

## **Analiza uticaja promene prenosnog odnosa blok transformatora na veličine u tački priključenja na prenosnu mrežu**

Dragan Đorđević<sup>1</sup>, Ana Radovanović<sup>1</sup>, Jasna Dragosavac<sup>1</sup>, Žarko Janda<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija  
[dragan.djordjevic@ieent.org](mailto:dragan.djordjevic@ieent.org)

**Kratak sadržaj:** U ovom radu prikazana je analiza uticaja promene prenosnog odnosa blok transformatora na veličine u tački priključenja na prenosnu mrežu. Pri analizi posmatrana je tačka priključenja agregata TENT A6, čiji je detaljan model bio na raspolaganju u programskom paketu *DlgSILENT PowerFactory*. Izvršeno je poređenje uticaja promene prenosnog odnosa blok transformatora na veličine u tački priključenja pri automatskom i ručnom režimu rada regulatora pobude. Za potrebe analize pri ručnom režimu rada regulatora pobude vršeno je poređenje različitih načina modelovanja ovih režima. Posmatrano je nekoliko radnih stanja, odabranih tako da postoji potreba za promenom prenosnog odnosa blok transformatora. Prethodno navedene analize su potom izvršene uzevši posebno u obzir uticaj naponsko-reaktivne krutosti tačke priključenja.

**Ključne reči:** blok transformator; prenosni odnos, tačka priključenja; modelovanje

### **1. Uvod**

Poznata je činjenica da se sinhroni generatori ne prave za napone iznad 22 kV, zbog ograničenja koje nameće dielektrička čvrstoća izolacije statorskog namotaja. Prema tome, da bi se generator priključio na prenosnu mrežu višeg naponskog nivoa, potrebno je upotrebiti dodatni element koji će naponski nivo generatorskih sabirnica prilagoditi naponu prenosne mreže. Ovo prilagođenje se izvodi pomoću energetskog transformatora koji se, zbog toga što se nadovezuje na proizvodni blok elektrane, naziva blok transformator.

Pri projektovanju i izgradnji proizvodnog bloka elektrane potrebno je voditi računa o uparivanju generatora i blok transformatora imajući u vidu

karakteristike konkretne tačke priključenja u pogledu napona koji se na tom mestu očekuju. Teži se tome da pri opsegu napona na generatorskim sabirnicama od 0,95 r.j. do 1,05 r.j. generator u potpunosti može da iskoristi svoje mogućnosti u pogledu generisanja, odnosno apsorpcije reaktivne snage. Kako je ovaj cilj ponekad teško ostvariv korišćenjem fiksnog prenosnog odnosa blok transformatora jer zavisi od promenljivosti naponskih uslova u tački priključenja, pribegava se korišćenju transformatora sa promenljivim prenosnim odnosom.

U pogledu koraka promene prenosnog odnosa, kao i broja položaja diskretne promene, blok transformatori sa promenljivim prenosnim odnosom se koriste za različite namene. Ukoliko je osnovni cilj održavanje vrednosti napona na sabirnicama generatora oko nominalne vrednosti, ima se mali broj položaja oko nominalnog prenosnog odnosa i korak promene tipično 1,25%, 2,5% ili 3%, čime se menja opseg VN napona u kome regulator napona generatora ostvaruje svoje dejstvo delovanjem na pobudu. Ukoliko je cilj regulacija predate reaktivne snage u prenosnu mrežu, ima se veći broj položaja i mali korak, neophodan za finu regulaciju toka reaktivne snage [1].

Promena prenosnog odnosa blok transformatora se vrši pomoću regulacione sklopke. U pogledu načina njene promene, postoje implementacije koje dozvoljavaju promenu prenosnog odnosa samo u neopterećenom stanju, dok sa druge strane postoje implementacije kod kojih se promena položaja regulacione sklopke može vršiti i pod opterećenjem, pri čemu se regulaciona sklopka troši pri preklapanju.

