

Statički i dinamički aspekti uvažavanja statizma regulacije napona generatora u analizama naponsko-reaktivnih stanja prenosnih mreža

Milan Ivanović, Dragan P.Popović, Đorđe Stojić, Slavko Veinović,
Milan Milinković, Dušan Arnautović, Saša Minić¹,

¹ Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Univerzitet u Beogradu
Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija
mivanovic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu se razmatra uticaj koeficijenta statizma regulacije napona generatora na naponsko-reaktivna stanja prenosnih mreža. Najpre se daje definicija statizma, kao i mogućnosti i načini njegovog merenja i podešenja u praksi. Zatim, daju se modeli njegovog uključanja u analize statičkih i dinamičkih stanja, koji su inkorporirani u odgovarajuće računarske programe za analize statičke i dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija, razvijenih u Institutu "Nikola Tesla". U završnom poglavlju ovog rada daju se neki od karakterističnih primera praktične primene programa za analize statičke i dinamičke sigurnosti. Razmatrana je prenosna mreža Srbije, u njenom širokom okruženju, sa posebnim osvrtom na kvantifikaciju uticaja statizma po naponu generatora na uspostavljena postdinamička kvazistacionarna stanja.

Ključne reči: statizam, napon generatora, regulacija pobude, naponsko - reaktivna stanja, prenosna mreža Srbije

1. Uvod

Generalno gledano, dobrim izborom opsega relevantnih parametara i karakteristika novih, kao i revitalizovanih agregata i njihovih blok-transformatora, postiže se optimalni rad proizvodnog bloka, odnosno, u interaktivnoj sprezi sa elektroenergetskim sistemom (EES) na koji se priključuje, postiže se maksimalno, odnosno, racionalno iskorišćenje njegovih performansi.

U kontekstu naponsko-reaktivnih prilika, prvi i jedan od najznačajnijih, a reklo bi se i jedan od najdelikatnijih zadataka, je izbor najpovoljnijih vrednosti nominalnog faktora snage generatora, koji se mora vršiti simultano sa izborom prenosnog odnosa njegovog blok-transformatora.

Ostajući u pomenutom kontekstu, imperativ održavanja potrebnog nivoa sigurnosti i kvaliteta električne energije, zahteva da svi relevantni elementi u korpusu za održavanje i regulaciju napona u EES moraju da zadovolje oštre kriterijume koji se odnose na njihovu funkcionalnost, pouzdanost i raspoloživost. Sistemi pobude sinhronih generatora, kao osnovni uređaji za regulaciju napona i održavanje statičke i tranzijentne stabilnosti EES, moraju imati sve pomenute osobine, kako bi ispunili navedene kriterijume. Automatski regulatori napona (koristi se i termin - regulatori pobude), kao sastavni delovi sistema pobude, namenjeni su za obavljanje primarne regulacije napona u EES. Takođe, od njihovih konstruktivnih i funkcionalnih karakteristika zavisice kvalitet električne energije koja se isporučuje potrošačima, kao i stabilnost EES.

U studiji [1] proučavane su vrste, osobine i karakteristike sistema pobude, tada (2005. godina) ugrađenih na agregatima i blokovima u EPS. U njoj, posebna pažnja bila je posvećena eksperimentalnom utvrđivanju vrednosti koeficijenata statizma naponske regulacije generatora (koristi se i termin - statizam po naponu generatora). Ovaj parametar, kako će se to videti u ovom radu, ima veoma važan uticaj u pogledu same participacije generatora u ostvarenju naponsko-reaktivnih prilika u EES, a samim tim, i na kvalitet ostvarenih naponsko-reaktivnih prilika.

U međuvremenu, došlo je do značajnih pozitivnih promena na ovoj problematici u nas, koje su navedene u radu [2]. U njemu su prikazani dosadašnji rezultati rada Instituta "Nikola Tesla" na planu razvoja, projektovanja, proizvodnje i puštanja u rad novih pobudnih sistema u EPS. Posebna pažnja je posvećena razvijenim digitalnim automatskim regulatorima napona, u okviru kojih statizam naponske regulacije ima značajnu funkciju.

Interesantno je napomenuti, da ovaj parametar ne figuriše u aktuelnoj regulativi UCTE (sada je to asocijacija ENTSO-E (*European Network of Transmission System Operators for Electricity*)), koja se odnosi na regulaciju napona [3]. Za razliku od statizma primarne regulacije učestanosti, koji je precizno definisan i normiran u aktuelnoj regulativi UCTE [4] i regulativi EMS [5].

Takođe, koeficijent statizma naponske regulacije generatora ne figuriše ni u aktuelnim verzijama računarskih programa svetske reputacije, kao što su to računarski programi PSS/E-28 (Power System Simulator for Engineering) [6] i *DigSILENT Power Factory, version 14* [7]. On nije figurisao ni u dosadašnjoj regulativi EMS [5].

Međutim, u izmenama i dopunama regulative EMS [8] (tačka 4.4.7.3.), uvodi se i normira koeficijent statizma regulacije napona na sabirnicama prenosne mreže, na koju je priključena elektrana. Zahteva se da on mora biti podesiv u opsegu od -1,5% do -6%. Pri tome se ne ekspliciraju vrednosti koeficijenata statizma regulacije napona na krajevima generatora, a koje su prisutne, odnosno podesive, u savremenim digitalnim regulatorima pobude.

Kad je već reč o aktivnostima na planu regulacije pobude u EES Srbije, uz pomenutu studiju [1], trebalo bi navesti i studiju "*Sistemski parametri regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a*" (faza I), čija je

izrada u toku. Osnovni cilj ove Studije, koja se radi za potrebe Elektroprivrede Srbije, je da izvrši odgovarajuće provere, snimanja, ispitivanja, podešavanja i analize relevantnih parametara sistema regulacije pobude, kao i sistema turbinske regulacije agregata, odnosno blokova u svim elektranama EPS. Zatim, predviđeno je da se na bazi tako određenih relevantnih parametara regulacionih sistema, izvrše odgovarajuće simulacije na realnom modelu EES Srbije, u njegovom širokom okruženju. Na taj način, bili bi "pokriveni" tzv. sistemski aspekti, koji su jedino relevantni za postavljeni cilj. Krajnji cilj ove studije je poboljšanje kvaliteta primarne regulacije napona i primarne, sekundarne i tercijarne regulacije učestanosti i eventualno usklađivanje sa postojećom važećom regulativom.

Dosadašnja istraživanja, u toku njene izrade, ukazala su na veliki značaj statizma naponske regulacije generatora, što objašnjava osnovne motive i razloge za nastanak ovoga rada. U njemu se, u okviru raspoloživog prostora, izlaže prilaz Instituta "Nikola Tesla" inkorporiranju naponskog statizma u odgovarajuće matematičke modele (i računarske programe) za analize statičke i dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija. Tome predhodi kraći opis samih definicija statizama, načina njihovog eksperimentalnog određivanja i podešenja. Završni deo rada bavi se nekim od karakterističnih rezultata praktične primene unapređenog računarskog programa za analize statičke sigurnosti, na primeru prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju. Posebna pažnja je posvećena kvantifikaciji uticaja statizma po naponu generatora na postdinamička kvazistacionarna stanja, uspostavljena nakon razmatranih poremećaja.

