

Izbor najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika blok-transformatora u HE Đerdap 2 sa aspekta naponsko-reaktivnih stanja EES-a Srbije

Milan Ivanović, Dragan P.Popović, Saša Minić

Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a
11000 Beograd, Srbija
mivanovic@ieent.org
dpopovic@ieent.org
sasa.minic@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu se daju rezultati studije, koja se bavila izborom najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika novih blok-transformatora u revitalizovanoj HE Đerdap 2. To je urađeno sa aspekta ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja EES-a Srbije.

Ključne reči: izbor, parametri, karakteristike, blok-transformator, HE Đerdap 2, naponsko-reaktivna stanja, EES 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. Kod izbora pomenutih parametara, uz uvažavanje ekonomskih kriterijuma, neophodno je da se postigne razumni kompromis između cene njihovih konstrukcija, pogonskih troškova i kvaliteta plasirane električne energije u EES, odnosno neophodno je da se pri tome uvažavaju i zahtevi koje neminovno nameće EES (tzv. sistemski zahtevi).

Ova problematika je od posebnog značaja za planirane nove izvore. Ne manji značaj postoji i za izvore, koji su predviđeni za revitalizaciju, imajući u vidu da će oni raditi u novim pogonskim uslovima, koji su, po pravilu, različiti u odnosu na uslove njihovog ulaska u pogon i uslove kasnije eksploatacije.

Osnovni cilj studije [1] je bio da izvrši definisanje najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika novih blok-transformatora u revitalizovanoj HE

Đerdap 2, kako sa aspekta zahteva EES-a Srbije, tako i sa aspekta same elektrane. U kontekstu definisanja ovih parametara i karakteristika, potrebno je bilo i da se analiziraju i utvrde njihovi efekti na parametre kratkih spojeva i rad postojećih zaštitnih uređaja u HE Đerdap 2.

Sve analize za potrebe studije [1], urađene su na modelu realne elektroenergetske interkonekcije, koju sačinjavaju EES Srbije, Crne Gore, Bosne i Hercegovine, Hrvatske, Mađarske, Makedonije, Rumunije, Bugarske, Grčke i Albanije. Modelovane su kompletne visokonaponske mreže 220 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. Pri tome, kako je to već rečeno, u potpunosti je respektovan dalji razvoj prenosne mreže Srbije, saglasno rezultatima studija [2, 3].

Analize su bile započete razmatranjem dva ostvarena realna stanja mreže EES-a Srbije u pogledu nivoa opterećenja, saglasno podacima o 15-to minutnim opterećenjima i angažovanju agregata, dobijenih od Elektromreže Srbije. Obuhvaćeno je maksimalno stanje, ostvareno 31 decembra 2010. godine u 17:30 h i minimalno stanje, ostvareno 2 maja 2010. godine u 04:15 h. Pri tome se operisalo sa postojećim parametrima generatora (nominalna prividna snaga 10 x 27.55 MVA, nominalni faktor snage 0.98) i blok-transformatora (nominalna prividna snaga 5 x 63 MVA, fiksni prenosni odnos 6.3/123 kV/kV, napon kratkog spoja 17.29%) u HE Đerdap 2.

Analize perspektivnih statičkih stanja EES-a Srbije, u prethodno pomenutom njegovom širokom okruženju, obavljene su po sledećim etapama (tzv. "presečnim" godinama): 2015, 2020. i 2025. Obuhvaćena su maksimalna i minimalna stanja, koja se očekuju pomenutih godina. Pri tome se operisalo sa parametrima revitalizovanih generatora u HE Đerdap 2 (nominalna prividna snaga 10 x 32 MVA, nominalni faktor snage 0.98) i novim parametrima blok-transformatora (nominalna prividna snaga 5 x 67 MVA, fiksni prenosni odnos 6.3/123 kV/kV, napon kratkog spoja 17.29%).

Osnovni cilj ovoga rada je da izloži rezultate pomenute studije [1], koji su omogućili izbor najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika novih blok-transformatora u revitalizovanoj HE Đerdap 2, sa aspekta zahteva EES-a Srbije u pogledu ostvarenja povoljnih naponsko reaktivnih prilika. Efekti, koji se odnose na parametre kratkih spojeva i rad postojećih zaštitnih uređaja u HE Đerdap 2, biće predmet posebnog rada.

2. Metodološki i praktični aspekti izbora parametara i karakteristika blok-transformatora

2.1. Uvodne napomene

Razvoj metodologija za izbor i analizu najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika agregata i njihovih blok-transformatora, razvijenih u Institutu "Nikola Tesla", bilo je započet u okviru rada na studiji [4]. Praktično se radilo o posebno koncipiranim analizama statičkih stanja i analizama statičke i tranzijentne stabilnosti EES-a, odnosno interkonekcija, u kojima se oni nalaze. Studija [4] se bavila novim hidroelektranama, čije se priključenje na mrežu Srbije planira na naponskom nivou 110 kV, kao i postojećim hidroelektranama, priključenim na naponskim nivoima 110 kV i 35 kV, koje su predviđene za revitalizaciju, za posmatrani vremenski period do 2020. godine. O rezultatima te studije, upoznata je stručna javnost preko radova [5] - [7]. Dalje, ove metodologije su primenjivane u studiji [8] (iz koje su proistekli radovi [9] - [13]), koja se bavila novim turbogeneratorima u TE Kolubara B i TE N.Tesla B3. Zatim, ove metodologije su primenjivane u studiji [14] (iz koje su proistekli radovi [15,16]), koja se bavila definisanjem najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika revitalizovanih agregata u HE Zvornik. Takođe, ove metodologije su primenjivane kod sagledavanja relevantnih dinamičkih aspekata usled odgovarajuće korekcije nekih od osnovnih parametara revitalizovanih generatora u HE Bajina Bašta [17] - [19].

Vrednost nominalnog faktora snage generatora i vrednosti parametara njegovog blok-transformatora nalaze se u veoma složenoj međusobnoj interaktivnoj povezanosti, koju nije moguće svesti na odgovarajuće, jednostavnije i jednoznačne analitičke forme. Osnovni kriterijum za izbor najpovoljnijih vrednosti ovih parametara je ostvarenje željenog (maksimalnog) iskorišćenja pogonskih mogućnosti generatora, saglasno zahtevima i potrebama EES-a u pogledu ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih prilika.

U ovom radu ukratko se izlažu samo one metodologije, praćene odgovarajućim računarskim programima, koje su korišćene za izradu studije [1]. U pitanju su metodologije i odgovarajući računarski programi, u okviru kojih se, između ostalog vrši izbor i analiza najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika blok-transformatora. Praktično se radi o posebno koncipiranim analizama statičkih stanja EES-a, odnosno interkonekcija u kojima se oni nalaze.

Da bi se takvi proračuni obavili na efikasan, racionalan i pregledan način, u toku rada na ovoj studiji, izvršena su dalja unapređenja ovih metodologija i odgovarajućih računarskih programa, između ostalog, u cilju racionalizacije obavljanja veoma obimnih analiza statičkih stanja, kao i u cilju dobijanja veće preglednosti i sistematizacije dobijenih rezultata. Odnosno, izvršeno je unapređenje računarske programske celine, koju, u okviru jedinstvene baze

podataka, u komplementarnoj primeni, čine računarski programi *NOVI IZBOR* i *DEFNAPON*, o kojima će, u najkraćim crtama, biti reči u narednom izlaganju.

