

Određivanje parametara automatskog regulatora napona transformatora u TS 110/35 kV Velika Plana (JP EPS)

Petar Pavlović, Igor Belić, Saša Minić

Univerzitet u Beogradu
ETI "Nikola Tesla", Elektrotehnički fakultet u Beogradu
Beograd, Srbija
petar.pavlovic@icent.org

Zoran Radonjić

JP EPS
Beograd, Srbija
zoran.radonjic@eps.rs

Sažetak—U radu je dat prikaz dobijenih rezultata određivanja parametara strujne i naponske grane automatskog regulatora napona transformatora u TS 110/35 kV Velika Plana. Određivanje funkcije automatskog regulatora napona transformatora predstavlja deo šire analize uticaja regulacije napona na smanjenje gubitaka u mreži ED Velika Plana. Za područje ED Velika Plana raspolagalo se kompletnim modelom mreže 0.4 - 35 kV, koja se napaja iz TS 110/35 kV Velika Plana, kao i podacima o preuzetim energijama svakog kupca i merenjima napona, aktivne i reaktivne snage na karakterističnim mestima u mreži, što je omogućilo formiranje i verifikaciju modela. Svi proračuni su urađeni u programskom alatu PSS® Sincal (ver. 11.0).

Ključne reči— automatski regulator napona; eksperimentalno merenje; statičke karakteristike opterećenja; smanjenje gubitaka

I. UVOD

U postojećem stanju u TS 110/35 kV Velika Plana samo je naponska grana automatskog regulatora napona transformatora aktivna, dok je strujna grana neaktivna. Vrednost napona na 35 kV sabirnicama u TS 110/35 kV Velika Plana zavisi samo od izmerene vrednosti napona na datim sabirnicama, ali ne i od opterećenja transformatora 110/35 kV. Automatski regulator napona transformatora održava vrednost napona na 35 kV sabirnicama u TS 110/35 kV Velika Plana u opsegu 34.5 - 35.6 kV.

Da bi se aktivirala i strujna grana automatskog regulatora napona, kao i odredila funkcija reagovanja automatskog regulatora napona, neophodni su verifikovani modeli sa opterećenjima zavisnim od napona. U nastavku teksta je dat kratak opis analizirane mreže, izvršenih eksperimentalnih merenja za potrebe dobijanja statičkih karakteristika opterećenja, kao i postupak implementacije i verifikacije modela. Nakon verifikacije modela, data je funkcija reagovanja automatskog regulatora napona sa aktivnom strujnom i naponskom granom.

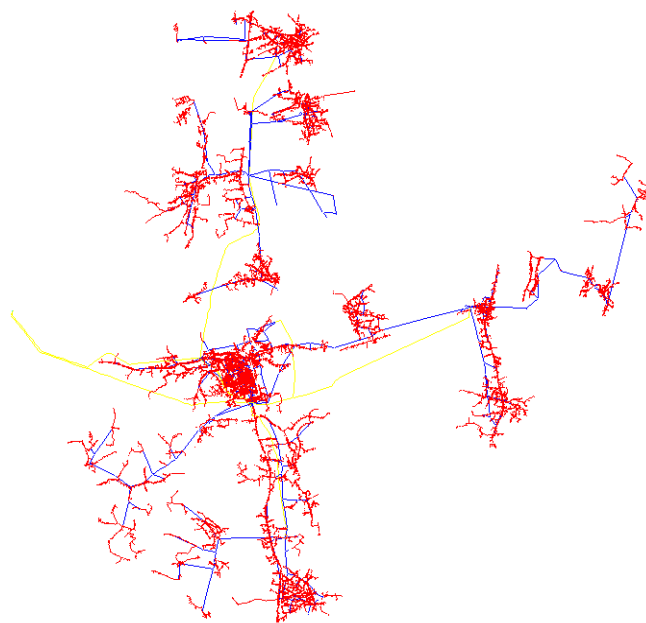
Razmatran je period od jedne godine, sa karakterističnim režimima i opterećenjima u datim režimima. Na osnovu dobijenih rezultata za date režime opterećenja sistema određeni su granični parametri automatskog regulatora napona. Prilikom određivanja funkcije automatskog regulatora napona vodilo se

računa da naponi budu u dozvoljenim granicama [1] u svakoj tački sistema, a ujedno da se predloženoj funkcijom automatskog regulatora napona, u koordinaciji sa podešenjem regulatora napona u TS 35/10 kV i TS 10/0.4 kV, imaju najmanji gubici.