2. Koeficijenti statizama regulacije napona generatora

2.1. Generalno

U teoriji regulacije sistema, statizam proporcionalnog regulatora se obično definiše preko pojačanja sistema sa zatvorenim povratnim vezama. Stepem zavisnosti promene regulisane veličine od promene njenog uzroka naziva se koeficijentom statizma ili stepenom statizma. On predstavlja nagib karakteristike regulacije prema apscisnoj osi i izražava se tangensom ugla između apscise i karakteristike regulacije.

U praksi regulacije napona, statizam se definiše kao količnik promene napona sinhronne mašine (generatora) i promene reaktivne snage, koja izaziva tu promenu napona.

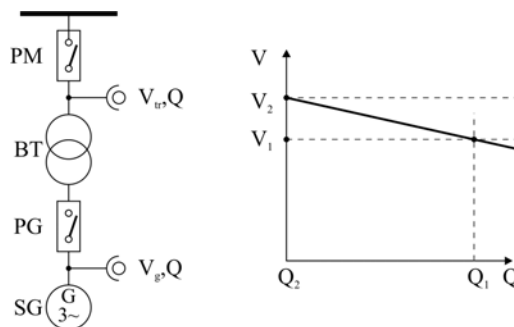
Sistem regulacije se može nalaziti u određenom stacionarnom stanju ili u procesu prelaska iz jednog stacionarnog stanja u drugo. Novo stacionarno (ili, preciznije, kvazistacionarno) stanje može da se uspostavi kada se regulisana veličina vrati na svoju prvobitnu vrednost ili kada regulisana veličina primi neku novu vrednost, određenu definisanim zakonom njene promene. U prvom slučaju se radi o *astatičkoj* karakteristici regulacije, a u drugom, o *statičkoj* karakteristici.

Pri podešavanju koeficijenta statizma veoma je važno na koji je način generator povezan na mrežu. Jedan od načina, koji je najčešći u praksi, je da su generatori povezani na mrežu preko blok-transformatora, a drugi, da su generatori direktno vezani na zajedničke sabirnice. U slučaju generatora vezanih na mrežu preko blok-transformatora, raspodela reaktivnog opterećenja između njih se vrši i pri *statičkoj* i pri *astatičkoj* karakteristici regulacije. Međutim, ako su generatori direktno vezani na zajedničke sabirnice, raspodela reaktivnog opterećenja među njima može da se vrši samo pri *statičkoj* karakteristici regulacije.

Dalje, u praksi, figurišu *dve* vrednosti koeficijenata statizma regulacije napona. Prva vrednost je asocirana krajevima generatora, a druga visokonaponskoj strani njegovog blok-transformatora, koja je, kako je to već rečeno, uvedena i normirana u novu, izmenjenu i dopunjenu regulativu EMS [8]. Načinima njihovog eksperimentalnog utvrđivanja i proračuna, bavi se naredni tekst.

2.2. Utvrđivanje vrednosti statizama regulacije napona

Kako je to već bilo rečeno, u praksi, proračun koeficijenata statizma se obavlja na osnovu podataka dobijenih merenjem. Merenja statizma naponske regulacije je najpovoljnije izvršiti prilikom pokretanja agregata (ulazak na mrežu posle remonta ili nekog drugog zastoja) ili njegovog zaustavljanja (planski silazak sa mreže). Tako je to bilo urađeno u studiji [1], kao i u okviru prethodno pomenute studije, koja se radi za potrebe Elektroprivrede Srbije. Sam postupak merenja implicira i način proračuna. Merenje se vrši prema opštoj jednopolnoj šemi sa slike 1 [1]. Ujedno, na slici je data i grafička interpretacija statizma po naponu, u skladu sa njegovom prethodno datom definicijom.



Slika 1. Šema merenja statizma naponske regulacije

Kod određivanja statizma naponske regulacije na visokonaponskoj strani blok-transformatora, merenja se obavljaju, najpre pri radu agregata na mreži u radnoj tački: $P=P_{min}$ (tehnički minimalna vrednost) i $Q=Q_n$ (ili blisko nominalnoj vrednosti), a zatim, posle isključenja *prekidača na visokonaponskoj strani blok-transformatora* ($P=0$, $Q=0$). Kod određivanja statizma naponske regulacije na generatoru, merenja se obavljaju, takođe najpre pri radu agregata na mreži u radnoj tački: $P=P_{min}$ (tehnički minimalna vrednost) i $Q=Q_n$ (ili blisko nominalnoj vrednosti) i posle isključenja *generatorskog prekidača* ($P=0$, $Q=0$).

2.2.1 Koeficijent statizma naponske regulacije na krajevima generatora

Nakon izvršenih pomenutih merenja, proračun koeficijenta statizma naponske regulacije na generatoru σ_g [%], vrši se preko sledeće relacije [1]:

$$\sigma_g = \frac{\frac{\Delta V_G}{V_{Gn}}}{\frac{\Delta Q_G}{Q_{Gn}}} \cdot 100 = \frac{V_{g2E1} - V_{g2E2}}{Q_{Gn}} \cdot 100 \quad (1)$$

gde je:

ΔV_G - promena napona na generatoru pri promeni reaktivne snage za ΔQ_G ;

ΔQ_G - promena reaktivne snage generatora;

V_{Gn} - bazni (nominalni) napon generatora;

Q_{Gn} - bazna (nominalna) reaktivna snaga generatora;

V_{g2E1} - napon na generatoru pri uključenom generatorskom prekidaču, pri minimalnoj aktivnoj i maksimalnoj reaktivnoj snazi generatora Q_{2E1} ;

V_{g2E2} - napon na generatoru pri isključenom generatorskom prekidaču, pri nultoj vrednosti reaktivne snage.

2.2.2 Koeficijent statizma naponske regulacije na visokonaponskoj strani blok-transformatora

Nakon izvršenih merenja, koeficijent statizma naponske regulacije na visokonaponskoj strani blok-transformatora σ_m [%], se prema [1] računa kao:

$$\sigma_m = \frac{\frac{\Delta V_m}{V_{mn}}}{\frac{\Delta Q_m}{Q_{mn}}} \cdot 100\% = \frac{V_{tr1E1} - V_{tr1E2}}{Q_{mn}} \cdot 100\% \quad (2)$$

gde je:

ΔV_m - promena napona na visokonaponskoj strani blok-transformatora pri promeni reaktivne snage za ΔQ_m

ΔQ_m - promena reaktivne snage na visokonaponskoj strani blok-transformatora;

V_{mn} - bazni (nominalni) napon na visokonaponskoj strani blok-transformatora;

Q_{mn} - bazna reaktivna snaga na visokonaponskoj strani blok-transformatora, koja se pri određivanju koeficijenta statizma pojedinačnog generatora uzima jednaka nominalnoj reaktivnoj snazi toga generatora, a pri određivanju zajedničkog statizma više generatora, ona je jednaka zbiru njihovih nominalnih reaktivnih snaga;

V_{tr1E1} - napon na sabirnicama pri uključenom generatorskom i mrežnom prekidaču, pri minimalnoj aktivnoj i maksimalnoj reaktivnoj snazi na sabirnicama ispitivanog generatora Q_{1E1} ;

V_{tr1E2} - napon na sabirnicama pri isključenom mrežnom prekidaču, pri čemu je reaktivna snaga jednaka nuli.