2.2. Kraći opis računarskog programa *NOVI IZBOR*

U referencama [4], [20-22] je bio izložen razvoj i praktična primena jedne nove metode i odgovarajućeg računarskog programa (UCOSFI) za upravljanje tokovima reaktivnih snaga na izabranim elementima, uvođenjem kompenzacije u odgovarajuće čvorove, koji prirodno gravitiraju tom elementu.

Za potrebe studije [1], razvijen je računarski program *NOVI IZBOR*, koji je značajno proširio mogućnosti računarskog programa UCOSFI, uz uvođenje niza unapređenja, vezana za sofisticiraniji način izbora nominalne vrednosti faktora snage generatora i parametara i karakteristika njihovih blok-transformatora.

Proračuni u primeni računarskog programa *NOVI IZBOR* počinju formiranjem i sređivanjem svih potrebnih ulaznih podataka razmatrane interkonekcije. Po sređivanju ulaznih podataka, vrši se proračun polaznog stanja, odnosno proračun tokova snaga i naponskih prilika primenom procedure ("samopokretanje"), koja je detaljno opisana u [23, 24]. U daljem odvijanju ovog računarskog programa, njegovom Korisniku stoje na raspolaganju opcije I, II, III i IV.

Izborom opcije I, po određivanju tokova snaga u polaznom stanju, dalje se obavlja specifikacija potencijalno "kritičnih regiona", sa aspekta naponsko-reaktivnih prilika. Na osnovu zadate vrednosti za faktor snage, registruju se svi elementi (praktično se radi o TS 400/110 kV i 220/110 kV kada je reč o naponsko-reaktivnim prilikama u prenosnoj mreži, kao i TS 110/x kV, kada je neophodno i modelovanje relevantnih delova mreža na X naponskom nivou), koji imaju manju vrednost faktora snage od zadatog. Dalje, izborom opcije I, za niz unapred formulisanih scenarija, omogućeno je da se analiziraju i efekti poremećaja.

Postoje sledeće opcije izbora, odnosno formiranja liste poremećaja: ispadi samo generatora (jednostruki i višestruki), ispadi samo elemenata (transformatora i dalekovoda), kombinovani ispadi (generatora i elemenata), automatsko formiranje liste poremećaja u razmatranoj interkonekciji (obuhvataju se ispadi, u EES od interesa, svih elektrana i svih elemenata koji su opterećeni iznad unapred zadatog procenta od svog termičkog limita) i simultana promena ukupne snage potrošača u EES od interesa.

Prva grupa poremećaja (ispadi samo generatora), kao zasebna celina, uvedena je da bi se precizno sagledali efekti poremećaja, koji, sudeći prema dosadašnjim, ne samo našim iskustvima, mogu da budu kritični u pogledu naponsko-reaktivnih prilika. Za svaki od uvršćenih scenarija, vrši se određivanje novih stanja, koja su rezultat razmatranih poremećaja.

Izborom opcije II, po određivanju tokova snaga u polaznom stanju, takođe se registruju svi čvorovi (praktično je reč o TS 110/X), koji imaju manju vrednost faktora snage od zadatog, a zatim se vrši, tamo gde je to potrebno, korekcija reaktivnog opterećenja za zadati faktor snage. Sa tako korigovanom reaktivnom potrošnjom, vrši se određivanje tokova snaga, posredstvom već pomenute procedure [23, 24]. Po određivanju novog ravnotežnog stanja, nastalog nakon izvršene redukcije reaktivnog opterećenja u čvorovima koja su imala manju vrednost faktora snage od zadatog, utvrđuju se promene svih relevantnih pokazatelja u odnosu na polazno stanje, a zatim se obavlja odgovarajuća tehnokonomska analiza.

Izborom opcije III, po određivanju tokova snaga u polaznom stanju, vrše se korekcije naponskih referenci odabranih generatora u EES-u koji se razmatra. Sa korigovanim naponskim referencama generatora, dalje se vrši određivanje novih tokova snaga, a zatim se utvrđuju promene svih relevantnih pokazatelja u odnosu na polazno stanje. Na kraju, u okviru ove izabrane opcije III, obavlja se odgovarajuća globalna analiza efekata uvođenja novog plana napona generatora, odnosno utvrđuju se promene svih relevantnih pokazatelja u odnosu na polazno stanje.

Izborom opcije IV, po određivanju tokova snaga u polaznom stanju, vrše se korekcije prenosnih odnosa mrežnih transformatora u odnosu na postojeće podešenje. Tu se Korisniku pružaju dve mogućnosti. U *prvoj*, Korisnik sam formira datoteku, u okviru koje se, za izabrane transformatore, definišu nove vrednosti prenosnog odnosa. U *drugoј*, to se radi na sofisticiraniji način, odnosno datoteka željenih promena prenosnih odnosa automatski se formira.

Dakle, primenom opcija I, II, III i IV, uz odgovarajuću dijagnostiku, sagledavaju se globalni (pretežno) aspekti naponsko-reaktivnih prilika u analiziranom EES i relevantni faktori od uticaja na takva stanja.

U aktuelnoj verziji računarskog programa NOVI IZBOR, do koje je došlo tokom izrade studije [1], omogućeno je da se, za polazno stacionarno stanje, dobijeno primenom opcija I, II, III i IV, izvrše sledeće korekcije: nominalne prividne snage odabranih generatora, nominalnog faktora snage odabranih generatora, angažovane aktivne snage odabranih generatora, zadatih vrednosti napona na krajevima odabranih generatora, nominalne prividne snage blok-transformatora odabranih generatora, korekcije vrednosti prenosnog odnosa blok-transformatora odabranih generatora i vrednosti napona kratkog spoja blok-transformatora odabranih generatora. Sve ove korekcije mogu da se obavljaju pojedinačno, ili da se formira njihova raznorodna kombinacija.

Za stanje, dobijeno nakon učinjenih korekcija, za odabrane generatore, u posebnoj datoteci, na pregledan način, daju se sledeći pokazatelji: angažovana aktivna [MW] i reaktivna [Mvar] snaga, odnos angažovane i maksimalno raspoložive reaktivne snage, odnos aktuelne i nominalne vrednosti struje statora, odnos aktuelne i nominalne vrednosti napona na krajevima generatora, ostvareni (radni) faktor snage i vrednost napona na visokonaponskim sabirnicama elektrane [kV]. Takođe, za stanje dobijeno nakon učinjenih korekcija daju se

sledeći pokazatelji: 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, i veličina reaktivne rezerve generatora u razmatranom EES i njena promena u odnosu na polazno stanje. Dakle, u okviru ovih simulacija, omogućena je i detaljna analiza osetljivosti gubitaka aktivne i reaktivne snage i naponskih prilika na pragu prenosne mreže, na promenu faktora snage odabranih generatora i prenosnog odnosa njihovih blok-transformatora.

U prisutnim i raspoloživim modelima tokova snaga u postdinamičkim kvazistacionarnim stanjima, analogno konvencionalnim modelima, generatorima se najčešće specificiraju konstantna, unapred zadata ograničenja za reaktivne snage. Međutim, potrebno je da se posebno naglasi, u kontekstu mogućnosti koje ima računarski program NOVI IZBOR, da, tzv. "tvrda" ograničenja za reaktivne snage generatora, nisu unapred zadate konstantne vrednosti, već su funkcija parametara generatora i odgovarajućih veličina stanja [25].

Naravno da nije potrebno posebno naglašavati koliko ovakav prilaz utvrđivanju graničnih reaktivnih snaga generatora doprinosi tačnijem sagledavanju najpovoljnijih vrednosti za nominalni faktor snage posmatranih revitalizovanih generatora, kao i takvih vrednosti za prenosni odnos njihovih blok-transformatora. Ujedno, to omogućuje i preciznije sagledavanje (ne)opravdanosti uvođenja regulacije blok-transformatora.