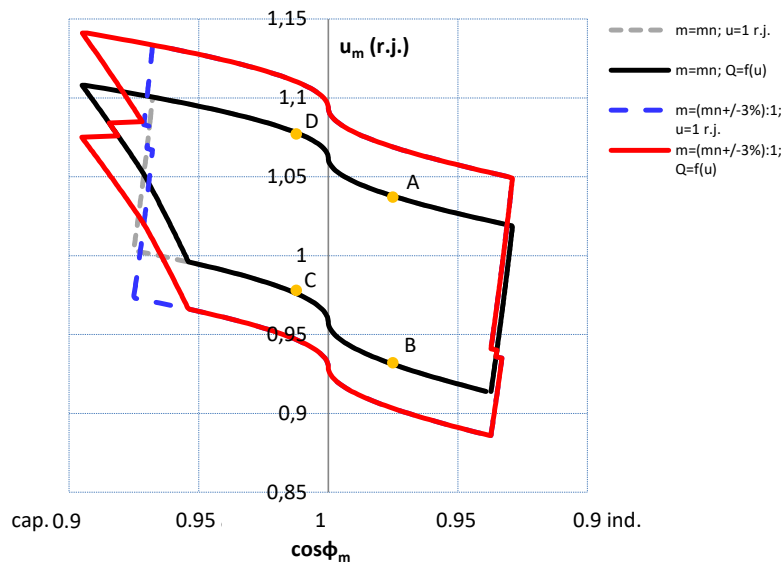
U literaturi [1] je problematika transformatora sa prenosnim odnosom detaljno pokrivena sa aspekta konstrukcije, modelovanja i upotrebe za regulaciju naponsko reaktivnih stanja u mreži. Međutim, problematika potrebe za promenom prenosnog odnosa blok-transformatora u široko dostupnoj literaturi nije obrađena. Potreba za promenom proizlazi iz potrebe da dovoljno dinamičkog reaktivnog opsega bude raspoloživo na generatoru za potrebe regulacije napona u elektroenergetskom sistemu. Ukoliko se promena vrši u već naponski preopterećenom/podopterećenom EES-u, dispečeru operatora prenosnog sistema je važno da zna na koji način će promena prenosnog odnosa uticati na veličine od značaja u tački priključenja, a time i na naponske prilike u mreži. Zadatak ovog rada je da se izvrši analiza uticaja promene prenosnog odnosa blok transformatora na veličine u tački priključenja na prenosnu mrežu. Kao interesantniji slučaj, analiziraće se promena prenosnog odnosa pri opterećenom blok transformatoru. Pri tome, posebna pažnja će se posvetiti režimu rada regulatora pobude generatora u toku prelaznog stanja.

Za potrebe analize u ovom radu posmatraće se model proizvodnih blokova u TE Nikola Tesla A, priključenih na 400 kV naponski nivo prenosne mreže (TENT A6 i TENT A5). Promena prenosnog odnosa će se vršiti na blok transformatoru koji pripada bloku TENT A6, pri čemu će se uticaj promene prenosnog odnosa pratiti na mestu priključenja bloka TENT A6, kao i bloka TENT A5, koji je povezan na iste sabirnice.

## 2. Prikaz modela za analizu

Za potrebe željene analize korišćen je detaljan model proizvodnog bloka (koji uključuje model generatora sa realnom pogonskom kartom, model blok transformatora i sopstvene potrošnje), kao i detaljan model prenosne mreže.

Da bi se analizirao uticaj promene prenosnog odnosa blok transformatora na veličine u tački priključenja, potrebno je odabrati neke polazne radne režime u kojima ima smisla vršiti promenu prenosnog odnosa. Na slici 1 prikazana je oblast naponsko-reaktivnih mogućnosti generatora TENT A6 u  $U\text{-}\cos\phi$  ravni, pri aktivnoj snazi generatora od 335 MW. Isprekidanim linijama su prikazane oblasti koje se dobijaju korišćenjem pogonske karte koja ne zavisi od napona, dok pune linije ovu zavisnost uvažavaju. Pri tome je potrebno da limiter minimalne pobude i zaštita od minimalne pobude budu koordinisani i na identičan način naponski zavisni. Na slici 1 puna crvena i isprekidana plava linija predstavljaju oblasti dobijene promenom otepa regulacione sklopke za po jednu poziciju naviše (gornje ograničenje) i naniže (donje ograničenje) u odnosu na osnovnu poziciju.



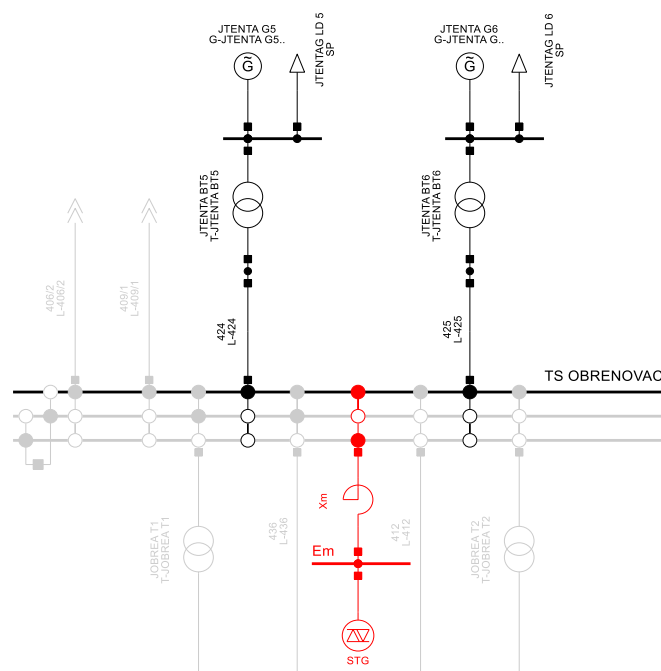
Slika 1. Naponsko-reaktivne mogućnosti generatora TENT A6 posmatrano u tački priključenja na prenosnu mrežu

Autori smatraju da postoji potreba za promenom prenosnog odnosa blok transformatora ukoliko se radna tačka nalazi u dodiru sa krivom koja predstavlja gornje ograničenje (tačke A i D), koje odgovara naponu na sabirnicama generatora od 1,05 r.j., odnosno u dodiru sa krivom koja predstavlja donje

ograničenje (tačke B i C), što odgovara naponu od 0,95 r.j. na sabirnicama generatora.