II. FORMIRANJE MODELA

A. Georeferencirana mreža 0.4 - 35 kV

Za konzum ED Velika Plana raspolagalo se georeferenciranim modelom mreže po svim naponskim nivoima (0.4 - 35 kV), koji verno predstavlja razmatrani konzum. Na Sl. 1 je prikazan geografski izgled mreže napajane iz TS 110/35 kV Velika Plana, iz programskog alata PSS® Sincal (ver. 11.0). Crvenom bojom su predstavljeni elementi 0.4 kV naponskog nivoa, plavom bojom elementi 10 kV naponskog nivoa, a žutom bojom elementi 35 kV naponskog nivoa.



Slika 1. Geografski prikaz mreže na području ED Velika Plana

Područje ED Velika Plana ima jednu trafostanicu 110/35 kV sa dve instalisane jedinice snage po 31.5 MVA, koja predstavlja mesto preuzimanja električne energije od operatora prenosnog sistema i namena joj je distribucija električne energije na teritoriji ED Velika Plana. Na naponskom nivou 35 kV se iz ove trafostanice napaja ukupno osam TS 35/10 kV. Pomenute trafostanice 35/10 kV napajaju se posredstvom sedam 35 kV izvoda. Ukupan broj TS 10/0.4 kV, napajanih iz TS 35/10 kV na području konzuma ED Velika Plana je oko 300.

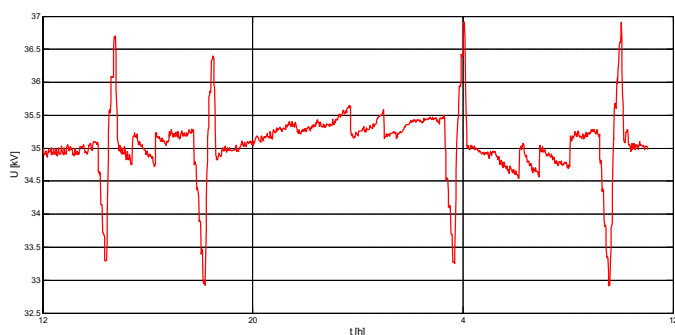
Raspolagalo se sledećim podacima o postojećoj električnoj mreži napona 0.4 - 110 kV:

- dužini, tipu i preseku svih deonica 0.4, 10 i 35 kV,
- parametarima transformatora 110/35, 35/10 i 10/0.4 kV,
- položajima regulatora napona transformatora u 35/10 kV i 10/0.4 kV,
- uklopnom stanju mreže srednjeg i niskog napona.

B. Eksperimentalna ispitivanja i merenja

Da bi se formirali modeli sa opterećenjima zavisnim od promene napona bilo je neophodno izvršiti eksperimentalno ispitivanje uticaja promene napona i izvršiti merenja napona, aktivne i reaktivne snagu karakterističnih kupaca električne energije. Eksperimentalna merenja sa ciljem utvrđivanja uticaja promene napona na promenu aktivnog i reaktivnog opterećenja u distributivnoj mreži sprovedena su na izabranim transformatorskim oblastima 10/0.4 kV. Eksperiment je izvršen ručnom promenom prenosnog odnosa transformatora 110/35 kV u TS 110/35 kV u opsegu $32 \text{ kV} < U_n < 37 \text{ kV}$, što je i prikazano na Sl.2. Sa Sl.2 se može videti da su izvršena četiri eksperimenta u toku jednog dana.

Pre svakog merenja na konzumima karakterističnih transformatorskih oblasti posebna pažnja je posvećena planiranju eksperimenta, analizi dijagrama potrošnje, izboru perioda za vršenje eksperimenta u kojima će najbolje moći da se uoči uticaj promene napona na promenu opterećenja, odnosno perioda sa najmanjom promenom opterećenja usled prirodne promene konzuma.