2.3. Kraći opis računarskog programa *DEFNAPON*

U radovima [26, 27] detaljno je bio izložen razvoj i praktična primena jedne metode i odgovarajućeg računarskog programa - DEFNAPON (DEFinisanje NAPONa) [26], odnosno VOLTCONT (VOLTages CONTrol), za internacionalnu upotrebu [27]. Namena metode je da brzo i dovoljno tačno definiše napone angažovanih generatora u cilju ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja. Verifikacija predložene metode bila je obavljena u okviru statičkog simulacionog modela [26, 27], koji je integralni deo pomenutog razvijenog računarskog programa, na primerima ostvarenih i perspektivnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju. Takođe, u radu [28] izvršena je dinamička verifikacija razvijene metode, u okviru dinamičkog simulacionog modela, za identična ostvarena i perspektivna stanja prenosne mreže Srbije.

U okviru primene računarskog programa DEFNAPON, koja se odvija komplementarno sa primenom računarskog programa NOVI IZBOR, analize počinju formiranjem i sređivanjem svih potrebnih podataka razmatrane interkonekcije. Po sređivanju ulaznih podataka, vrši se proračun polaznog stanja, odnosno proračun tokova snaga i naponskih prilika, primenom već pomenute procedure, koja je detaljno opisana u [23, 24].

Za ovo polazno stanje se utvrđuju sledeći pokazatelji: veličina i struktura gubitaka aktivne i reaktivne snage, veličina i struktura generisanja reaktivne snage od strane dalekovoda i veličine reaktivne rezerve angažovanih generatora. Promene vrednosti ovih pokazatelja se dalje prate u okviru odvijanja ovoga računarskog programa, jer su one veoma indikativne u pogledu utvrđivanja relevantnih tehničkih efekata uvedenog upravljanja naponima odabranih generatora. U daljem odvijanju ovog računarskog programa, njegovom Korisniku stoje na raspolaganju opcije I, II i III, koje su detaljno opisane u [26].

Izborom opcije I, koja je bila relevantna za izradu studije [1], po određivanju tokova snaga u polaznom stanju razmatrane interkonekcije, admitanse potrošača, kao i admitanse generatora koji se ne nalaze u EES od interesa, sračunate na bazi poznatih injektiranih aktivnih i reaktivnih snaga i modula napona u tim čvorovima, dodaju se odgovarajućim dijagonalnim elementima matrice admitansi Y . Zatim, vrši se Gausova eliminacija svih potrošačkih čvorova u razmatranoj interkonekciji i svih generatorskih, koji se ne nalaze u EES od interesa. Dalje, za to stanje, obavlja se sračunavanje elemenata matrice osetljivosti $\partial P_G / \partial V_G$ i $\partial Q_G / \partial V_G$, čiji su elementi dati u [25], za sve generatorske čvorove od interesa.

Analizom dobijenih vrednosti elemenata matrice osetljivosti $\partial Q_G / \partial V_G$, omogućeno je da se sagleda koji od angažovanih generatora imaju najveći uticaj na uspostavljene naponsko-reaktivne prilike u posmatranom stanju, kao i da se dobije dobar uvid u njihovu među povezanost. Uz prethodno pomenute pokazatelje, koje daje računarski program *NOVI IZBOR*, proširuje se osnova za sagledavanje najpovoljnijih vrednosti za nominalni faktor snage posmatranih generatora, kao i takvih vrednosti za prenosni odnos njihovih blok-transformatora.

3. Prikaz i komentar rezultata analiza ostvarenih stanja

3.1. Uvodne napomene

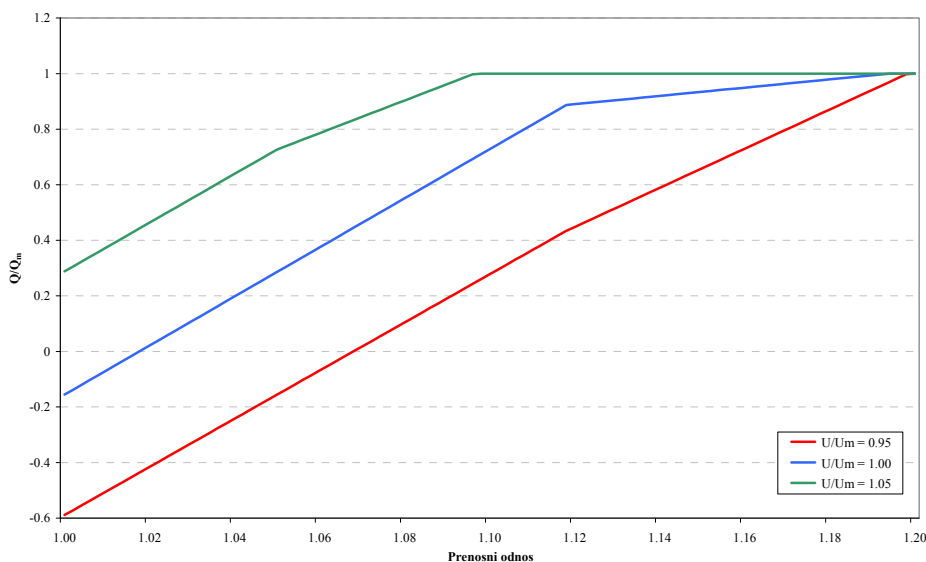
Primenom računarskih programa *NOVI IZBOR* i *DEFNAPON* izvršene su veoma opsežne analize prethodno pomenuta, dva relevantna ostvarena realna stanja mreže EES-a Srbije. U analizama ovih realnih stanja izvršena je široka analiza uticaja postojećih parametara blok transformatora u HE Đerdap 2, na naponsko-reaktivne prilike u mreži EES-a Srbije. To je urađeno u okviru raspoloživog naponsko-regulacionog opsega generatora ($\pm 5\% U_{gn}$), i korišćenje postojećih pogonskih mogućnosti generatora u HE Đerdap 2. Dalje, u okviru ovih realnih stanja, izvršene su široke varijacije vrednosti napona kratkog spoja blok-transformatora, u opsegu 0.10-0.20 r.j., kao i varijacije prenosnog odnosa blok-transformatora, u opsegu 1.00 (6.3/110 kV/kV) -1.20 (6.3/132 kV/kV) r.j..

3.2. Prikaz nekih od karakterističnih rezultata

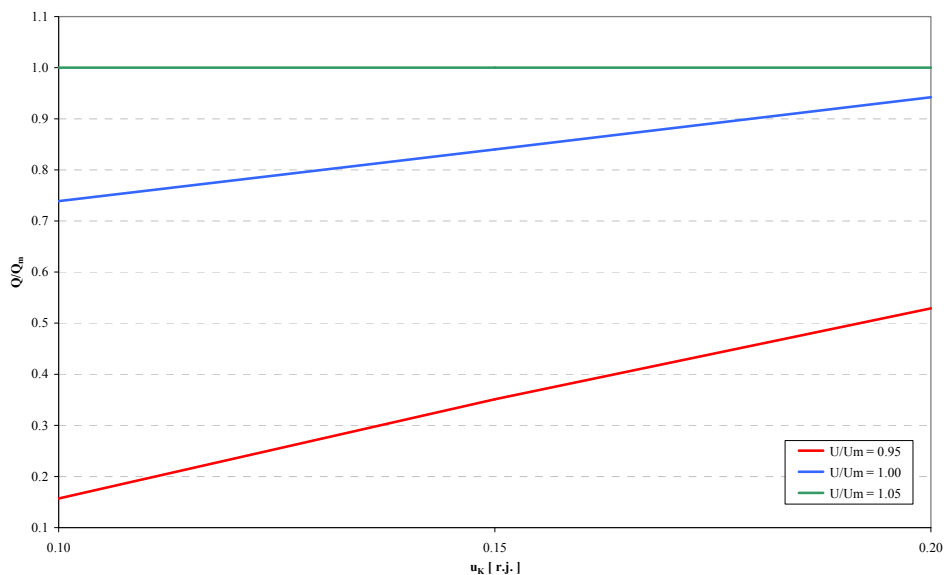
Grafička interpretacija nekih od karakterističnih rezultata analiza ostvarenog maksimalnog stanja, koji su bili u funkciji preispitivanja postojećih parametara i karakteristika blok-transformatora generatora u HE Đerdap 2, daje se na slikama 1 - 4. Sve ove slike se odnose na maksimalno opterećene generatore u HE Đerdap 2 ($10 \times 27 \text{ MW} = 270 \text{ MW}$), a u njihovom opisu je precizno rečeno na šta se odnose.