Po odabiru radnih tačaka za analizu potrebno je za svaku od njih podesiti model. Dakle, za neki određeni režim potrebno je podesiti injektiranje reaktivne snage na mestu priključenja, kao i napon na mestu priključenja na željenu vrednost. Potrebno je napomenuti da se vrednost napona na mestu priključenja dobija delom kao rezultat podešenja željenog reaktivnog injektiranja od strane posmatranog generatora i delom kao rezultat podešenja naponsko-reaktivnog stanja u samoj prenosnoj mreži. Podešavanje stanja u prenosnoj mreži može da prati veći broj manipulacija, što ovaj proces čini vremenski zahtevnim. Da bi se to izbeglo, pribegava se formiranju Tevenenovog ekvivalenta mreže posmatranog iz tačke priključenja. Vrednost reaktanse se određuje iz proračuna kratkog spoja na mestu priključenja. Greške koje nastaju usled razlike detaljnog modela i ekvivalenta se za potrebe analize koja je predmet ovog rada mogu smatrati prihvatljivim.

Na slici 2 se može videti deo modela prenosnog sistema u programskom paketu *PowerFactory* 0 sa fokusom na tačku priključenja bloka TENT A6. Sivom bojom je prikazan deo prenosne mreže koji gravitira ka TS Obrenovac 400 kV. Prenosna mreža posmatrana iz tačke priključenja se potom predstavlja Tevenenovim ekvivalentom, koji je na slici 2 označen crvenom bojom.



Slika 2. Model analiziranog dela sistema u programskom paketu *PowerFactory*

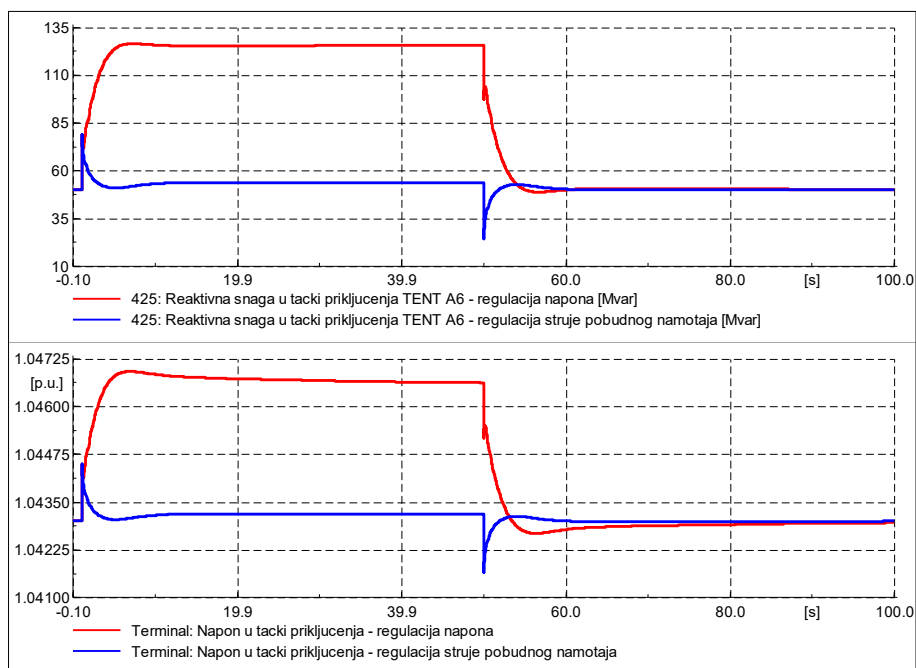
Programski paket *PowerFactory* poseduje alatku pod nazivom *Station Controler*, koja igra ulogu grupnog regulatora napona za potrebe proračuna tokova snaga. Ova alatka je pogodna za podešavanje radnih stanja zbog toga što se posmatrani generatori na slici 2 mogu pridružiti jednom *Station Controler*-u i sa njim podesiti željenu vrednost reaktivnog injeckiranja reaktivne snage od strane bloka TENT A6 u tačku priključenja po nekom kriterijumu raspodele generisanja između pridruženih generatora, npr. kriterijumu maksimizacije reaktivne rezerve. Ova alatka se može koristiti i za jedan generator (pa i fiktivni) te njime uticati na napon neke udaljenije sabirnice. Tako se *Station Controler* pridružen elektromotornoj sili Tevenenovog ekvivalenta koristi za podešavanje željene vrednosti napona u tački priključenja. Po obavljenom proračunu tokova snaga, dobijene vrednosti napona na sabirnicama generatora se uzimaju za njihovu naponsku referencu, te se *Station Controler*-i mogu isključiti u daljem toku simulacije. Automatizacijom ovog procesa u DPL programskom jeziku (integriran u okviru programskog paketa *PowerFactory*) omogućeno je brzo i jednostavno podešavanje željene radne tačke za potrebne analize.

