni problemi u budućnosti, na jedan od načina prikazanog u ovom tadu.

Tabela 6. Harmonizacija potpobuđenih režima generatora u TE Kolubara B1, TE N. Tesla B1, TE N. Tesla B3 i TE N. Tesla A3 i 5 i TE Kostolac B1 – scenario br.6; $Q_g = 0.5 * Q_{gmin}$

Redni broj	Elektrana	Q_{GO} (Mvar)	U_{GO} (r.j)	Q_{GZ} (Mvar)	U_G (r.j)	Q_G (Mvar)
1	TE Kolubara B1	-25.3	1.000	-51.5	0.979	-55.6
2	TE N.Tesla B1	-75.5	1.000	-92.7	0.983	-101.7
3	TE N.Tesla B3	-46.8	1.000	-102.9	0.976	-110.2
4	TE N.Tesla A3	-3.2	1.000	-45.6	0.973	-46.8
5	TE N.Tesla A 5	-38.3	1.000	-45.6	0.984	-50.5
6	TE Kostolac B1	-17.0	1.000	-51.8	0.978	-54.6

Tabela 7. Harmonizacija potpobuđenih režima generatora u TE Kolubara B 1, TE N. Tesla B1, TE N. Tesla B3 i TE N. Tesla A3 i 5 i TE Kostolac B1 – scenario br.6; $Q_g = 0.7 * Q_{gmin}$

Redni broj	Elektrana	Q_{GO} (Mvar)	U_{GO} (r.j)	Q_{GZ} (Mvar)	U_G (r.j)	Q_G (Mvar)
1	TE Kolubara B1	-25.3	1.000	-72.0	0.961	-79.0
2	TE N.Tesla B1	-75.5	1.000	-129.8	0.964	-145.1
3	TE N.Tesla B3	-46.8	1.000	-144.1	0.955	-156.0
4	TE N.Tesla A3	-3.2	1.000	-63.9	0.957	-65.9
5	TE N.Tesla A 5	-38.3	1.000	-63.9	0.966	-72.4
6	TE Kostolac B1	-17.0	1.000	-72.5	0.962	-77.2

6. ZAKLJUČCI

U radu su sagleđane potrebe za potpobuđenim režimima rada generatora u EES Srbije za vremenski horizont do 2025. godine. Prikazan je jedan od načina primene razvijene metode upravljanja naponima generatora. On se odnosio na mogućnost racionalizacije primene potpobuđenih režima rada generatora, koja je ilustrovana na primeru očekivanog minimalnog stanja EES-a Srbije 2020. godine, u njegovom širokom okruženju.

Predložena metoda upravljanja, čiju materijalizaciju čini unapređena verzija računarskog programa VOLICONT, uz edukaciju, mogla bi da nađe svoje odgovarajuće mesto, u prvoj fazi svoje praktične primene, u okviru analiza i pripreme pogona, koje bi se obavljale u odgovarajućim stručnim službama u Elektromreži Srbije. Zatim, uz izradu odgovarajućeg interfejsa i obavljanju neophodnog testiranja i probnog rada, pristupilo bi se njenoj praktičnoj primeni u realnom vremenu, čvrsto povezanoj sa korišćenjem rezultata pouzdanog i kvalitetnog rada estimatora stanja, implementiranog u NDC Elektromreže Srbije. Dakle, ovu metodu tek čekaju nova iskušenja, u njenoj praktičnoj primeni u realnom vremenu. Naravno, ako potencijalni korisnici ocene da će im to biti od praktične pomoći i koristi.

LITERATURA

- [1] Popović D.P., Mrda S., "Režimi malih opterećenja u uslovima rada I etape 380 kV mreže SRFJ", IX stručno savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, V. Banja, 1968.