Maksimalno raspoloživa reaktivna snaga Q_{\max} , kako je to već bilo istaknuto, nije konstantna vrednost, već je određivana saglasno parametrima generatora i veličinama stanja [1, 25]. Ona se daje za tri početne vrednosti napona na krajevima generatora (U_g/U_{gn}) 0.95, 1.00 i 1.05, odnosno u potpunosti je respektovan postojeći raspoloživi naponsko-regulacioni opseg generatora u HE Đerdap 2 ($\pm 5\% U_{gn}$).

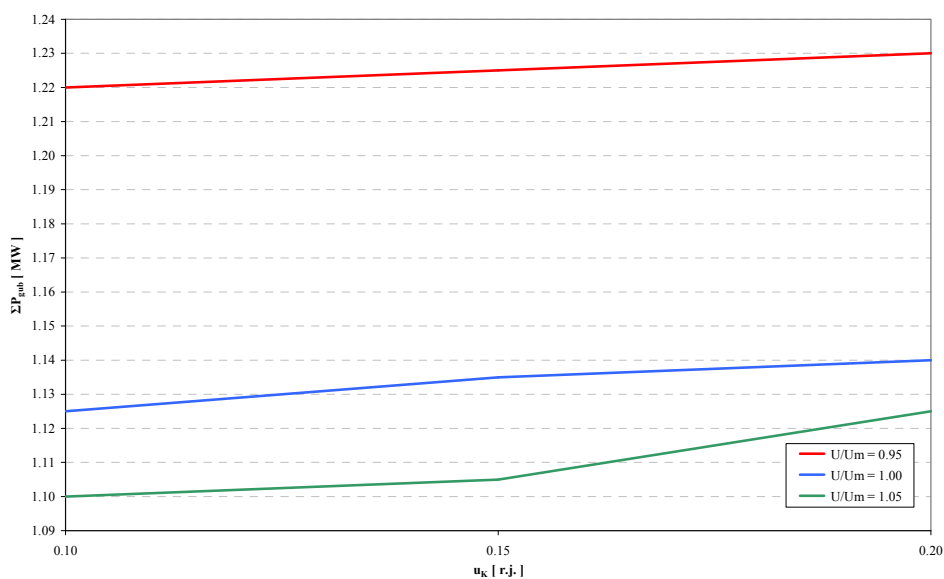
Termin "početna vrednost napona" odgovara vrednosti napona generatora koja je zadata na početku proračuna tokova snaga, koja ne mora biti jednaka vrednosti na kraju proračuna, zavisno od toga da li je prekoračeno ograničenje po reaktivnoj snazi. Tako, na primer, kada je bila data početna vrednost napona na krajevima generatora (U_g/U_{gn}) u iznosu 1.05 ($+5\%U_{gn}$ - gornja vrednost naponsko-regulacionog opsega generatora), dolazilo je do narušavanja maksimalno raspoložive reaktivne snage Q_{\max} , odnosno ona je ostvarena pri nižim vrednostima napona generatora. Za prenosne odnose blok-transformatora 1.10 i 1.20, redukovane vrednosti napona generatora su iznosile 1.032 i 1.012, respektivno.



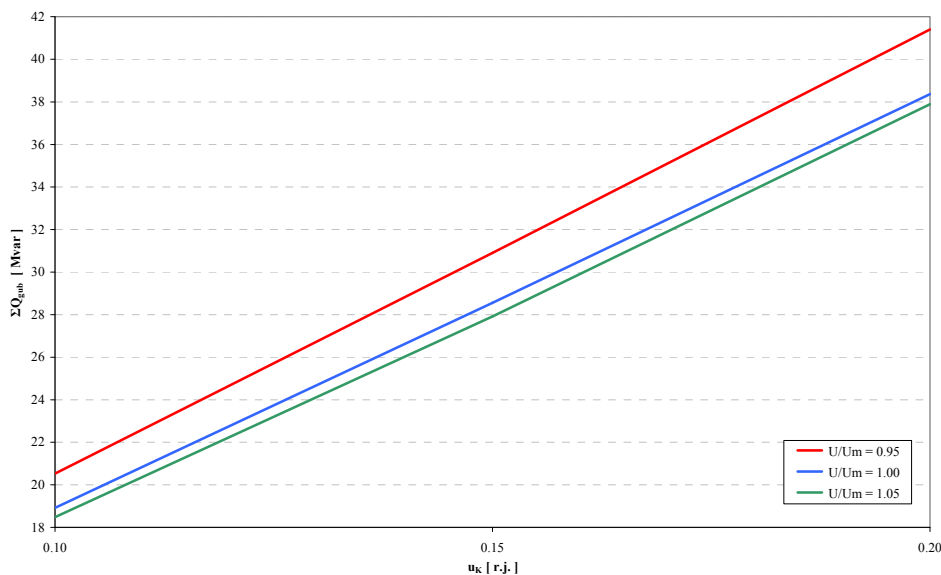
Slika 1. Zavisnost odate reaktivne snage (Q/Q_{\max}) generatora u HE Đerdap 2 od vrednosti prenosnog odnosa njihovih blok-transformatora, za tri početne vrednosti napona na krajevima; napon kratkog spoja blok-transformatora u iznosu 17.29 %



Slika 2. Zavisnost oddate reaktivne snage (Q/Q_{max}) generatora u HE Đerdap 2 od vrednosti napona kratkog spoja njihovih blok-transformatora, za tri početne vrednosti napona na krajevima; postojeća vrednost prenosnog odnosa blok-transformatora u iznosu 1.11818 r.j



Slika 3. Zavisnost ukupnih gubitaka aktivne snage u blok-transformatorima HE Đerdap 2 od vrednosti napona kratkog spoja njihovih blok-transformatora, za tri početne vrednosti napona na krajevima; postojeća vrednost prenosnog odnosa blok-transformatora u iznosu 1.11818 r.j



Slika 4. Zavisnost ukupnih gubitaka reaktivne snage u blok-transformatorima HE Đerdap 2 od vrednosti napona kratkog spoja njihovih blok-transformatora, za tri početne vrednosti napona na krajevima; postojeća vrednost prenosnog odnosa blok-transformatora u iznosu 1.11818 r.j

3.3. Komentar rezultata analiza ostvarenih stanja

Kao prvo, uočava se da je, pri maksimalnom opterećenju po aktivnoj snazi (10 x 27 MW = 270 MW) i postojećim parametrima generatora i blok-transformatora, moguće iskoristiti maksimalno raspoloživu reaktivnu snagu generatora u HE Đerdap 2. Treba napomenuti da se pri tome ne koriste sve mogućnosti koje pruža postojeći naponsko-regulacioni opseg generatora u HE Đerdap 2 ($\pm 5\% U_{gn}$). U ovom stanju, za plasman maksimalno raspoložive reaktivne snage (5 x 11.2 Mvar = 56 Mvar), napon na krajevima generatora bi iznosio 1.013 r.j., odnosno 6.38 kV.