### 3. Uticaj režima rada regulatora pobude

Prema Pravilima o radu prenosnog sistema [3], regulator pobude treba obavezno da radi u režimu automatske regulacije napona. Sa druge strane, promena prenosnog odnosa blok transformatora u automatskom režimu regulacije napona dovodi do promene napona na sabirnicama generatora. Regulator napona detektuje veliko odstupanje napona na generatorskim sabirnicama od podešene referentne vrednosti i deluje na promenu pobudne struje u željenom pravcu, što izaziva tranzijentnu promenu veličina u tački priključenja. Ovo može dovesti do gubitka regulacione moći generatora, odnosno sposobnosti generatora da promenom reaktivne snage kompenzuje promene napona mreže [4]. Gubitak regulacione moći najvećih generatora, u najznačajnijim tačkama sistema je inicirao početak raspada u najvećem broju raspada sistema u svetu u poslednjih dvadesetak godina [5]. Imajući u vidu ovu činjenicu, potrebno je pre same promene prenosnog odnosa transformatora, regulator pobude prebaciti iz režima automatske regulacije napona u režim regulacije struje pobudnog namotaja. Po obavljenoj promeni prenosnog odnosa regulator pobude se vraća u režim automatske regulacije napona, zadržavajući prethodno radno stanje ažuriranjem referentne vrednosti napona regulatora pobude. Na dalje se upravljanje radnom tačkom generatora ostvaruje delovanjem na referentnu vrednost napona u skladu sa eksploatacionim zahtevom. Ovakvim redosledom aktivnosti se u velikoj meri ograničava pojava tranzijenata u tački priključenja i uspostavlja se željena reaktivna rezerva.

Na slici 3 je, u cilju poređenja uticaja režima rada regulatora pobude, dat paralelni prikaz odziva dinamičke simulacije modela pri režimu automatske regulacije napona (crvena boja) i režima regulacije struje pobudnog namotaja (plava boja) na promenu prenosnog odnosa blok transformatora. Promena prenosnog odnosa se na slici 3 vrši dva puta u cilju ilustracije promene naviše

i naniže. Regulatorna sklopka se prvo podiže za jedan korak u trenutku  $t=1$  s i po završetku nastalog prelaznog procesa u trenutku  $t=50$  s ponovo vraća na pređašnju vrednost. Potrebno je naglasiti da slika 3, po promeni prenosnog odnosa, ne prikazuje povratak iz režima regulacije struje pobudnog namotaja u režim automatske regulacije napona.



Slika 3. Odziv dinamičkog modela generatora na promenu prenosnog odnosa blok transformatora pri regulaciji napona i regulaciji struje pobudnog namotaja

### 3.1. Režim automatske regulacije napona

Za potrebe analiza pri režimu automatske regulacije napona regulatora pobude nema potrebe dodatno modifikovati model prikazan na slici 2. Naime, kako se posmatraju ustaljena stanja odziva modelovanog sistema na promenu prenosnog odnosa blok transformatora, sasvim je dovoljno koristi proračun tokova snaga i očitavati vrednosti posmatranih veličina pre i posle promene.

### 3.2. Režim automatske regulacije struje pobudnog namotaja

U prethodnom tekstu je obrazložena potreba za prebacivanjem režima regulacije pobude iz regulacije napona u regulaciju struje pobudnog namotaja. U ovom odeljku će biti prikazane mogućnosti modelovanja ovog režima rada regulacije pobude u programskom paketu *PowerFactory*.

Da bi se stekao uvid u realan odziv mašine pri aktivnom režimu regulacije struje pobudnog namotaja, za model prikazan na slici 2 izvršena je dinamička simulacija uz promenu prenosnog odnosa, pri čemu su uvaženi dinamički modeli sinhronne mašine i regulatora pobude. Ovaj odziv je prikazan plavom bojom na slici 3. Može se videti da se po nastanku poremećaja izazvanog promenom prenosnog odnosa javlja kratak tranzijent, dok se ustaljena vrednost posmatrane veličine relativno malo menja.

U cilju iznalaženja alternativnog načina modelovanja efekta regulatora pobude u režimu regulacije struje pobudnog namotaja, koji će biti primenljiv i za proračun tokova snaga, došlo se do ideje da se analizira efekat sledećih načina modelovanja generatora:

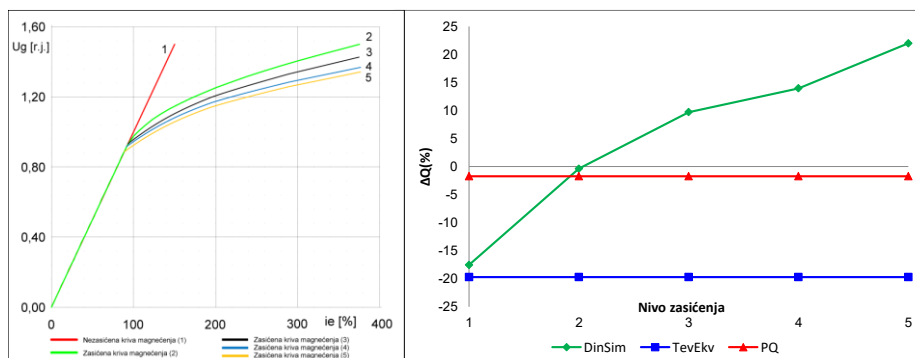
- Modelovanje generatora kao elektromotorne sile (ems) iza sinhronne reaktanse;
- Modelovanje generatora kao PQ čvor.