Slika 2. Dijagram promene napona na sabirnicama 35 kV u TS 110/35 kV Velika Plana u toku 24-časovnog merenja

C. Statičke karakteristike opterećenja

Analizom rezultata merenja ustanovljeno je da je najpribližniji model statičkih karakteristika opterećenja linearan model za sve kategorije potrošnje (domaćinstva, komercijalno-administrativnu i industrijsku potrošnju). Kod ovog modela dobijena je najmanja suma kvadrata odstupanja u celom opsegu promene napona od maksimalne do minimalne vrednosti. Takođe, linearan model realno reprezentuje promenu aktivne i reaktivne snage opterećenja sa naponom na kompletnom opsegu promene napona od maksimalne do minimalne vrednosti [2]. Statičke karakteristike opterećenja svakog kupca, na osnovu kojih je formiran model predstavljene su izrazima (1) i (2):

$$P(U) = a_{p0} \cdot P(U_n) + a_{p1} \cdot P(U_n) \cdot U \quad (1)$$

$$Q(U) = a_{q0} \cdot Q(U_n) + a_{q1} \cdot Q(U_n) \cdot U \quad (2)$$

U izrazima (1) i (2) veličine $P(U_n)$ i $Q(U_n)$ označavaju aktivnu i reaktivnu snagu opterećenja pri nominalnom naponu U_n . Podaci, kojima se raspolagalo pored eksperimentalnih merenja, su izmerena petnaestominutna aktivna i reaktivna snaga u TS 110/35 kV Velika Plana i to na 35 kV strani transformatora 110/35 kV za duži vremenski period. Na osnovu energije fakturisane kupcima, na mestima merenja pojedinačnih kupaca, kao i izmerenih petnaestominutnih aktivnih i reaktivnih opterećenja u TS 110/35 kV, u okviru iterativnog postupka procenjeno je vreme korišćenja energije isporučene kupcima kao i faktor snage za različite režime opterećenja sistema. Treba napomenuti da su opterećenja modelovana po svakom mernom mestu srazmerno protekloj energiji na osnovu iterativno procenjenog vremena korišćenja energije isporučene kupcima, kao i faktora snage, za različite režime opterećenja sistema. Parametri a_{p0} i a_{p1} predstavljaju relativne vrednosti komponenti aktivne snage sa konstantnom snagom i konstantnom strujom, respektivno. Isto tako parametri a_{q0} i a_{q1} predstavljaju relativne vrednosti komponenti reaktivne snage sa konstantnom snagom i konstantnom strujom, respektivno. Navedeni parametri su određeni na osnovu ekperimentalnog ispitivanja i merenja.

D. Modelovanje opterećenja i implementacija u programskom alatu PSS[®] Sincal (ver. 11.0)

Opterećenja $P(U)$ i $Q(U)$ su iterativno određena na osnovu proteklih energija i statičkih karakteristika opterećenja određenih za određene kategorije potrošača i određene režime opterećenja sistema. Data opterećenja su implementirana u programski alat PSS[®] Sincal (ver. 11.0) i izvršena je verifikacija modela poređenjem dobijenih rezultata sa merenjima koja su izvršena za date režime opterećenja.

III. ANALIZA OBIMA REGULACIJE NAPONA PO NAPONSKIM NIVOIMA NA MODELU ED VELIKA PLANA

Kao što je na početku rečeno, određivanje funkcije automatskog regulatora napona predstavlja deo šire analize koja se bavila optimizacijom naponskih prilika sa aspekta

smanjenja gubitaka u mreži ED Velika Plana. Iz tog razloga će biti dat kratak opis date analize.

U postupku optimizacije naponskih prilika u distributivnoj mreži ED Velika Plana sa ciljem minimizacije procenta gubitaka polazi se od proračuna za maksimalno opterećenu distributivnu mrežu. Ispunjavanjem naponskih kriterijuma u modelu mreže za maksimalni trenutak prelazi se na postupak optimizacije napona. Određivanjem vrednosti napona na sabirnicama 35 kV u TS 110/35 kV u maksimalnom režimu sa uklopnim stanjem u kojem su izvršene promene prenosnih odnosa transformatora TS 35/10 kV i TS 10/0.4 kV, dobijena je gornja granica referentnog napona na sabirnicama pri kojoj su zadovoljene naponske prilike. Na osnovu analize uticaja promene napona na gubitke [2] i činjenice da se sa porastom napona u režimima sa visokim opterećenjima, procentualni gubici snage se smanjuju, ova vrednost maksimalnog napona obezbeđuje i minimalne procentualne gubitke u mreži. Vrednost gornje granice referentnog napona na sabirnicama 35 kV u TS 110/35 kV Velika Plana iznosi 35.81 kV.