Dalje, uočava se da bi vrednost oddate reaktivne snage rasla sa porastom napona kratkog spoja, što je neposredna posledica povećanja gubitaka reaktivne snage u blok transformatorima.

U slučaju postojećih parametara blok-transformatora i napona na krajevima generatora u HE Đerdap 2 u iznosu 1.000 r.j, odnosno 6.30 kV, ostvario bi se plasman reaktivne snage od 48 Mvar. Ukupni gubici reaktivne snage u blok transformatorima bi iznosili 33 Mvar, tako da bi se mreži preko postojećih dalekovoda 110 kV (Đerdap 2 - Negotin, Đerdap 2 - Zaječar, Đerdap 2 - Prahovo, Đerdap 2 - Sip i Đerdap 2 - V.Krivelj) odalo ukupno 15 Mvar. Tada bi napon na visoko naponskim sabirnicama iznosio 120.75 kV

Međutim, u slučaju da je napon kratkog spoja blok-transformatora iznosio 12 %, pri naponu na krajevima generatora u HE Đerdap 2 u iznosu 1.000 r.j (6.30 kV), ostvario bi se plasman reaktivne snage od 42 Mvar. Tada, ukupni gubici reaktivne snage u blok transformatorima bi iznosili 22.8 Mvar, tako da bi se mreži preko postojećih dalekovoda 110 kV odalo ukupno 19.2 Mvar. Napon na visokonaponskim sabirnicama bi iznosio 121.33 kV

Sa porastom napona kratkog spoja, konsekventno prethodno rečenom, dolazilo bi i do porasta gubitaka aktivne snage u blok transformatorima.

Na taj način, dobijeni rezultati ostvarenog maksimalnog stanja su ukazali na veliki praktični značaj pravilnog izbora napona kratkog spoja novih blok-transformatora revitalizovanih generatora u HE Đerdap 2. Ujedno, ovi rezultati nisu ukazali na potrebu ozbiljnijeg preispitivanja postojećeg fiksno gubitaknog odnosa blok-transformatora u iznosu 1.11818 r.j (6.3/123 kV/kV).

Dobijeni rezultati analiza ostvarenog minimalnog stanja nisu donela ništa posebno novo u kvalitativnom smislu. Postoje razlike u kvantitativnom smislu, između ostalog, i zbog različitog opterećenja generatora u HE Đerdap 2 (10 x 21.5 MW = 215 MW). I dalje, odata reaktivna snaga raste sa porastom napona kratkog spoja, što je neposredna posledica povećanja gubitaka reaktivne snage u blok-transformatorima. Iz ovih razloga je posvećena posebna pažnja analizi i perspektivnih minimalnih stanja, u okviru kojih je, između ostalog, široko variran način angažovanja generatora u HE Đerdap 2.

4. Prikaz i komentar rezultata analiza perspektivnih stanja

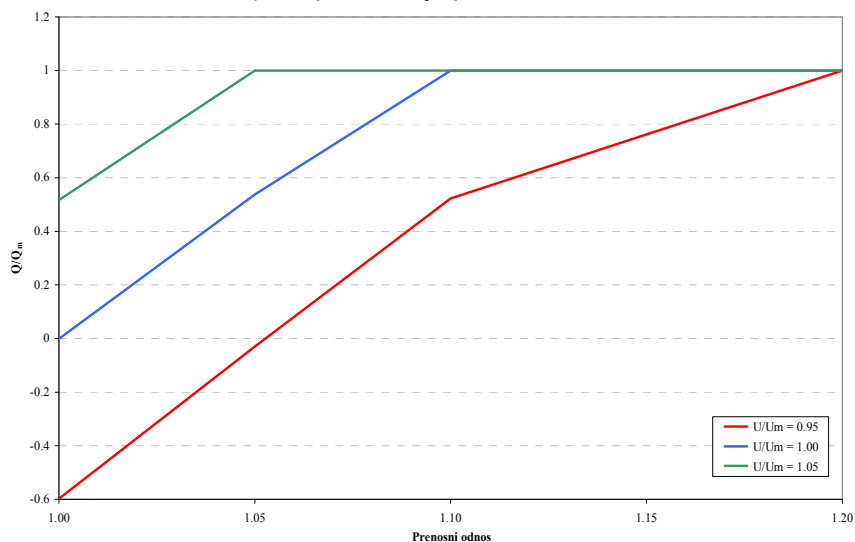
4.1. Uvodne napomene

Primenom računarskih programa *IZBOR* i *DEFNAPON* najpre su izvršene veoma opsežne analize maksimalnih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju, koja se očekuju 2015, 2020. i 2025. godine. Da bi se proširila osnova za izbor najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika blok-transformatora u HE Đerdap 2, obavljen je i niz proračuna tokova snaga, za očekivana minimalna stanja prenosne mreže Srbije, takođe za vremenski horizont do 2025. godine, uz široke varijacije niza relevantnih parametara.

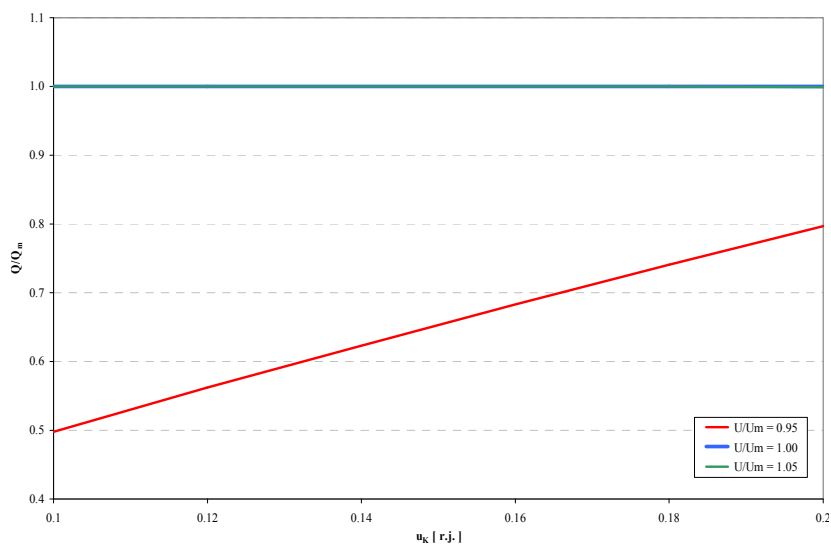
4.2. Prikaz nekih od karakterističnih rezultata

Raspoloživi prostor za ovaj rad uslovio je da se prikaže samo jedan manji deo rezultata analiza perspektivnih stanja, koji su bili u funkciji izbora najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika novih blok-transformatora