Pristup modelovanja generatora kao elektromotorne sile iza sinhronne reaktanse podrazumeva korišćenje sledećih elemenata u okviru programskog paketa *PowerFactory*: statičkog generatora (nije mu neophodno dodeliti tip, kao što je to slučaj sa modelom sinhronog generatora), serijske reaktanse (čija se vrednost podešava tako da odgovara nezasićenoj sinhronoj reaktansi ekvivalentiranog generatora) i *Station Controller*-a, čija je uloga ranije objašnjena. Cilj je da se napon statičkog generatora, koji predstavlja ems iza sinhronne reaktanse (pobudnu ems linearnog modela sinhronne mašine), podesi tako da se pre, uopšteno rečeno, poremećaja dobije isti napon na sabirnicama generatora kao i upotrebom standardnog modela sinhronne mašine. Kako se koristi nezasićena vrednost sinhronne reaktanse, očekuje se da će odziv na promenu prenosnog odnosa blok transformatora biti utoliko različit, u odnosu na odziv dobijen primenom dinamičkog modela, koliko je mašina više zasićena i više dolazi do izražaja reakcija indukta.

Pristup modelovanja generatora kao izvora konstantne snage (PQ) predstavlja veoma pogodan način, budući da je za model generatora potrebno promeniti samo podešenje lokalnog kontrolera u *Load Flow* prozoru za podešenje radnog režima sinhronne mašine iz režima *Const. V* u *Const. Q* režim.

Da bi se ispitao uticaj zasićenja na odziv dinamičkog modela, pa u skladu sa tim i dobio uvid u to koji alternativni model više odgovara kom nivou zasićenja sinhronne mašine, na slici 4 je dat, više kvalitativni nego kvantitativni, prikaz promene reaktivne snage na mestu priključenja u zavisnosti od nivoa

zasićenja sinhronne mašine, uzrokovan promenom prenosnog odnosa blok transformatora. Na slici 4 levo, prikazani su različiti nivoi zasićenja generatora za koje je vršeno ispitivanje. Numerička oznaka 1 predstavlja karakteristiku međugvožđa (nezasićena mašina), dok oznake od 2 do 5 predstavljaju krive magnećenja u skladu sa rastućim nivoom zasićenja.



Slika 4. Uticaj različitog nivoa zasićenja sinhronne mašine (levo) na odziv usled promene prenosnog odnosa blok transformatora (desno)

Slika 4 desno predstavlja grafički prikaz procentualne promene injeckiranja reaktivne snage u tačku priključenja kao posledicu promene prenosnog odnosa, u zavisnosti od nivoa zasićenja generatora. Dakle, zelena izlomljena kriva predstavlja trend procentualne promene injeckiranja reaktivnih snaga po promeni prenosnog odnosa, koja je izračunata na osnovu ustaljenih stanja pre i posle promene, očitanih tokom dinamičke simulacije. Može se videti da aproksimacija modela regulacije struje pobudnog namotaja preko učešća generatora u proračunu tokova snaga u vidu PQ čvora više odgovara sinhronim mašinama sa većim nivoom zasićenja, dok model ems iza sinhronne reaktanse više odgovara mašinama koje nisu zasićene.

#### 4. Prikaz rezultata analize

U ovom odeljku prikazaće se rezultati analize uticaja promene prenosnog odnosa blok transformatora na injeckiranje reaktivne snage i napon u tački priključenja. Analiza je vršena za četiri radne tačke definisane na slici 1. Posmatran je odziv za oba režima rada regulatora pobude, pri čemu su za režim regulacije struje pobudnog namotaja posebno posmatrani pomenuti načini modelovanja ovog režima. U cilju dodatne ilustracije uticaja naponsko-reaktivne krutosti tačke priključenja na prenosnu mrežu, reaktansa ekvivalenta mreže varirana je u opsegu od  $0 \Omega$ , što predstavlja beskonačno jaku mrežu, pa do najviše vrednosti koja je dobijena proračunom kratkih spojeva po sabirnicama 400 kV naponskog nivoa prenosne mreže (u iznosu od približno  $30 \Omega$ ).



U okviru tabele 1 dat je prikaz rezultata analize uticaja promene prenosnog odnosa blok transformatora na veličine u tački priključenja, pri čemu je uvedena konvencija da prvi indeks oznake odgovara posmatranom bloku (1 - TENT A6; 2 - TENT A5), dok drugi indeks odgovara stanju (0 - pre promene; 1 - posle promene). Treba napomenuti da su različiti rezultati formirani promenom režima rada regulacije pobude samo kod TENT A6, dok je režim rada regulatora pobude u TENT A5 u svim analizama podešen na režim automatske regulacije napona.