Nakon analiza sprovedenih u maksimalnom režimu pristupilo se analizi nivoa gubitaka i određivanju granica napona u letnjem maksimumu. Ustanovljeno je da se minimalni gubici imaju za isti položaj regulatora napona u TS 35/10 kV kao i za maksimalni trenutak (zimski maksimum). To zapravo znači da u posmatranom konzumu ED Velika Plana nije opravdana sezonska regulacija napona u TS 35/10 kV. Postupak optimizacije se ponavlja za letnji minimum. S obzirom na to da je u analizi uticaja promene napona na gubitke u mreži dobijeno da se za karakteristične režime sa nižim vrednostima opterećenja smanjivanjem napona smanjuje procenat gubitaka snage, u ovom koraku se vrši minimizacija napona u tačkama sistema radi dobijanja donje granice referentnog napona. Proverava se narušenost naponskih ograničenja i određuje stanje sa minimalnim gubicima. Na ovaj način je određena donja granica referentnog napona na sabirnicama 35 kV u TS 110/35 kV koja iznosi 32 kV. Pri ovom naponu i najmanjem opterećenju mreže (posmatra se tok aktivne i reaktivne snage kroz transformatore 110/35 kV u TS 110/35 kV Velika Plana) se imaju minimalni gubici u mreži.

Rezultati sprovedenih analiza i izvršene optimizacije napona pokazuju da nije opravdana sezonska promena položaja regulatora u TS 35/10 kV tj. na ovaj način nije moguće postići smanjenje procenta gubitaka u mreži uz uslov da se naponi održavaju unutar dozvoljenih granica, već da se regulacija napona u mreži treba vršiti automatskim regulatorom napona u transformatorima 110/35 kV u TS 110/35 kV. U našem slučaju promena položaja regulatora u TS 35/10 kV neophodna je radi zadovoljenja naponskih prilika u mreži u maksimalnom režimu.

IV. AUTOMATSKI REGULATOR NAPONA TRANFORMATORA

Automatski regulator napona se koristi za regulaciju napona energetskih transformatora sa regulacionom preklupkom. Regulaciju može vršiti i pod opterećenjem. Može regulisati napon na sabirnicama 35 kV dva transformatora u pojedinačnom ili paralelnom radu. U slučaju kada su aktivne i strujna i naponska grana, u pojedinačnom radu regulator

napona daje komandu za podizanje napona, ako je zadovoljen uslov (3), a za spuštanje napona ako je zadovoljen uslov (4).

$$U_m < U_n + (K_i \cdot I_m / I_n) - N_n \quad (3)$$

$$U_m > U_n + (K_i \cdot I_m / I_n) + N_n \quad (4)$$

Veličine u izrazima (3) i (4) su:

- U_m [kV] - izmereni napon na sabirnicama,

- I_m [kA] - izmerena struja,

- U_n [kV] - napon u praznom hodu,

- K_i/I_n [kV/kA] - konstanta strujne kompenzacije,

- N_n [kV] - zadata zona neosetljivosti.

U slučaju paralelnog rada postoji i dodatni kriterijum zadavanja ugla cirkulacione struje i napona na sabirnicama. Za proračune koji će biti predstavljeni za područje ED Velika Plana neće se ulaziti u analizu datog kriterijuma.

V. ODREĐIVANJE FUNKCIJE REAGOVANJA AUTOMATSKOG REGULATORA NAPONA U TS 110/35 kV VELIKA PLANA

Polazi se od formiranog modela mreže za režim maksimalnih opterećenja pri nominalnom naponu na sabirnicama 35 kV u TS 110/35 kV u kojima transformatori 110/35 kV imaju mogućnost automatske regulacije napona pod opterećenjem.

Kao što je napomenuto, nakon definisanja optimalne regulacije u transformaciji 35/10 kV i 10/0.4 kV prelazi se na sledeći korak, a to je promena referentnog napona na sabirnicama 35 kV u TS 110/35 kV i proverava se uticaj promene referentnog napona na gubitke u mreži. Ako se promenom referentnog napona utiče na smanjenje gubitaka, postupak se ponavlja sve dok se procenat gubitaka smanjuje, a pri tome su ispunjeni naponski kriterijumi. Referentni napon za koji su utvrđeni minimalni gubici predstavlja maksimalnu vrednost u opsegu regulacije automatskog regulatora napona.

Optimizacijom napona u maksimalno opterećenoj distributivnoj mreži (zimski maksimum) i definisanja gornje granice opsega regulacije napona na sabirnicama 35 kV u TS 110/35 kV prelazi se na analizu modela mreže za maksimalno opterećenu mrežu u letnjoj sezoni (letnji maksimum).