Treba napomenuti da statizam naponske regulacije na visokonaponskoj strani blok-transformatora σ_m (koristi se i termin mrežni statizam), za razliku od statizma naponske regulacije na krajevima generatora σ_g , ne figuriše kao parametar u savremenim regulatorima pobude. Njegova vrednost je u neposrednoj korelaciji sa zadatom vrednošću statizma na generatorskim sabirnicama i veličinama stanja generatora, što će biti posebno elaborirano u ovom radu.

2.3. Praktične mogućnosti podešenja koeficijenta statizma naponske regulacije

Da bi se ostvarili efekti prethodno elaboriranih naponskih statizama generatora, u okviru savremenih digitalnih regulatora pobude (ili preciznije, elektro-nskih, digitalno mikroprocesorskih regulatora) treba da postoji parametar - statizam na generatorskim sabirnicama. Tako je to rešeno u digitalnom regulatoru pobude, razvijenom u Institutu "Nikola Tesla" [2], u okviru koga je važna funkcija statizma realizovana programski, saglasno mogućnostima koje pruža savremena digitalna tehnika.

Statizam naponske regulacije σ_g je broj, koji se zadaje eksplicitno u procentima. On određuje proporcionalni faktor koji povezuje promenu reaktivne snage generatora sa odgovarajućom promenom referentne vrednosti statorskog napona. Regulator pobude, zbog postojanja integralnog dejstva, radi sa nultom greškom statorskog napona u stacionarnom stanju, u odnosu na zadatu referentnu vrednost.

U rešenju Instituta "Nikola Tesla", parametar - statizam na generatorskim sabirnicama, se može podešavati na dva načina:

- direktno, pomoću tastature na korisničkom panelu regulatora pobude;
- putem serijske veze i odgovarajućeg korisničkog programa.

U ovom rešenju, koeficijent statizma regulacije napona na sabirnicama generatora σ_g je, dakle, podešiva veličina, u okviru predefinisano širokog opsega mogućih vrednosti od $\pm 10\%$.

Pozitivna vrednost naponske statike generatora se uvodi radi kompenzacije induktivnog pada napona na blok-transformatoru ili prenosnoj mreži do tačke u kojoj se održava željena vrednost napona. Negativna vrednost se uvodi kod vezivanja više generatora na iste sabirnice, u cilju ravnomerne raspodele reaktivnog opterećenja među njima. Na taj način, ostvarena je velika udobnost i preglednost u podešavanju željenih vrednosti statizama, odnosno njihovog lakog eventualnog korigovanja, saglasno zahtevima EES Srbije u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih prilika.

Prethodno rečeno, odnosilo se na opterećenje generatora reaktivnom snagom induktivnog karaktera. A kako je to rešeno za potpobuđena stanja (generator opterećen reaktivnom snagom kapacitivnog karaktera)? U tom slučaju, imajući u vidu da je funkcija statizma realizovana programski u okviru

digitalnog regulatora pobude, omogućeno je da upravljački algoritam, prilikom detekcije kapacitivne vrednosti reaktivne snage generatora, zanemaruje komponentu referentne vrednosti napona statora koje potiče od statizma. Odnosno, tada statizam ima vrednost od 0%.

3. Inkorporiranje naponskog statizma u analize statičkih i dinamičkih stanja

3.1. Inkorporiranje u analize postdinamičkih kvazistacionarnih stanja

U prilazu Instituta "Nikola Tesla" analizama statičke sigurnosti, bio je uveden koeficijent statizma regulacije napona generatora [9 - 12]. Ovaj koeficijent je prisutan i kod utvrđivanja graničnih prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija [12 - 15]. U analizama statičke sigurnosti, posledice analiziranih poremećaja utvrđuju se na bazi procene postdinamičkih kvazistacionarnih stanja, pomoću odgovarajućih modela tokova snaga. Ovi modeli samo impliciraju dinamički prelazni proces, koji se neminovno javlja nakon poremećaja. Njihova sposobnost za više ili manje tačnom procenom uspostavljenih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja zavisi od same vrste modela tokova snaga (konvencionalni ili nekonvencionalni) i od načina odgovarajućeg inkorporiranja efekata postojeće systemske automatike, regulacije i zaštite.

U prilazu Instituta "Nikola Tesla", proračunavaju se tokovi snaga u karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima. U pitanju su nekonvencionalni modeli tokova snaga, koji obuhvataju stanja nastala nakon dejstva primarne regulacije napona i učestanosti, stanja nastala nakon dejstva sekundarne regulacije učestanosti i snage razmene i stanja nastala nakon preduzetih dispečerskih akcija, ako su one bile neophodne.

U ovim modelima tokova snaga, generatori sa statizmom po naponu dobijaju karakter PQ čvorova, u kojima reaktivna snaga ima oblik:

$$Q_G = Q_{GO} + Q_{GN}(V_G - V_{GO}) / (\sigma_g V_{GN}) \quad (3)$$

gde su:

V_{GO} i Q_{GO} - vrednosti napona i reaktivne snage generatora u polaznom, ustaljenom stanju;

V_G i Q_G - vrednosti napona i reaktivne snage generatora u uspostavljenom postdinamičkom kvazistacionarnom stanju;

V_{GN} i Q_{GN} - nominalne vrednosti napona i reaktivne snage generatora;

σ_g - podešena vrednost naponskog statizma na sabirnicama generatora u r.j.

Saglasno tome, izvršena je konzistentna dopuna dijagonalnih članova matrice Jakobijana. Uvođenjem statizma po naponu nisu bile ugrožene ranije uočene dobre karakteristike konvergencije razvijenih brzih postupka sa razdvajanjem varijabli, korišćenih za određivanje tokova snaga u navedenim karakterističnim postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima [12].

U unapređenim verzijama računarskih programa *STATNTC* (automatizovani proračun graničnih prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija [12-15]) i *NOVI IZBOR* (sofisticiraniji način izbora nominalne vrednosti faktora snage novih generatora i parametara i karakteristika njihovih blok-transformatora[16]), omogućeno je da se izračunavaju koeficijenti statizma naponske regulacije na visokonaponskoj strani blok-transformatora σ_m , čime se dobija korelacija sa zadatom (podešenom) vrednošću koeficijenta statizma naponske regulacije na generatoru σ_g .

3.2. Inkorporiranje u analize dinamičkih stanja

U okviru analiza dinamičke sigurnosti, nezaobilazno je obuhvatanje prelaznih stanja u sistemu regulacije pobude sinhronih mašina. Za te svrhe poslužili su standardizovani IEEE modeli pobudnih sistema i sistema regulacije pobude [17-19]. Međutim, u okviru ovih modela ne nalazi se model multivarijabilnog, odnosno višeulaznog sistema regulacije pobude, koji postoji u našem sistemu (u HE Đerdap 1 i HE Đerdap 2). Stoga je, koristeći kao osnovu referencu [17], posebno razvijen model multivarijabilnog, odnosno višeulaznog sistema regulacije pobude [20], za potrebe analiza različitih karakterističnih dinamičkih stanja EES Srbije i njegovog okruženja.