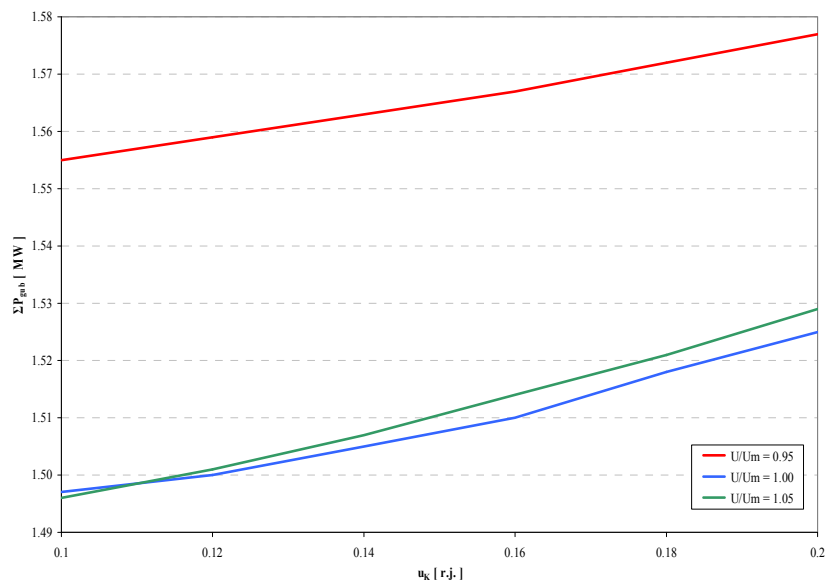
revitalizovanih generatora u HE Đerdap 2. Za to će poslužiti slike 5-9, koje se odnose na maksimalno opterećene revitalizovane generatore u HE Đerdap 2 (10 x 31.36 MW = 313.6 MW). U opisu slika je precizno navedeno na šta se odnose.



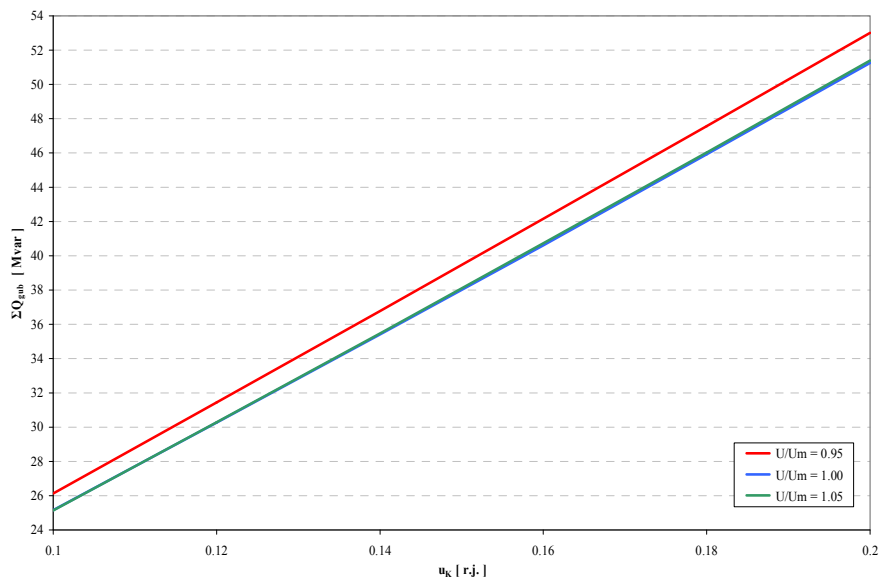
Slika 5. Zavisnost odate reaktivne snage (Q/Q_{max}) generatora u HE Đerdap 2 od vrednosti prenosnog odnosa njihovih blok-transformatora, za tri početne vrednosti napona na krajevima; napon kratkog spoja blok-transformatora u iznosu 17.29 % - maksimalno stanje 2015. godine



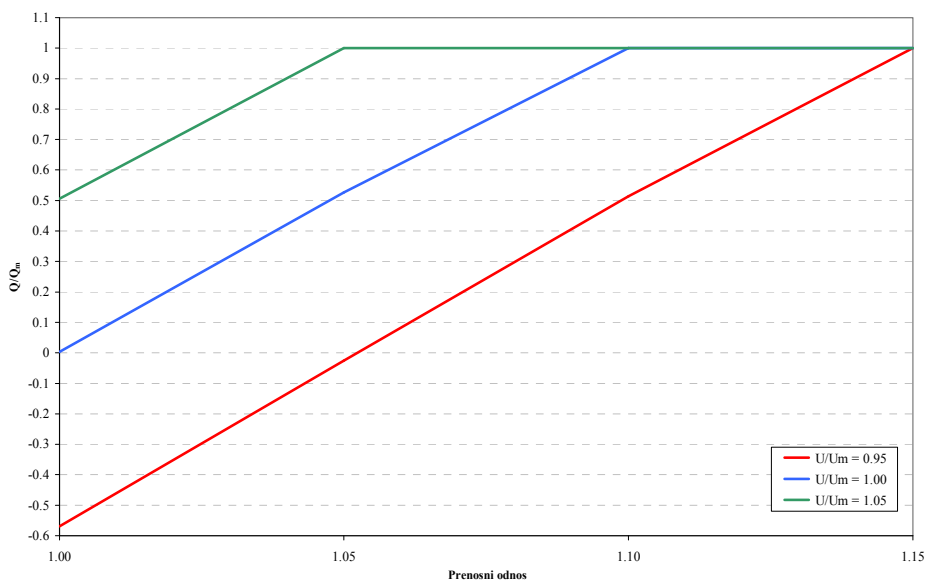
Slika 6. Zavisnost odate reaktivne snage (Q/Q_{max}) generatora u HE Đerdap 2 od vrednosti napona kratkog spoja njihovih blok-transformatora, za tri početne vrednosti napona na krajevima; postojeća vrednost prenosnog odnosa blok-transformatora u iznosu 1.11818 r.j - maksimalno stanje 2015. godine



Slika 7. Zavisnost ukupnih gubitaka aktivne snage u blok-transformatorima HE Đerdap 2 od vrednosti napona kratkog spoja njihovih blok-transformatora, za tri početne vrednosti napona na krajevima; postojeća vrednost prenosnog odnosa blok-transformatora u iznosu 1.11818 r.j - maksimalno stanje 2015. godine



Slika 8. Zavisnost ukupnih gubitaka reaktivne snage u blok-transformatorima HE Đerdap 2 od vrednosti napona kratkog spoja njihovih blok-transformatora, za tri početne vrednosti napona na krajevima; postojeća vrednost prenosnog odnosa blok-transformatora u iznosu 1.11818 r.j - maksimalno stanje 2015. godine



Slika 9. Zavisnost odate reaktivne snage (Q/Q_{max}) generatora u HE Đerdap 2 od vrednosti prenosnog odnosa njihovih blok-transformatora, za tri početne vrednosti napona na krajevima; napon kratkog spoja blok-transformatora u iznosu 17.29 % - maksimalno stanje 2025. godine

Dalje, u cilju proširenja osnove za izbor parametara i karakteristika blok-transformatora u HE Đerdap 2 i proveru valjanosti vrednosti za nominalni faktor snage revitalizovanih generatora (zadržana postojeća vrednost (0.98)), daju se tabele 1 i 2.

U ovim tabelama daje se zavisnost ostvarene vrednosti reaktivnih snaga (Q/Q_{max}) na krajevima generatora u HE Đerdap 2 od vrednosti prenosnog odnosa njegovog blok-transformatora. Oznaka 1 se odnosi na prenosni odnos $U_{gn}/110$ kV/kV, oznaka 2 na $U_{gn}/115.5$ kV/kV, oznaka 3 na $U_{gn}/121$ kV/kV i oznaka 4 na $U_{gn}/126.5$ kV/kV, odnosno 1.00, 1.05, 1.10 i 1.15, respektivno. Ujedno, daju se i vrednosti napona na visokonaponskim sabirnicama HE Đerdap 2 (U_{VN}) i početne vrednosti napona na krajevima generatora (U_g/U_{gn}).