U tom slučaju se za tako definisani položaj regulatora napona u TS 35/10 kV određuje referentni napon na sabirnicama 35 kV u TS 110/35 kV i proveravaju ograničenja naponskih prilika za minimalno opterećenu mrežu (letnji minimum). Na ovaj način se definiše referentni napon koji predstavlja minimalnu vrednost opsega regulacije automatskog regulatora napona. Dakle, ako nije potrebno sprovoditi sezonsku regulaciju napona kako bi se postigli minimalni gubici u mreži analize i proračuni tokova snaga i naponskih prilika se vrše za dva stanja u mreži. Ta dva stanja su generalni

maksimum i generalni minimum, najčešće zimski maksimum i letnji minimum.

Transformatori u TS 110/35 kV Velika Plana imaju mogućnosti regulacije napona u koracima od $\pm 11 \times 1.5\%$ nominalnog napona. U TS 110/35 kV Velika Plana ugrađen je model automatskog regulatora napona, "Elprom - Energo" (MZ-4). Pomenuti regulator ima mogućnost regulacije napona pojedinačno ili u paralelnom radu oba transformatora.

U toku eksperimentalnih merenja vršenih za potrebe određivanja statičkih koeficijenata opterećenja, utvrđeno je da je automatski regulator napona reagovao nekoliko puta kako bi se napon održavao u određenim granicama (Sl. 2). Na osnovu dijagrama promene napona može se zaključiti da se napon održava u opsegu 34.5 - 35.6 kV. Analizom uticaja promene napona na gubitke u mreži utvrđeno je da je u slučajevima visokih opterećenja potrebno održavati napon na sabirnicama 35 kV na nivou iznad nominalne vrednosti, dok se pri nižim opterećenjima generišu manji gubici ako je i napon niži od nominalnog. Kako bi se definisao način rada automatskog regulatora napona u cilju optimizacije napona sa aspekta minimalnih gubitaka, pored određenih granica referentnog napona na sabirnicama 35 kV potrebno je da regulator deluje u zavisnosti od opterećenja kroz transformatore 110/35 kV na način, koji će odrediti funkciju reagovanja automatskog regulatora napona.

Na osnovu opterećenja transformatora 110/35 kV koji su u paralelnom radu i napona na njihovim sabirnicama 35 kV u režimu sa maksimalnim opterećenjima i prepodešenim regulatorima u TS 35/10 kV i 10/0.4 kV za potrebe ispunjenja naponskih kriterijuma definisana je maksimalna referentna vrednost napona na sabirnicama 35 kV i iznosi 35.81 kV. Pošto je pokazano da sezonsko podešenje regulatora u TS 35/10 kV nema pozitivne efekte na smanjenje gubitaka, donja granica regulacije određena je na osnovu minimalnog opterećenja (letnjeg minimuma) i iznosi 32 kV.

Da bi se postigli minimalni procenat gubitaka u kompletnom opsegu opterećenja sistema, regulator napona u TS 110/35 kV Velika Plana bi trebalo da daje komandu za podizanje napona, ako je zadovoljen uslov (5), a za spuštanje napona ako je zadovoljen uslov (6):

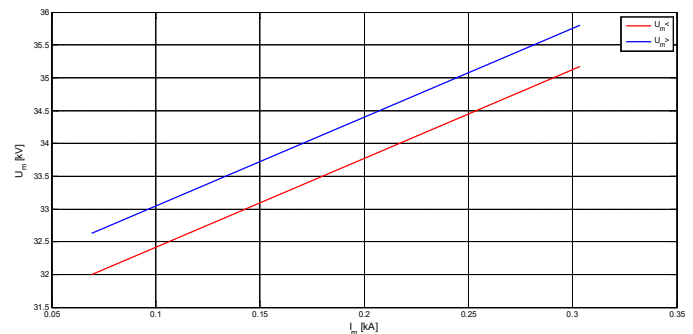
$$U_m < 31,37 + 13,57 \cdot I_m - 0,315 \quad (5)$$

$$U_m > 31,37 + 13,57 \cdot I_m + 0,315 \quad (6)$$

Parametri u izrazima (5) i (6) imaju sledeća značenja:

- U_m [kV] - izmereni napon na sabirnicama 35 kV,
- I_m [kA] - izmerena struja kroz transformator 110/35 kV,
- $U_n = 31,37$ kV (napon u praznom hodu transformatora),
- $K_i/I_n = 13,57$ kV/kA (konstanta strujne kompenzacije),
- $N_n = 0,315$ kV (zadata zona neosetljivosti regulatora). Zona neosetljivosti iskustveno je usvojena i iznosi $0.9\% \cdot U_n$.