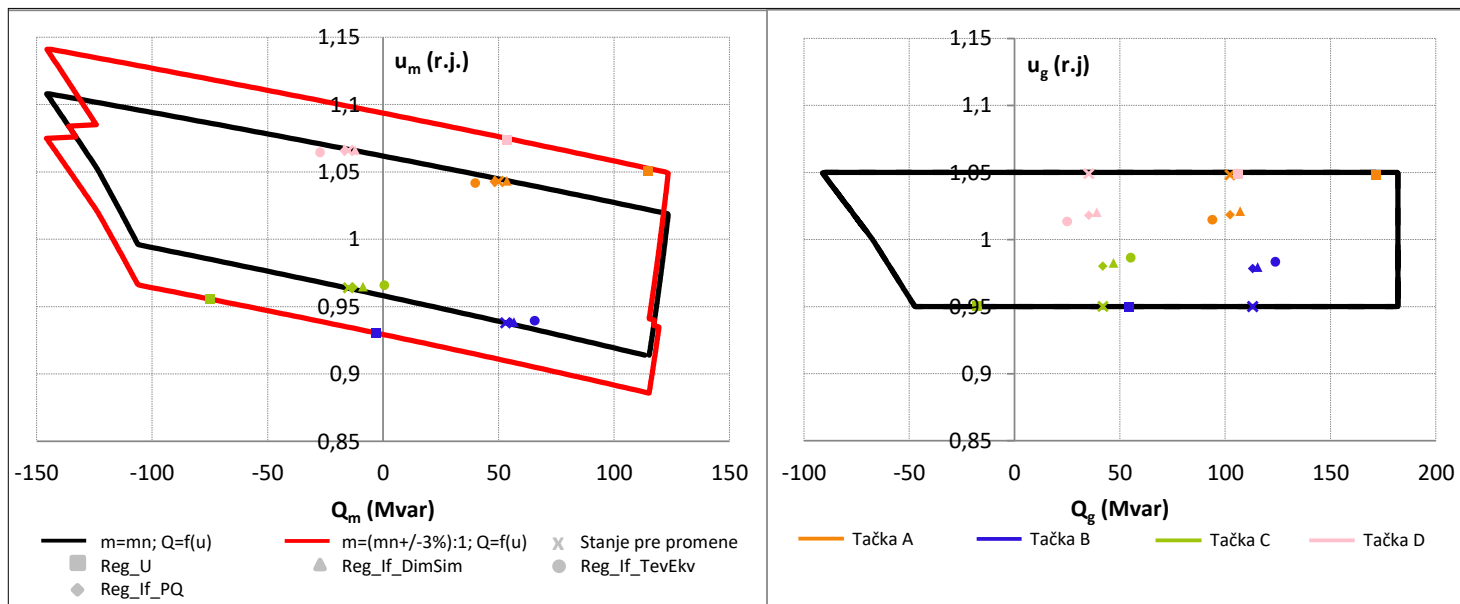
Uvidom u tabelu 1 može se doći do sledećih zaključaka. Pri režimu regulacije struje pobudnog namotaja promena prenosnog odnosa blok transformatora uzrokuje male promene injektiranja reaktivne snage u tačku priključenja, te posledično i male promene napona. Zbog toga, promena vrednosti ekvivalentne reaktanse mreže nema gotovo nikakav uticaj na ove veličine. Pri režimu automatske regulacije napona, po promeni prenosnog odnosa dolazi do osetne promene reaktivnog generisanja, kao posledica težnje regulatora da dostigne podešenu referencu. U ovom režimu promena ekvivalentne reaktanse mreže dolazi do izražaja. Sa druge strane, posmatrajući deo tabele 1 koji se odnosi na blok TENT A5, zaključak je da se ovaj blok praktično uopšte ne odaziva kada regulator pobude bloka TENT A6 radi u režimu regulacije struje pobudnog namotaja, dok se pri režimu automatske regulacije napona ovaj blok odaziva u skladu sa promenom napona u tački priključenja, uzrokovanom delovanjem bloka TENT A6. Prethodno navedeni zaključci važe generalno za sve analizirane radne tačke.

Na slici 5 je prikazan rezultat analize u U-Q ravni, pri čemu su date i naponsko-reaktivne mogućnosti bloka TENT A6 u tački priključenja, odnosno na sabirnicama generatora. Slika 5 predstavlja rezultat samo za jednu vrednost ekvivalentne reaktanse mreže, onu koja odgovara stvarnoj vrednosti u posmatranoj tački priključenja. Prikaz rezultata koji odgovaraju jednoj analiziranoj radnoj tački obeležen je određenom bojom, dok su rezultati različitog režima rada regulatora pobude, kao i načina modelovanja njegovog efekta, obeležavani različitim geometrijskim simbolima. Ako se sa slike 5 uzmu u razmatranje rezultati koji odgovaraju jednoj analiziranoj tački sa slike 1, npr. tački A, mogu se izvući sledeći zaključci. U odnosu na radno stanje pre promene prenosnog odnosa, kada je generator imao nultu regulacionu sposobnost, po promeni se, uz aktivan režim regulacije struje pobudnog namotaja, oslobađa regulaciona rezerva po reaktivnoj snazi (slika 5 levo), a radna tačka generatora udaljava od ograničenja po naponu (slika 5 desno). U odnosu na odziv dinamičke simulacije, koji se smatra realnim, odziv PQ modela pokazuje sa njim znatno bolje poklapanje u poređenju sa odzivom ekvivalenta predstavljelog ems-om iza sinhrona reaktanse.