Tabela 1. Zavisnost odate reaktivne snage generatora u HE Đerdap 2 od vrednosti prenosnog odnosa njihovih blok-transformatora; nominalni faktor snage generatora 0.98; maksimalno stanje 2015. godine

Stanje	1			2			3			4		
	Q/Q_{max}	U_{VN} [kV]	U_g/U_{gn}	Q/Q_{max}	U_{VN} [kV]	U_g/U_{gn}	Q/Q_{max}	U_{VN} [kV]	U_g/U_{gn}	Q/Q_{max}	U_{VN} [kV]	U_g/U_{gn}
A	0.517	114.4	1.050	1.000	117.6	1.043	1.000	117.4	0.993	1.000	117.0	0.944
B	0.140	114.4	1.050	0.431	118.0	1.050	0.747	121.6	1.050	0.994	124.3	1.039
C	0.534	114.5	1.050	0.999	116.2	1.023	1.000	116.0	0.975	1.000	115.7	0.929
D	0.276	114.1	1.050	0.768	117.7	1.050	0.989	119.3	1.024	0.975	119.4	0.980

Tabela 2. Zavisnost odate reaktivne snage generatora u HE Đerdap 2 od vrednosti prenosnog odnosa njihovih blok-transformatora; nominalni faktor snage generatora 0.98; maksimalno stanje 2025. godine

Stanje	1			2			3			4		
	Q / Q _{max}	U _{VN} [kV]	U _g / U _{gn}	Q / Q _{max}	U _{VN} [kV]	U _g / U _{gn}	Q / Q _{max}	U _{VN} [kV]	U _g / U _{gn}	Q / Q _{max}	U _{VN} [kV]	U _g / U _{gn}
A	0.509	114.4	1.050	1.000	117.8	1.045	1.000	117.6	0.995	1.000	117.2	0.946
B	0.163	114.2	1.050	0.447	117.9	1.050	0.757	121.5	1.050	1.000	124.3	1.039
C	0.673	113.7	1.050	1.000	115.1	1.023	1.000	114.9	0.973	1.000	114.6	0.926
D	0.673	113.7	1.050	1.000	115.1	1.023	1.000	114.9	0.973	1.000	114.6	0.926

U tabelama 1 i 2, oznake A - D odgovaraju sledećim situacijama: A - angažovano svih deset generatora u Đerdap 2, sa ukupnom aktivnom snagom od 314 MW; B - angažovano svih deset generatora u Đerdap 2, sa ukupnom aktivnom snagom od 157 MW; C - angažovano šest generatora u HE Đerdap 2, sa ukupnom aktivnom snagom od 188 MW; D - angažovano šest generatora u HE Đerdap 2, sa ukupnom aktivnom snagom od 94 MW.

4.3. Komentar rezultata analiza perspektivnih stanja

Rezultati analiza niza maksimalnih i minimalnih statičkih stanja prenosne mreže Srbije, u njenom širokom okruženju, koja se očekuju 2015, 2020. i 2025. godine, dali su dobru i široku osnovu za izbor najpovoljnijih vrednosti za parametre i karakteristike blok-transformatora razmatranih revitalizovanih generatora u HE Đerdap 2.

Uočeno je da se sa postojećom vrednošću nominalnog faktora snage u iznosu 0.98, ostvaruje se visoka proizvodnja reaktivne snage, ali se pri tome ne iskorišćuje u potpunosti raspoloživi naponsko-regulacioni opseg generatora (koji ide do +5% U_{gn}). Stoga, u narednim istraživanjima, bilo bi poželjno da se detaljnije utvrdi najpovoljnija vrednost za nominalni faktor snage, uključujući relevantne tehno-ekonomske aspekte, među koje bi spadala i odgovarajuća valorizacija odate reaktivne snage, kao jedne od važnih sistemskih usluga.

Dalje, rezultati sprovedenih analiza niza karakterističnih maksimalnih, a zatim i takvih minimalnih stanja, za vremenski horizont do 2025. godine, omogućili su da se izvrši izbor najpovoljnije vrednosti za prenosni odnos blok-transformatora u revitalizovanoj HE Đerdap 2. Utvrđena je bliskost rezultata u varijantama sa fiksnim prenosnim odnosima u iznosu 6.3/121 kV/kV i 6.3/123 kV/kV (postojeće rešenje). Obe ove vrednosti obezbeđuju plasman značajnog dela raspoložive reaktivne snage, ostajući u okvirima raspoloživog naponsko-regulacionog opsega generatora u iznosu ± 5% U_{gn}. Takođe, pokazano je da pri tim vrednostima prenosnog odnosa, ostajući u okvirima raspoloživih vrednosti za naponsko-regulacioni opseg generatora, mogu da se izbegnu potpobuđeni režimi rada revitalizovanih generatora u HE Đerdap 2, a koji nisu ni bili zahtevani od strane EES-a.

Dakle, varijante sa fiksnim prenosnim odnosima blok-transformatora 6.3/121 kV/kV i 6.3/123 kV/kV su praktično ravnopravne. Stoga, iz praktičnih razloga, postojeća vrednost (1.11818 r.j.) bila bi i dalje valjano rešenje.

Što se tiče vrednosti napona kratkog spoja novih blok-transformatora u revitalizovanoj HE Đerdap 2, sa aspekta naponsko-reaktivnih prilika, poželjno je da one budu što niže (ili u okviru svojih tzv. "prirodnih", odnosno tipičnih vrednosti), odnosno, da one ne budu veće od 12 %.

U cilju kompletiranja slike u pogledu sagledavanja mesta, uloge i značaja razmatranih revitalizovanih generatora u HE Đerdap 2, u kontekstu naponsko-reaktivnih prilika u EES Srbije, poslužiće tabela 3. U njoj se daju dijagonalni elementi matrice osetljivosti $\partial Q_G / \partial V_G$, za HE Đerdap 2 i za sve generatore u EES Srbije, priključene na naponski nivo 400 kV i 220 kV, za maksimalna stanja prenosne mreže Srbije, koja se očekuju 2020. i 2025. godine (rezultati primene računarskog programa *DEFNAPON*).

Za tada angažovane generatore, vrednost prikazanog dijagonalnog elementa je mera za koliko će se promeniti reaktivna snaga generatora, ako se napon na njegovim krajevima promeni za 1% od svoje nominalne vrednosti. Te promene reaktivne snage se daju u apsolutnim [Mvar] i relativnim (u odnosu na maksimalno raspoloživu reaktivnu snagu) vrednostima.

Tabela 3. Dijagonalni elementi matrice osetljivosti $\partial Q_G / \partial V_G$, za maksimalna stanja 2020. i 2025. godine

R.br.	Elektrana	Osetljivost			
		2020. max		2025. max	
		Mvar / % promene napona	r.j. / % promene napona	Mvar / % promene napona	r.j. / % promene napona
1	HE Đerdap 1	66.270	0.128	66.175	0.128
2	TE Kostolac B	42.906	0.080	42.418	0.085
3	HE B.Bašta	25.740	0.189	25.269	0.181
4	RHE B.Bašta	35.558	0.139	32.932	0.165
5	TE N.Tesla B 12	74.941	0.093	75.498	0.093
6	TE N.Tesla A 12	36.947	0.128	37.400	0.136
7	TE N.Tesla A 34	43.444	0.105	44.196	0.106
8	TE N.Tesla A 56	52.607	0.127	52.803	0.126
9	TE Kosovo A	27.448	0.087	29.279	0.092
10	TE Kosovo B	59.195	0.057	57.893	0.058
11	HE Đerdap 2	9.780	0.156	9.575	0.155

Na taj način, saglasno pokazateljima iz tabele 3, na jedan poseban uporedni način kvantifikovana je realna uloga HE Đerdap 2 u ostvarenju naponsko-reaktivnih prilika u EES Srbije. Odnosno, i na ovaj način je objašnjeno zašto se ne postavljaju neki specijalni zahtevi od strane EES-a Srbije u pogledu razmatranih parametara revitalizovanih generatora u HE Đerdap 2, u kontekstu ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih prilika.