U toku rada na studiji "*Sistemske parametri regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a*" (faza I) izvršene su odgovarajuće dopune matematičkog modela sistema pobude, saglasno utvrđenoj strukturi modela i rezultatima sprovedenih eksperimenata, a sve u cilju što većeg približavanja stvarnom stanju ove regulacije u EES Srbije. *Prva dopuna* se odnosi na uključanje koeficijenta statizma regulacije napona na krajevima generatora, veličine koje su utvrđene u okviru sprovedenih eksperimenata. *Druga dopuna* se odnosi na uključanje integralnog dejstva regulatora pobude, *treća dopuna*, na uključivanje forsiranja pobude, a *četvrta dopuna*, na uključivanje povratne veze po struji rotora.

Strukturna šema tako formiranog generalizovanog modela sistema regulacije pobude generatora daje se na slici 2, uz napomenu da on uključuje i forsiranje pobude, a koje nije bilo praktično moguće eksplicirati u njegovoj prezentaciji.

Na šemi sa slike 2, ulazna veličina naponskog kanala regulatora pobude ima oblik:

$$\Delta V = V_{REF} + V_S - V_r - V \quad (4)$$

gde je:

V_{REF} - podešena referentna vrednost napona na krajevima statora generatora;

V_S - komponenta vezana za statizam po naponu generatora;

V_r - komponenta vezana za povratnu spregu po struji rotora generatora;

V - tekuća vrednost napona na krajevima generatora.

Komponenta vezana za uticaj statizma po naponu generatora V_S iznosi:

$$V_S = V_{GN} \sigma_g (Q_G - Q_{GO}) / Q_{GN} \quad (5)$$

gde je:

V_{GN} - nominalni napon generatora;

σ_g - koeficijent statizma regulacije napona na krajevima generatora;

Q_G - tekuća vrednost reaktivne snaga generatora;

Q_{GO} - vrednost reaktivne snaga generatora u polaznom ustaljenom stanju;

Q_{GN} - nominalna reaktivna snaga generatora.

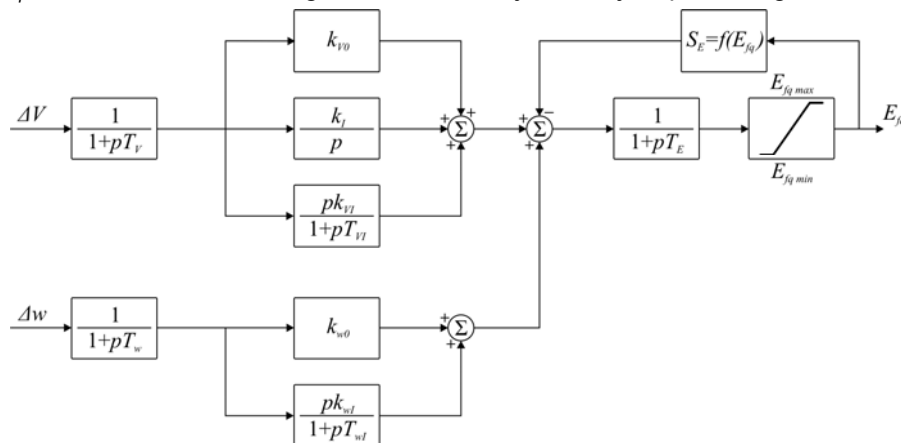
U EES Srbije, povratnu vezu po struji rotora generatora imaju regulatori pobude generatora A4 u TE N. Tesla A, A5 u TE Kolubara B i generatora u TE Morava. Stoga je, u okviru formiranog modela sistema regulacije pobude generatora, podešenoj referentnoj vrednosti napona generatora V_{REF} , pridodata je komponenta vezana za struju rotora generatora V_r , koja se formira kao:

$$V_r = k_{sr} E_q \quad (6)$$

gde je:

k_{sr} - pojačanje povratne vezue po struji rotora generatora;

E_q - elektromotorna sila generatora, uslovljena strujom pobudnog kola.



Slika 2. Strukturna šema multivarijabilnog sistema regulacije pobude generatora

U strukturnoj šemi sa slike 2, uvedene oznake imaju sledeća značenja:

T_v, T_{v1} - vremenske konstante kanala napona sistema regulacije pobude;

k_{v0}, k_{v1} - pojačanja po nultom i prvom izvodu naponskog kanala;

k_I - integralno pojačanje regulatora;

k_{w0}, k_{w1} - pojačanja po nultom i prvom izvodu kanala učestanosti;

T_w, T_{w1} - vremenske konstante kanala učestanosti;

T_E - vremenska konstanta pobudnog sistema;

E_{fq0} - elektromotorna sila, srazmerna naponu pobudnog kola u polaznom, stacionarnom stanju;

$f_{sat}(E_{fq})$ - uticaj zasićenja magnetnog kola, koje samo postoji kod elektromašinskih sistema pobuđivanja.

Izlazna veličina prikazanog modela je napon na krajevima pobudnog kola generatora, "preslikan" na stator, odnosno elektromotorna sila E_{Tq} , koja dalje komunicira sa modelom sinhronog generatora, na način opisan u [21].

Saglasno izvršenim dopunama matematičkog modela sistema pobude, izvršene su odgovarajuće dopune računarskih programa, razvijenih u Institutu "Nikola Tesla", za simulacije dinamičkih stanja, različite vrste i trajanja. U pitanju su računarski programi *DINST* (analize tranzijentne stabilnosti [21]), *PRIMCONT* (*PRIMary CONTrol* - tačnije praćenje prelaznih procesa relativno dužeg trajanja [21-23]) i *PRSECONT* (*PRImary and SEcondary CONTrol*). Računarski program *PRSECONT*, namenjen je za strože praćenje *prelaznih procesa relativno dugog trajanja*, odnosno, omogućuje na konsekventan i kontinualni način praćenje toka i efekata, kako primarne regulacije napona i učestanosti, tako i *sekundarne i tercijarne regulacije učestanosti i snage razmene*. Ovaj računarski program baziran je na delu mogućnosti koje pruža računarski program *STATNTC*, i na daljem proširenju i unapređenju računarskog programa *PRIMCONT*, koja se odnose na inkorporiranje sekundarne i tercijarne regulacije učestanosti i snage razmene. Takođe, predmet posebnog rada biće i dinamički aspekti uključivanja statizma naponske regulacije.

4. Neki od karakterističnih primera uvažavanja naponskog statizma generatora

4.1. Uvodne napomene

Efekti koeficijenta statizma regulacije napona generatora su sagledani na modelu realne elektroenergetske interkonekcije, koju čine EES Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Makedonije, Rumunije, Mađarske, Bugarske, Grčke i Albanije. Modelovane su kompletne visokonaponske mreže 220 kV i 400 kV u pomenutim EES (u EES Grčke, i relevantni delovi mreže 150 kV), uz kompletno modelovanje mreže 110 kV u EES Srbije i uvažavanje ostatka UCTE interkonekcije. Razmatrano je maksimalno stanje, ostvareno 31 decembra 2010. godine u 17:30 h, saglasno podacima o 15-to minutnim opterećenjima i angažovanju agregata, zvanično dobijenih od Elektromreže Srbije.