**Tabela 1.** Rezultati analize uticaja promene prenosnog odnosa blok transformatora na veličine u tački priključenja

	Xm (Ω)	Q10 (Mvar)	Q11 Reg. U (Mvar)	Q11 Din. Sim. (Mvar)	Q11 Ekv. (Mvar)	Q11 PQ (Mvar)	Q20 (Mvar)	Q21 Reg. U (Mvar)	Q21 Din. Sim. (Mvar)	Q21 Ekv. (Mvar)	Q21 PQ (Mvar)	u0 (r.j.)	u1 Reg. U (r.j.)	u1 Din. Sim. (r.j.)	u1 Ekv. (r.j.)	u1 PQ (r.j.)
Tačka A	0	50,00	123,42	53,60	40,32	48,14	33,20	29,69	33,12	34,03	34,03	1,043	1,043	1,043	1,043	1,043
	5	50,00	123,56	53,60	40,23	48,14	34,08	28,56	33,76	34,79	34,18	1,043	1,045	1,043	1,043	1,043
	10	50,00	123,67	53,59	40,15	48,14	34,03	23,41	33,52	35,45	34,30	1,043	1,047	1,043	1,042	1,043
	15	50,00	121,50	53,59	40,08	48,14	34,03	19,64	33,34	36,03	34,41	1,043	1,048	1,043	1,042	1,043
	20	50,00	118,79	53,58	40,02	48,13	34,03	16,73	33,19	36,54	34,50	1,043	1,049	1,043	1,042	1,043
	25	50,00	116,55	53,58	39,97	48,13	34,03	14,34	33,05	37,00	34,59	1,043	1,050	1,043	1,042	1,043
	30	50,00	114,68	53,58	39,92	48,13	34,03	12,33	32,93	37,41	34,66	1,043	1,051	1,043	1,042	1,043
Tačka B	0	53,00	-23,78	56,66	64,96	55,22	35,71	35,71	35,63	35,79	35,79	0,938	0,938	0,938	0,938	0,938
	5	53,00	-17,69	56,67	65,11	55,23	35,79	41,23	35,45	34,85	35,62	0,938	0,936	0,938	0,938	0,938
	10	53,00	-13,20	56,68	65,24	55,23	35,79	45,23	35,23	34,04	35,47	0,938	0,934	0,938	0,939	0,938
	15	53,00	-9,74	56,68	65,35	55,24	35,79	48,32	35,02	33,32	35,34	0,938	0,933	0,938	0,939	0,938
	20	53,00	-7,00	56,69	65,45	55,24	35,79	50,77	34,83	32,68	35,23	0,938	0,932	0,938	0,939	0,938
	25	53,00	-4,75	56,69	65,54	55,24	35,79	52,77	34,66	32,10	35,13	0,938	0,931	0,938	0,939	0,938
	30	53,00	-2,88	56,70	65,62	55,25	35,79	54,44	34,50	31,57	35,04	0,938	0,931	0,939	0,940	0,938
Tačka C	0	-15,00	-98,35	-8,82	-0,36	-12,84	-17,77	-17,77	-17,93	-17,69	-17,69	0,964	0,964	0,964	0,964	0,964
	5	-15,00	-91,56	-8,80	-0,16	-12,84	-17,69	-11,65	-18,31	-18,86	-17,86	0,964	0,962	0,964	0,964	0,964
	10	-15,00	-86,56	-8,78	0,02	-12,84	-17,69	-7,20	-18,71	-19,89	-18,01	0,964	0,960	0,964	0,965	0,964
	15	-15,00	-82,71	-8,76	0,18	-12,83	-17,69	-3,78	-19,07	-20,81	-18,14	0,964	0,959	0,965	0,965	0,964
	20	-15,00	-79,65	-8,75	0,32	-12,83	-17,69	-1,06	-19,40	-21,63	-18,25	0,964	0,958	0,965	0,965	0,964
	25	-15,00	-77,16	-8,73	0,44	-12,83	-17,69	1,15	-19,70	-22,37	-18,35	0,964	0,957	0,965	0,966	0,964
	30	-15,00	-75,09	-8,72	0,56	-12,82	-17,69	3,00	-19,97	-23,05	-18,44	0,964	0,956	0,965	0,966	0,964
Tačka D	0	-15,00	75,72	-12,14	-26,73	-16,82	-19,54	-19,54	-19,61	-19,17	-19,17	1,066	1,066	1,066	1,066	1,066
	5	-15,00	69,45	-12,14	-26,86	-16,82	-19,14	-25,83	-19,41	-18,23	-19,03	1,066	1,068	1,066	1,066	1,066
	10	-15,00	64,72	-12,14	-26,98	-16,82	-19,18	-30,90	-19,62	-17,41	-18,90	1,066	1,070	1,066	1,065	1,066
	15	-15,00	61,04	-12,14	-27,08	-16,82	-19,17	-34,82	-19,77	-16,69	-18,80	1,066	1,071	1,066	1,065	1,066
	20	-15,00	58,07	-12,15	-27,17	-16,83	-19,17	-37,98	-19,90	-16,04	-18,70	1,066	1,072	1,066	1,065	1,066
	25	-15,00	55,64	-12,15	-27,26	-16,83	-19,17	-40,58	-20,01	-15,46	-18,62	1,066	1,073	1,066	1,065	1,066
	30	-15,00	53,59	-12,15	-27,33	-16,83	-19,17	-42,76	-20,11	-14,93	-18,54	1,066	1,074	1,066	1,065	1,066