5. Zaključci

U radu su izloženi relevantni metodološki i praktični aspekti izbora najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika blok-transformatora. Rezultati praktične primene razvijene metodologije, za maksimalna i minimalna stanja prenosne mreže Srbije, koja se očekuju 2015, 2020. i 2025. godine, omogućili su konstataciju da bi najpovoljnije praktično rešenje za prenosni odnos novih blok-transformatora u HE Đerdap 2 bila postojeća fiksna vrednost u iznosu 6.3/123 kV/kV. Dalje, *sa aspekta ostvarenja povoljnih naponsko-reaktivnih stanja*, poželjno je da vrednosti napona kratkog spoja budu što niže (ili u okviru svojih tzv."prirodnih", odnosno tipičnih, konstrukcionih vrednosti), odnosno, da one ne budu veće od 12 %.

Ujedno, ovo je još jedna prilika da se istakne praktična korisnost ovakvih analiza, čija je cena minorna u odnosu na ukupnu vrednost investicija i moguće uštede, a dobijeni rezultati daju potrebnu sigurnost u pogledu donošenja najracionalnijih odluka.

Literatura

- [1] "Definisanje najpovoljnijih parametara i karakteristika blok-transformatora u HE Đerdap 2", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2011.
- [2] "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, 2007.
- [3] "Planiranje izvora reaktivne snage u prenosnoj mreži EES Srbije - II faza" - finalna verzija, studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2007.
- [4] "Izbor i analiza optimalnih parametara generatora i blok-transformatora hidroelektrana priključenih na prenosnu mrežu 110 i 35 kV EES EPS-a", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2007.
- [5] Popović D.P., Stojković M., "Izbor nominalnog faktora snage generatora i karakteristika njegovog blok-transformatora", časopis "Elektroprivreda", br.2, 2008, str.13-27.
- [6] Popović D.P., Stojković M., "Izbor odnosa kratkog spoja i sinhronih reaktansi generatora sa aspekta zahteva elektroenergetskog sistema", 52 Konferencija ETRAN, 8-12 jun, Palić, EE2.5-1-4.
- [7] Popović D.P., Stojković M., "Izbor vremenske konstante inercije, tranzijentnih reaktansi i pobudnog sistema generatora prema zahtevima elektroenergetskog sistema", časopis "Elektroprivreda", br.3, 2008, str.17-27.

- [8] "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.
- [9] 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.
- [10] Popović D.P., Stojković M., "Jedna unapređena metoda upravljanja naponima generatora u realnom vremenu", časopis "Tehnika - Elektrotehnika", br. 4, 2009., str.7-16.
- [11] Popović D.P., Stanisavljević I., Stojković M., Tatomir Đ., Mazalica M., Zec I., "Parametri i karakteristike agregata u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3 u svetlu zahteva elektroenergetskog sistema Srbije", časopis "Energija", br. 3-4, 2009., str.34-39.
- [12] 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.
- [13] Popović D.P., Stojković M., Stanisavljević I., "Izbor nominalnog faktora snage generatora i karakteristika blok-transformatora u TE Kolubara B i TE Nikola Tesla B3", 29 Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 31 maj-6 juni, 2009., referat R C1-06.
- [14] "Definisanje najpovoljnijih vrednosti parametara i karakteristika revitalizovanih agregata u HE Zvornik priključenih na prenosnu mrežu 110 kV sa aspekta zahteva EES-a Srbije", studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 2011.
- [15] Popović D.P., Ivanović M., Kovačević P., Radović G., Ivković S., Minić S., Petrović R., Dragić M., "Izbor nominalnog faktora snage generatora i karakteristika blok-transformatora u revitalizovanoj HE Zvornik", 30 Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 29. maj-3. juni, 2011., referat R A1-11.
- [16] Popović D.P., M. Ivanović, Kovačević P., Radović G., Ivković S., Minić S., Petrović R., Dragić M., "Izbor vremenske konstante inercije, sinhronih i tranzijentnih reaktansi i sistema regulacije pobude revitalizovanih agregata u HE Zvornik", 30 Savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 29. maj-3. juni, 2011., referat R A1-12.
- [17] "Provera ponašanja revitalizovanih agregata/generatora u HE Bajina Bašta u karakterističnim režimima rada priključenih na mrežu EMS-a 220 kV- Analize statičke stabilnosti i analize mogućnosti nastajanja samopobuđivanja", Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2007.

- [18] "Provera ponašanja revitalizovanih agregata/generatora u HE Bajina Bašta u karakterističnim režimima rada priključenih na mrežu EMS-a 220 kV - Analize tranzijentne stabilnosti", Institut "Nikola Tesla", Beograd, 2007.
- [19] Popović D.P., Stojković M., Petrović M., Čitaković M., "Analiza ponašanja revitalizovanih agregata u HE Bajina Bašta u karakterističnim prelaznim režimima rada", časopis "Tehnika - Elektrotehnika", br. 6, 2007., str.1-8.
- [20] Popović D.P., "Jedna metoda upravljanja tokovima reaktivnih snaga u normalnim i havarijskim stanjima elektroenergetskih interkonekcija", časopis "Elektroprivreda", br. 1, 2006., str. 7 – 24.
- [21] Popović D. P. , Stojković M., "Jedan prilaz rešavanju naponsko-reaktivne problematike u prenosnim mrežama", 13 Simpozijum -Upravljanje i telekomunikacije u EES, Tara, 29 maj - 02 jun, 2006, referat C2 I 02
- [22] Popović D.P., Stojković M., "Računarski program za utvrđivanje lokacije i snage uređaja za kompenzaciju reaktivne snage", Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-Jahorina, 22-24 mart, 2006, referat D-1.
- [23] Popović D.P., "Statička sigurnost elektroenergetskih interkonekcija", monografija, Institut "Nikola Tesla", Beograd, 170 str., ISBN 85-83349-03-9, juni 2004.
- [24] Popović D.P., "Određivanje tokova snaga u polaznim ustaljenim stanjima u analizama sigurnosti elektroenergetskih sistema", časopis "Elektroprivreda", br.2, 2000, str. 13-26.
- [25] Lukašov E.S. i dr. "Dugotrajni prelazni procesi u elektroenergetskim sistemima" (knjiga na ruskom), Izd. "Nauka", Novosibirsk, 1985.
- [26] Popović D.P., "Upravljanje naponima generatora i naponsko-reaktivna stanja elektroenergetskih interkonekcija", časopis "Elektroprivreda", br. 1, 2007., str. 12 - 26.
- [27] 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.
- [28] Popović D.P., Stojković M., "Dinamički aspekti upravljanje naponima generatora i naponsko-reaktivna stanja elektroenergetskih interkonekcija", časopis "Elektroprivreda", br. 3, 2007., str. 3 - 14.

Abstract. This papers presents results of the study, which dealt with selection of the most appropriate values of parameters and characteristics of new block-transformers in revitalized HPP Đerdap 2. It was done in order to achieve favorable voltage-reactive states in power system of Serbia.

Keywords: selection, parameters, characteristics, block-transformer, HPP Đerdap 2, voltage-reactive state, EPS of Serbia

Selection of Parameters and Characteristics of Block-Transformers in HPP Đerdap 2, According to the Voltage-Reactive States of Serbian Power System

Rad primljen u uredništvo 14.09.2011. godine
Rad prihvaćen 22.10.2011. godine