Uz sagledavanje globalnih aspekata uticaja statizma regulacije napona generatora na naponsko-reaktivna stanja, predmet posebne observacije su generatori 1, 2 i 6 u TE N. Tesla A i generator 1 u TE Kostolac B. Osnovni razlog za to nije samo u činjenici da su u pitanju relevantni generatori, već u činjenici da je u novim ispitivanjima, koje je sproveo Institut "Nikola Tesla" [24-27], u okviru studije "*Sistemske parametri regulacije pobude i turbinske regulacije u elektranama EPS-a*" (faza I), kod svih ovih generatora utvrđena nulta vrednost koeficijenta statizma regulacije napona na krajevima generatora. U prethodnim merenjima, obavljenim 2005. godine [1], utvrđeno je da, na primer, generator 2 u TE N. Tesla A je imao statizam po naponu generatora u iznosu od +2.02 %, a generator 1 u TE Kostolac B, u iznosu od +2.66 %.

U nastavku rada, najpre se sagledavaju efekti naponskog statizma u okviru statičkog prilaza, odnosno na bazi utvrđenih postdinamičkih kvazistacionarnih stanja. Zatim se ti efekti sagledavaju u analizama dinamičkih stanja na prethodno opisani način.

4.2. Statički aspekti naponskog statizma generatora u analizama postdinamičkih kvazistacionarnih stanja

Efekti naponskog statizma u okviru statičkog prilaza, utvrđivani su primenom računarskog programa *NOVI IZBOR*, koji korisniku pruža široke mogućnosti kod izbora poremećaja i generisanja niza pokazatelja za uspostavljena postdinamička kvazistacionarna stanja, i njihovih promena u odnosu na polazno, ustaljeno stanje. Od niza dobijenih rezultata, navode se rezultati za dva karakteristična slučaja.

U *prvom* slučaju, analizirani su posledice simultanog povećanja ukupne snage potrošača u celom razmatranom EES Srbije za 10% (za 761.0 MW i 194.2 Mvar). U *drugom* slučaju, razmatran je simultani ispad generatora 1 i 2 u TE N. Tesla B (gubitak injektiranja od 1113 MW i 502 Mvar). U oba slučaja, intenzivni su procesi u *P-f* konturi, ali i u *Q-V* konturi (nastali debalansi u aktivnoj i reaktivnoj snazi aktiviraju intenzivan rad primarne regulacije učestanosti i napona). U ovom radu, predmet primarne pažnje biće *Q-V* kontura, u okviru koje će biti valorizovan učinak koeficijenta statizma naponske regulacije.

Globalni efekti simultanog povećanja ukupne potrošnje, dati su u tabeli 1. Ona prikazuje promene ukupno generisane reaktivne snage (ΔQ_G), promene ukupnih gubitaka aktivne (ΔP_g) i reaktivne (ΔQ_g) snage u modelovanom EES Srbije, u odnosu na polazno stanje i promene totala razmene reaktivne snage sa susedima (ΔQ_r). Dalje, ova tabela prikazuje i promenu indeksa napona (ΔI_V), na nivou modelovanog EES Srbije (modelovane mreže naponskih nivoa 110, 220 i 400 kV). Taj indeks, prvobitno uveden u [28, 29], koji može biti veoma indikativan za postavljene ciljeve ovih globalnih analiza, sračunava se na sledeći način:

$$I_V = \frac{\sum_{N_G} \frac{V_g}{V_{gn}} + \sum_{N_{V400}} \frac{V_V}{400} + \sum_{N_{V220}} \frac{V_V}{231} + \sum_{N_{V110}} \frac{V_V}{115}}{N_{EL}} \quad (7)$$

gde su:

V_g - ostvarene vrednosti napona na krajevima generatora;

V_{gn} - nominalne vrednosti napona generatora;

V_V - ostvarene vrednosti napona na početku dalekovoda naponskih nivoa 400, 220 i 110 kV;

N_{EL} - ukupan broj elemenata u razmatranom EES, odnosno

$N_{EL} = N_G + N_{V400} + N_{V220} + N_{V110}$, gde je N_G ukupan broj generatora, a N_{V400} ,

N_{V220} i N_{V110} ukupan broj dalekovoda naponskih nivoa 400, 220 i 110

kV, respektivno.

Svi pomenuti pokazatelji iz tabele 1, dati su za varijante A, B i C:

- A - svi generatori u EES Srbije su imali nultu vrednost statizma naponske regulacije na krajevima generatora;
- B - svi generatori u EES Srbije imaju nultu vrednost ovog statizma, osim generatora 1, 2 i 6 u TE N.Tesla A i generatora 1 u TE Kostolac B, koji su imali vrednost naponskog statizma u iznosu od + 2%;
- C - svi generatori u EES Srbije su imali vrednost ovog statizma naponske regulacije u iznosu od + 2%.

Tabela 1. Globalni efekti simultanog povećanja snaga potrošača EES-a Srbije za 10%

Varijanta	ΔQ_G	ΔP_g	ΔQ_g	ΔQ_r	ΔI_V
	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	[Mvar]	[r.j.]
A	613.5	65.42	521.24	134.1	-0.0159
B	617.7	65.04	517.32	123.7	-0.0154
C	646.2	64.16	504.62	77.8	-0.0125

Analizirajući pokazatelje date u tabeli 1, jasno se uočava veliki praktičan značaj postojanja statizma naponske regulacije generatora σ_g . Sa njihovim većim vrednostima, angažovani generatori u EES od interesa imaju veći odziv po reaktivnoj snazi, u okviru raspoloživih mogućnosti, sa većim vrednostima napona na njihovim krajevima. To se direktno odražava na povoljnije vrednosti relevantnih pokazatelja uspostavljenih postdinamičkih stanja u EES od interesa. Dakle, ukoliko se pojave veći zahtevi za reaktivnom snagom, postojanje statizma naponske regulacije generatora σ_g omogućava dodatno podizanje naponske ravni u njihovoj okolini, što implicira smanjenje gubitaka aktivne i reaktivne snage, odnosno, pomenute povoljnije vrednosti relevantnih pokazatelja. Poseban problem je optimalna raspodela povećanja napona po generatorima, odnosno optimalan izbor vrednosti statizama naponske regulacije po pojedinim generatorima, u cilju optimizacije tokova reaktivnih snaga u mreži.

Neizbežno povećanje gubitaka aktivne i reaktivne snage je manje u varijanti B, a posebno u varijanti C, u kojoj su svi generatori u EES Srbije imali vrednost statizma naponske regulacije u iznosu od + 2%. U ovoj varijanti, smanjuje se i učešće suseda u reaktivnoj snazi (za 56.3 Mvar), što ima, i što će imati, važan praktičan značaj.