Qxy; prvi indeks (x) odgovara posmatranom bloku (1 - TENT A6; 2 - TENT A5); drugi indeks (y) odgovara stanju (0 - pre promene; 1 - posle promene)



Slika 5. Grafički prikaz rezultata analize uticaja promene prenosnog odnosa blok transformatora na veličine u tački priključenja (levo) i sabirnicama generatora (desno) u U-Q ravni

## 5. Zaključak

U radu je prikazan uticaj promene prenosnog odnosa blok transformatora na injektiranje reaktivne snage i napon u tački priključenja na prenosnu mrežu. Analiza je izvršena za četiri radna režima, koje karakteriše potreba za promenom prenosnog odnosa blok transformatora u cilju oslobađanja reaktivnog opsega. Takođe, analiziran je uticaj režima rada regulatora pobude. Ustanovljeno je da je odziv na promenu prenosnog odnosa pri režimu automatske regulacije napona takav da izaziva tranzijentno reagovanje regulatora, što može da dovede do ozbiljnih problema, te je preporuka da se to izbegava. Analizom odziva dinamičkog modela na promenu prenosnog odnosa pri modelovanom režimu regulacije struje pobudnog namotaja ustanovljeno je da on zavisi od nivoa zasićenja generatora. Izvršeno je poređenje alternativnih načina modelovanja efekta režima regulacije struje pobudnog namotaja u proračunu tokova snaga, pri čemu je ustanovljeno da predstava generatora kao izvora konstantne snage, odnosno PQ čvora, daje bolje rezultate u odnosu na ekvivalent predstavljen elektromotornom silom iza sinhronne reaktanse, za nivo zasićenja generatora koji se javljaju u eksploataciji. Pored rezultata koji više odgovaraju realnosti, način podešavanja generatora kao PQ čvora u odnosu na formiranje alternativnog ekvivalenta je neuporedivo jednostavniji. Prema tome, daje se preporuka da se reakcija proizvodnog bloka na promene prenosnog odnosa blok transformatora, u proračunu tokova snaga pre i posle promene, modeluje predstavom generatora kao PQ čvora, za brze proračune. Što se tiče proizvodnog bloka koji radi paralelno sa blokom u kom je izvršena promena prenosnog odnosa blok transformatora, zaključak je da se ovaj blok praktično uopšte ne odaziva kada regulator pobude posmatranog bloka radi u režimu regulacije struje pobudnog namotaja. Takođe, izvršena je analiza uticaja naponsko-reaktivne krutosti tačke priključenja, pri čemu je ustanovljeno da za aktivan režim regulacije struje pobudnog namotaja promena naponsko-reaktivne krutosti mreže nema značajnog uticaja. Ovo praktično znači da odziv na promenu prenosnog odnosa blok transformatora ne zavisi od tačke priključenja.

Kao jedna od mogućnosti za dalje analize navodi se analiza uticaja statizma regulatora pobude na odziv veličina u tački priključenja po promeni prenosnog odnosa blok transformatora. Bitan pravac istraživanja je uključivanje modela pobude pri odradi limitera.

## Literatura

- [1] M. Čalović, *Regulacija elektroenergetskih sistema; Tom 2 - Regulacija napona i reaktivnih snaga*, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1997.

- [2] *PowerFactory User Manual*, DlgSILENT GmbH, Gomaringen, Germany, June, 2017.
- [3] Pravila o radu prenosnog sistema, verzija 3.0, JP Elektromreža Srbije, Oktobar, 2015.
- [4] Studija sezonske optimizacije regulacionih odnosa na blok transformatorima, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Beograd, Mart, 2017.
- [5] Report to IEEE Power System Relaying Committee, "Voltage Collapse Mitigation", IEEE PSRC, December, 1996.

**Abstract.** The analysis of a step-up transformer tap change on the quantities at the point of connection to the transmission grid is presented in this paper. The point of connection of generator TENT A6 has been analyzed, and a detailed model of this generator is available in software package DlgSILENT Power Factory. The comparison between the effect of a step-up transformer tap change on the quantities at the point of connection during automatic and manual operation of voltage regulator has been conducted. In order to conduct the analysis of the manual operation of the voltage regulator, the comparison between the different methods of modeling of these modes has been performed. Several generator operating points, selected in order to represent the need for tap change, have been analyzed. Also, previously mentioned analyses have been performed taking into account the voltage-reactive stiffness at the point of connection.

**Keywords:** step-up transformer, transformation ratio, the point of connection, modelling

## **Analysis of Step-up Transformer Tap Change on the Quantities at the Point of Connection to Transmission Grid**

Dragan Đorđević, Ana Radovanović, Jasna Dragosavac, Žarko Janda

Rad primljen u uredništvo: 10.11.2017. godine.  
Rad prihvaćen: 15.11.2017. godine.