- [2] "Studija rada sinhronih generatora u potpobudi u sistemu Srbije za period 1975., 1980. i 1985. " (drugi deo), studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 1974.
- [3] Popović D.P., Petrović D., "Ograničenja u primeni potpobuđenih režima rada sinhronih generatora sistema Srbije", XX stručno savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Budva, 1975., časopis "Elektroprivreda", br.9-10, 1975.
- [4] "Analiza uticaja multiagregatnosti na statičku stabilnost generatora snabdevenih automatskim regulatorom pobude proporcionalnog dejstva u potpobuđenom režimu rada", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 1976.
- [5] Popović D.P., "Analiza uticaja više-agregatnosti na statičku stabilnost elektrana u potpobuđenom režimu rada", XIII stručno savetovanje elektroenergetičara Jugoslavije, Bled, 1977.
- [6] Popović D.P., "Matematički model statičke stabilnosti elektroenergetskog sistema sa proizvoljnim brojem višeagregatnih elektrana", Zbornik radova Instituta "Nikola Tesla", Beograd, knjiga 5, 1977.
- [7] Jovanović S., Popović D.P., "Jedan matematički model i računarski program analize statičke stabilnosti multimašinskih elektroenergetskih sistema", časopis "Elektroprivreda", br.5-6, 1982., str.133-136.
- [8] Jovanović S., Popović D.P., "Neki aspekti određivanja rezerve statičke stabilnosti elektroenergetskih sistema u minimalnim režimima", časopis "Elektroprivreda", br.9-10, 1982., str.266-268.
- [9] "Analiza potpobuđenih režima rada turbogeneratorskog sistema TE "Nikola Tesla" A i B", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 1984.
- [10] Popović D.P., Petrović D., Ljubić V., "Potpobuđeni režimi rada elektrana u funkciji regulacije naponsko-reaktivnih prilika u minimalnim režimima EES Jugoslavije sa posebnim osvrtom na TE N. Tesla", časopis "Energija", br.5, 1985., str.331-340.
- [11] "Planiranje izvora reaktivne snage u prenosnoj mreži EES Srbije – II faza", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2006.
- [12] "Studija dugoročnog razvoja prenosne mreže 400 kV, 220 kV i 110 kV na području Republike Srbije, za period do 2025. godine", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2006.
- [13] Studija stabilnosti rada i izbor opsega najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika turboagregata i blok-transformatora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2008.
- [14] "Energetika u inostranstvu - Električne mašine", prikaz referata na CIGRE 1980. Moskva 1982. (na ruskom)
- [15] "Pouzdanost savremenih i perspektivnih turbogeneratorskih sistema", pod redakcijom Ščastljivog, Kijev, 1978. (na ruskom)
- [16] "Električne centrale", No 3, Ukaz MINERGO – SSSR, 1974. (na ruskom)
- [17] "Električne centrale", No 2, Ukaz MINERGO – SSSR, 1975. (na ruskom)
- [18] Popović D.P., Stanisavljević I., Stojković M., "Metodološki i praktični aspekti

izbora odnosa kratkog spoja i sinhronih reaktansi generatora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3", časopis "Elektroprivreda", br. 2, 2009., str.19-28.

- [19] Popović D.P., Stanisavljević I., Stojković M., "Izbor vremenske konstante inercije, tranzijentnih reaktansi i pobudnog sistema agregata u u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B 3", 29 Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 31 maj-6 juni, 2009., referat R C1-05
- [20] Popović D.P., Stojković M., "Naponsko-reaktivna stanja prenosnih mreža", monografija, Institut "Nikola Tesla", Beograd, ISBN 978-86-83349-09-8, jun 2009. godine, str.295.
- [21] Popović D.P., "Jedna metoda upravljanja tokovima reaktivnih snaga u normalnim i havarijskim stanjima elektroenergetskih interkonekcija", časopis "Elektroprivreda", br.1, 2006., str. 7-24.
- [22] Popović D.P., Stojković M., "An Efficient Generator Voltages Control Method for Improvement of Voltage-Reactive States in Transmission Network", FACTA UNIVERSITATIS, Series: Electronics and Energetics, vol. 21, No. 2, August, 2008., pp. 221-232.
- [23] Popović D.P., Stojković M., "Dinamički aspekti upravljanje naponima generatora i naponsko-reaktivna stanja elektroenergetskih interkonekcija", časopis "Elektroprivreda", br. 3, 2007, str. 3-14.
- [24] Popović D.P., Stojković M., "Upravljanje naponima generatora u realnom vremenu u cilju unapređenja naponsko-reaktivnih stanja u prenosnim mrežama", časopis "Tehnika- Elektrotehnika", br.2, 2008, str.1-8.
- [25] Popović D.P., Stojković M., "The Effects of Real-time Generator Voltage Control", Međunarodna konferencija - Power Plants 2008, V.Banja, 28-31 October 2008.
- [26] Popović D.P., Stojković M., "Jedna unapređena metoda upravljanja naponima generatora u realnom vremenu", časopis "Tehnika - Elektrotehnika", br. 4, 2009., str.7-16.
- [27] Popović D.P., Stojković M., "Generator Voltages Control in Real-Time and Voltage-Reactive State on Interconnected Lines", 4th International Conference on Deregulated Electricity Market Issues in South-Eastern Europe, September 17-18, Belgrade, Serbia

Abstract: In this paper the necessities of underexcitation states of Serbian generators are considered as well as the effects of those states. The results of analyses of Serbian transmission network low-load conditions for time horizon to the 2025 year, point out the great influence of adequate choice of generator voltages on established voltage-reactive states. The application of voltage control method developed points out the real possibilities of rationalization of underexcitation states, when the inevitable "burden" of those states is equally distributed on generators qualified for this purpose, e.g. according to the their possibilities and constrains.

Key words: *underexcitation states, generators, rationalization, Serbian Electric Power System*

**POSSIBILITES OF RATIONALIZATION OF UNDEREXITATION STATES OF
SERBIAN GENERATORS**

Dragan P.Popović , Miloš Lj. Stojković and Zoran V. Božović
Electrical Engineering Institute "Nikola Tesla", Belgrade