Da bi se efekti postojanja statizma naponske regulacije generatora još bolje sagledali, razmatran je i prethodno pomenuti *drugi*, karakterističan slučaj (simultani ispad generatora 1 i 2 u TE N. Tesla B), koji je indikativan poremećaj za razmatrani cilj, jer bi uzrokovao trenutni deficit u reaktivnoj snazi u iznosu od 502 Mvar. U ovom slušaju, predmet posebne obseravcije su generatori 1, 2 i 6 u TE N.Tesla A i generator 1 u TE Kostolac B, iz već prethodno pomenutih razloga. Karakteristični rezultati za ovaj slučaj, dati su posredstvom tabela 2, 3 i 4 i slike 2.

Globalni efekti se sagledavaju u postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima, dostignutim nakon razmatranog poremećaja, posredstvom tabele 2, analogne sa tabelom 1. Tabela 3 pokazuje uticaj podešenih vrednosti statizma σ_g , na uspostavljena nova stanja obseraviranih generatora. Tabela 4, za ove generatore, daje odnose podešenih vrednosti statizama naponske regulacije na krajevima generatora σ_g i ostvarenih vrednosti statizama na krajevima blok-transformatora σ_m . Slika 3 daje grafičku interpretaciju rezultata iz tabele 4.

Tabela 2. Globalni efekti simultanog ispada generatora 1 i 2 u TE N.Tesla B

Varijanta	ΔQ_G	ΔP_g	ΔQ_g	ΔQ_r	ΔI_V
	[Mvar]	[MW]	[Mvar]	[Mvar]	[r.j.]
A	493.2	37.62	101.06	145.0	-0.010
B	510.2	36.96	96.30	119.5	-0.0091
C	533.1	36.54	89.90	87.1	-0.0075

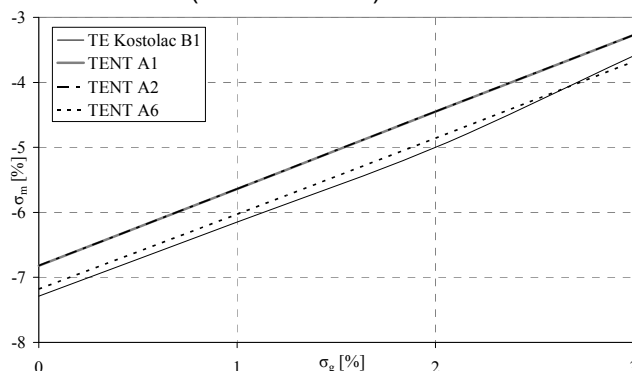
Tabela 3. Uticaj statizma naponske regulacije na krajevima generatora σ_g

Elektrana	σ_g	ΔU_g	ΔQ_g	ΔU_m	ΔQ_m
	[%]	[%]	[Mvar]	[%]	[Mvar]
TE Kostolac B1	0	0	58.1	-1.795	53.4
TENT A1		0	27.6	-1.308	24.8
TENT A2		0	27.7	-1.308	24.8
TENT A6		0	78.1	-2.490	71.3
TE Kostolac B1	1	0.295	63.5	-1.661	58.6
TENT A1		0.235	30.6	-1.205	27.6
TENT A2		0.235	30.5	-1.205	27.6
TENT A6		0.432	88.7	-2.378	81.1
TE Kostolac B1	2	0.648	69.9	-1.492	64.7
TENT A1		0.528	34.3	-1.071	31.1
TENT A2		0.528	34.3	-1.071	31.1
TENT A6		1.002	103.2	-2.232	94.4
TE Kostolac B1	3	1.075	77.3	-1.278	71.9
TENT A1		0.898	38.9	-0.899	35.5
TENT A2		0.898	38.9	-0.899	35.4
TENT A6		1.810	124.1	-2.031	113.5

Tabela 4. Odnos statizama naponske regulacije na krajevima generatora σ_g i blok-transformatora σ_m

Elektrana	σ_m [%]			
	$\sigma_g=0\%$	$\sigma_g=1\%$	$\sigma_g=2\%$	$\sigma_g=3\%$
TE Kostolac B1	-7.29	-6.15	-5.00	-3.59
TENT A1	-6.82	-5.64	-4.45	-3.27
TENT A2	-6.82	-5.64	-4.45	-3.27
TENT A6	-7.18	-6.03	-4.86	-3.68

Prethodno prikazani rezultati, na evidentan način, i dalje ukazuju na veliki praktičan značaj koji imaju statizmi regulacije napona na uspostavljena postdionička stanja. Jasno se uočava njihov sistemski karakter, jer se pri odgovarajućim podešenim vrednostima statizama naponske regulacije na krajevima generatora, a koje svakako nisu nulte, dobija značajan benefit. Pozitivni globalni sistemski efekti su prisutni u tabeli 2, a tabela 3 se odnosi na observirane generatore (generatori 1, 2 i 6 u TE N.Tesla A i generator 1 u TE Kostolac B). Saglasno pokazateljima iz ove tabele, za nultu vrednost statizma σ_g , ukupan neto odziv u reaktivnoj snazi observiranih generatora (odziv na krajevima blok-transformatora, koji se plasira u mrežu) bi iznosio 174.3 Mvar, a za podešenu vrednost statizma u iznosu od 2%, taj odziv bi iznosio 221.7 Mvar (47.4 Mvar više). Za podešenu vrednost statizma u iznosu od 3%, taj odziv bi iznosio 256.3 Mvar (82.0 Mvar više).



Slika 3. Ostvarene vrednosti statizma σ_m , u funkciji podešenih vrednosti statizma σ_g

Već je bilo rečeno, da se u izmenama i dopunama regulative EMS [8], uvodi i normira samo koeficijent statizma regulacije napona na sabirnicama prenosne mreže σ_m , na koju je priključena elektrana. Zahteva se u [8], da taj koeficijent mora biti podesiv u opsegu od -1,5% do -6%.

Rezultati prikazani u tabeli 4 (a grafički intepretirani na slici 3) pokazuju da bi propisana gornja granica za σ_m od -6%, za observirane generatore, bila praktično zadovoljena za vrednosti statizma σ_g u iznosu oko 1%. Odnosno, za manje *apsolutne* vrednosti za σ_m , u propisanom opsegu od -1,5% do -6%, bilo bi potrebno da statizam σ_g bude veći od 1%, i to značajno.

Sada se postavlja jedno važno praktično pitanje: kako to postići u praksi, jer u dokumentu [8] figuriše samo statizam σ_m , a ne ekspliciraju se vrednosti statizma σ_g ? A poznato je da je vrednost statizma σ_m u neposrednoj korelaciji sa zadatom vrednošću statizma σ_g i veličinama stanja generatora.

Već je takođe bilo rečeno, da je u savremenim digitalnim regulatorima pobude, prisutan koeficijent statizma regulacije napona na sabirnicama generatora σ_g , koja je, na udoban i pregledan način, podesiva veličina. On se zadaje kao broj, sa vrednošću definisanom u procentima. Svaka njegova vrednost, u okviru predefinisano širokog opsega mogućih vrednosti od $\pm 10\%$, može se eksplicitno zadati, uključujući i vrednost od 0%.

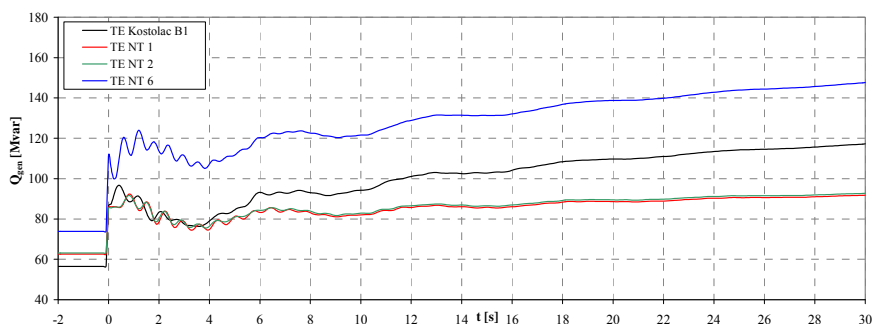
Prethodno rečeno upućuje na razmišljanje o uvođenju statizma σ_g u regulativu EMS, saglasno iznetim argumentima, a da se njegovo normiranje izvrši selektivno, saglasno realnim mogućnostima generatora u EES Srbije, u pogledu plasmana reaktivne snage. Već sada se može reći da bi turbogeneratori (koji po pravilu imaju niže vrednosti nominalnog faktora snage, u odnosu na hidrogeneratore) trebalo da imaju srazmerno veće vrednosti za σ_g , u odnosu na hidrogeneratore. Konkretno vrednosti statizama pojedinih generatora mogu se definisati tek na osnovu analize većeg broja stanja EES Srbije i na osnovu tog sagledavanja potrebne reakcije pojedinih generatora u sistemu u pogledu nivoa napona, pri različitim nivoima njihovog reaktivnog opterećenja, za niz različitih stanja u mreži. Dakle, intencija je da se raspoloživi resursi reaktivne snage koriste racionalno, i da se aktiviraju u okviru svojih realnih mogućnosti, kada je to EES-u Srbije najpotrebnije. Naravno, konačne odluke na ovom planu i eventualnoj dopuni regulative EMS, trebalo bi doneti nakon izrade posebne studije (ili studija), koja bi se posebno fokusirala na ovu problematiku. Ovo je samo predlog za razmišljanje o eventualnoj dopuni regulative EMS. Da bi ovaj predlog imao potrebnu relevanciju, obavljene su i analize dinamičkih stanja, u okviru kojih su verifikovani rezultati statičkog prilaza, čime se bavi naredni tekst.

4.3. Efekti naponskog statizma generatora u analizama dinamičkih stanja

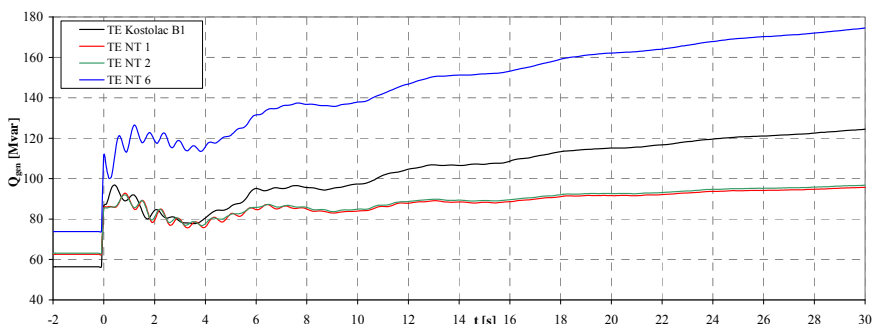
Sagledavanje efekata naponskog statizma generatora, u analizama dinamičkih stanja, obavljeno je primenom računarskog programa *PRIMCONT*, koji korisniku pruža široke mogućnosti kod izbora poremećaja i generisanja niza pokazatelja za sam tok prelaznog stanja, pokazatelja za uspostavljena postdinamička kvazistacionarna stanja i njihovih promena u odnosu na polazno, ustaljeno stanje. Od niza dobijenih rezultata, raspoloživi prostor za ovaj rad, omogućava navođenje rezultata za simultani ispad generatora 1 i 2 u TE N.Tesla B (gubitak injektiranja od 1113 MW i 502 Mvar).

Grafička interpretacija nekih od karakterističnih rezultata data je na slikama 4 i 5. Na njima, za razmatrani poremećaj, daju se promene reaktivne snage na krajevima generatora 1, 2 i 6 u TE N. Tesla A i generatora 1 u TE Kostolac B, za vremenski interval od 30 s. Slika 4 se odnosi na varijantu A (svi generatori u EES Srbije su imali nultu vrednost statizma naponske regulacije na krajevima generatora), a slika 5, na varijantu B (svi generatori u EES Srbije imaju nultu vrednost ovog statizma, osim generatora 1, 2 i 6 u TE N.Tesla A i generatora 1 u TE Kostolac B, koji su imali vrednost naponskog statizma u iznosu od + 2%). Observirani genertori imaju statičke samopobudne sisteme i proporcionalnu regulaciju pobude, sa parametrima modela koji su utvrđeni u novim ispitivanjima, koje je sproveo Institut "Nikola Tesla" [24-28].

Analizom dobijenih rezultata dinamičkih simulacija, konstatovana je njihova visoka podudarnost sa rezultatima statičkih simulacija, zato što razlika uspostavljenih reaktivnih snaga i napona na krajevima generatora iznosi svega nekoliko procenata, saglasno prikazanom u tabeli 5.



Slika 4. Promene reaktivnih snaga generatora 1, 2 i 6 u TE N.Tesla A i generatora 1 u TE Kostolac B - varijanta A



Slika 5. Promene reaktivnih snaga generatora 1, 2 i 6 u TE N.Tesla A i generatora 1 u TE Kostolac B - varijanta B

Tabela 5. Rezultati statičkog i dinamičkog prilaza

Varijanta	Prilaz	TE N. Tesla 1	TE N. Tesla 2	TE N. Tesla 6	TE Kostolac B1
		Q_g [Mvar]	Q_g [Mvar]	Q_g [Mvar]	Q_g [Mvar]
A	Statički	90.1	90.7	152	114.5
	Dinamički (Slika 3)	91.8	92.7	147.6	117.2
B	Statički	96.8	97.5	177.1	126.3
	Dinamički (Slika 4)	95.8	96.8	174.5	124.5

U varijanti A, u statičkom prilazu, u ostvarenom postdinamičkom stanju, reaktivne snage generatora 1, 2 i 6 u TE N.Tesla A i generatora 1 u TE Kostolac B, iznosile su: 90.1, 90.7, 152.0 i 114.5 Mvar, respektivno. Dinamički prilaz je dao sledeće vrednosti (slika 4) 91.8, 92.7, 147.6 i 117.2 Mvar, respektivno. U varijanti B, statički prilaz je dao sledeće vrednosti: 96.8, 97.5, 177.1 i 126.3 a dinamički prilaz: 95.8, 96.8, 174.5 i 124.5 Mvar, respektivno (slika 5).

Ujedno, time je izvršena verifikacija statičkog prilaza, koji je, na evidentan način, ukazao na veliki praktičan značaj koji imaju vrednosti statizama regulacije napona generatora na uspostavljena postdinamička naponskoreaktivna stanja. Dakle, aktualizuje se predlog o uvođenju statizma σ_g u regulativu EMS, saglasno iznetim argumentima, a da se njegovo normiranje, kako je to već bilo istaknuto, izvrši selektivno, saglasno realnim mogućnostima generatora u EES Srbije, u pogledu plasmana reaktivne snage.

5. Zaključci

U radu su izloženi načini inkorporiranja koeficijenta statizma regulacije napona generatora u analize statičke i dinamičke sigurnosti elektroenergetskih interkonekcija. Na primeru prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju, utvrđen je veliki praktičan značaj njegovog postojanja i adekvatnog podešenja, a ujedno je izvršena i verifikacija statičkog prilaza, baziranog na utvrđivanju uspostavljenih postdinamičkih kvazistacionarnih naponsko-reaktivnih stanja. Analiza dobijenih rezultata simulacija omogućila je formiranje predloga za razmišljanje o eventualnoj dopuni regulative EMS-a, uvođenjem statizma σ_g , saglasno iznetim argumentima, a da se njegovo normiranje izvrši selektivno, saglasno realnim mogućnostima generatora u EES Srbije, u pogledu ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih prilika.

Literatura

- [1] "Regulacija napona, odnosno pobudne struje sinhronih generatora u elektranama Elektroprivrede Srbije sa gledišta zahteva sistema", Studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2005.
- [2] D. Arnautović, Z. Ćirić, Đ. Stojić, N. Miložčić, D. Joksimović, M. Milinković, S. Veinović, M. Bakić, V. Palija, "Modernizacija, rekonstrukcija i razvoj sistema pobude sinhronih generatora", *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*, knjiga 21, 2011., str. 181-195.
- [3] "UCTE Operation Handbook, Policy 3: Operational Security; B. Voltage Control and Reactive Power Management", Final Version (approved by SC on 19 March 2009)
- [4] "UCTE Operation Handbook, Policy 1: Load-Frequency Control and Performance; A. Primary Control", Final Version (approved by SC on 19 March 2009)
- [5] "Pravila o radu prenosnog sistema", Elektromreža Srbije, Verzija 1.0, april 2008.
- [6] "PSS/E-29 (Power System Simulator for Engineering)", Power Technologies, Inc., October 2002.
- [7] "User's Manual, DlgSILENT Power Factory Version 14", DlgSILENT, GmbH, Gomaringen, Germany, 2008.
- [8] "Pravila o radu prenosnog sistema" JP EMS, Dokumentat: IZMENE I DOPUNE", Sl.gl. 3/2012. od 18.01.2012.
- [9] D.P. Popović, "An Efficient Methodology for Steady-state Security Assessment of Power Systems", *Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol.10, No.2, April, 1988, pp 110-116.
- [10] D.P. Popović, "An Efficient Unified Methodology for Steady-State Security Assessment of Electric Power Interconnection", *International Review of Electrical Engineering*, Vol.5, No.1, January-February 2010., pp. 241-249.

- [11] D.P Popović, Đ. Dobrijević, N. Mijušković, D. Vlaisavljević, "Metodološki i praktični aspekti studijskih analiza statičke sigurnosti elektroenergetskog sistema Srbije", *Elektroprivreda*, br.4,1999, str.88-94.
- [12] D.P. Popović *Statička sigurnost elektroenergetskih interkonekcija*, Institut "Nikola Tesla", Beograd, str.170, ISBN 86-83349-03-9, jun 2004.
- [13] D.P. Popović, "Automatizovani proračun graničnih prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija", *Elektroprivreda*, br.4, 2003, str. 5-17.
- [14] D.P. Popović, "Praktični aspekti automatizovanog proračuna graničnih prenosnih kapaciteta elektroenergetskih interkonekcija", *Elektroprivreda*, br.1, 2004, str. 5-16.
- [15] D.P. Popović, "Automatic Cross-Border Transmission Capacity Calculation in Electric Power Interconnections", *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Electronics and Energetics*, vol. 22, No. 1, April 2009, pp. 49-60.
- [16] M. Ivanović, D. P. Popović, S. Minić, "Izbor najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika blok-transformatora u HE Đerdap 2 sa aspekta naponsko-reaktivnih stanja EES-a Srbije", *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*, Beograd, Knjiga 21, 2011., str.109-128.
- [17] IEEE Committee Report, "Computer Representation of Excitation Systems", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol.PAS-87, June 1968. pp. 1460-1464.
- [18] IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power System Stability Studies", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 2, February 1981., pp. 494-509.
- [19] "IEEE Standard Definition for Excitation Systems for Synchronous Machines", An American National Standard, The Institute of EEE, NY, USA, 1986.
- [20] D. P. Popović, "An Approach to the Evaluation of Electromechanical Transient Process in Power Systems", *Electric Power Systems Research*, Vol. 7, No. 2, 1984., pp. 141-151.
- [21] D. P. Popović, *Dinamička sigurnost elektroenergetskih interkonekcija*, Institut "Nikola Tesla", Beograd, 255 str., ISBN 978-86-83349-07-4, jun 2008.
- [22] D. P. Popović, "Jedna metodologija za kontinualno praćenje tokova snaga u uslovima odvijanja primarne regulacije učestanosti elektroenergetskih sistema", časopis "*Elektroprivreda*", br.3, 1997., str.3-11.
- [23] D. P. Popović, S. Mijailović, "An Efficient Methodology for the Analysis of Primary Frequency Control of Electric Power System", *Int. Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 22, 2000., pp 331-341.
- [24] "Izveštaj o izvršenim ispitivanjima sistema pobude na agregatu A2 u TE Nikola Tesla A", Institut "Nikola Tesla", Beograd, maj, 2011.
- [25] "Izveštaj o izvršenim ispitivanjima sistema pobude na agregatu A1 u TE Nikola Tesla A", Institut "Nikola Tesla", Beograd, avgust, 2011.

- [26] "Izveštaj o izvršenim ispitivanjima sistema pobude na agregatu A6 u TE Nikola Tesla A", Institut "Nikola Tesla", Beograd, avgust, 2011.
- [27] "Izveštaj o izvršenim ispitivanjima sistema pobude na agregatu B1 u TE Kostolac", Institut "Nikola Tesla", Beograd, septembar, 2011.
- [28] "Planiranje izvora reaktivne snage u prenosnoj mreži EES Srbije-II faza", Studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2006.
- [29] D. P. Popović, M. Lj. Stojković, *Naponsko-reaktivna stanja prenosnih mreža*, Institut "Nikola Tesla", Beograd, ISBN 978-86-83349-09-8, jun 2009. godine, str.295.

Abstract. This paper examines the impact of generator voltage droop to the voltage-reactive states of transmission networks. First, voltage droop definition is given, as well as its measurement procedure and setting. Models of incorporating generator voltage droop into an analysis of static and dynamic states are given. These analyses are incorporated into appropriate computer programs, developed at the Institute "Nikola Tesla", for the static and dynamic security analyses of electrical power systems. The final chapter presents some typical examples of practical applications of static security analyses. The Serbian power system, together with neighbouring power systems has been considered. Special attention has been paid to quantifying the influence of generator voltage droop to post-dynamic quasi-stationary states

Keywords: droop, generator voltage, excitation control, voltage-reactive states, Serbian transmission network

Generator Voltage Droop and Voltage - Reactive States of Transmission Network