Na Sl. 3 predstavljena je funkcija reagovanja automatskog regulatora napona u TS 110/35 kV Velika Plana. Na ordinati je prikazan izmereni napon na sabirnicama 35 kV u kV, dok je na apscisi prikazano opterećenje transformatora 110/35 kV. Crvena linija predstavlja izraz (5). Za sve vrednosti napona i struje (opterećenja) ispod date krive dolazi do reagovanja automatskog regulatora napona i povećanja napona. Plava linija predstavlja izraz (6). Za sve vrednosti napona i struje (opterećenja) iznad date krive dolazi do reagovanja regulatora i smanjenja napona.



Slika 3. Funkcija reagovanja automatskog regulatora napona u TS 110/35 kV Velika Plana

VI. REZIME

Za potrebe formiranja modela raspolagalo se georeferenciranim modelom mreže, dok su opterećenja određena na osnovu eksperimentalnih merenja, merenja proteklih energija svakog od kupaca i iterativno procenjenog vreme korišćenja maksimalne snage. Na osnovu svega navedenog određene su zavisnosti $P(U)$ i $Q(U)$ za svakog kupca. Modeli su formirani i verifikovani za različite režime opterećenja na osnovu kontrolnih merenja i implementirani su u programski alat PSS[®] Sincal (ver. 11.0).

Dobijeni rezultati proračuna tokova snaga i naponskih prilika u modelima koji verno reprezentuju promenu opterećenja sa promenom napona, za različite režime opterećenja, došlo se do zaključka da je pri višim opterećenjima neophodno održavati napone u mreži na što višoj vrednosti, dok pri nižim opterećenjima neophodno je održavati napone na što nižoj vrednosti u mreži ED Velika Plana. Na ovaj način bi se imali (i) manji procentualni gubici u ED Velika Plana. Takođe je pokazano da ne postoji potreba za sezonskim podešenjem napona u TS 35/10 kV, tako da glavnu ulogu u smanjenju gubitaka ima automatski regulator napona u TS 110/35 kV. $\alpha + \beta = \chi$. (1) (1)

Na osnovu utvrđenih maksimalnih i minimalnih vrednosti napona na sabirnicama 35 kV za minimalan i maksimalan režim, kao i za karakteristične režime, određena je funkcija reagovanja automatskog regulatora napona u TS 110/35 kV Velika Plana. Prilikom određivanja graničnih vrednosti napona, vodilo se računa da naponi na kompletnom konzumu budu u dozvoljenim granicama u svakoj tački sistema, na kompletnom opsegu regulacije. Predložena regulacija napona je usklađena sa podešenjem regulatora napona u TS 35/10 kV i 10/0.4 kV i kao takva omogućava da imaju minimalni procenat gubitaka u mreži ED Velika Plana.

LITERATURA

- [1] Pravila o radu distributivnog sistema (JP EPS), <https://www.aers.rs/Index.asp?l=1&a=41.04&tp=TEEE>
- [2] P. Pavlović, I. Belić, S. Minić, „Analiza promene gubitaka aktivne i reaktivne snage promenom napona na konzumu elektrodisributivne mreže Velika Plana sa implementiranim statičkim karakteristikama opterećenja u modelu mreže“, CIGRE, RC2 08, Vršac 2016
- [3] D. Stojanović, V. Kostić, L. Korunović, M. Dočić, "Raspodela troškova gubitaka aktivne snage na potrošače distributivne mreže", Treće jugoslovensko savetovanje o elektrodistributivnim mrežama - JUKO CIRED, Vrnjačka Banja, 15-18. oktobar 2002, Sveska 3, str. 49-54
- [4] Lidija M. Korunović Milica Rašić, Nenad Floranović, Vladica Aleksić, LOAD MODELLING AT LOW VOLTAGE USING CONTINUOUS MEASUREMENTS, FACTA UNIVERSITATIS Series:Electronics and Energetics Vol. 2 7 , N o3 September 2014, pp. 455 465
- [5] H. L. Willis, Power distribution planning reference book, Marcel Dekker, 1997

ABSTRACT

The paper presents obtained results of determining the parameters of the current and voltage branch of the automatic

voltage regulator of the transformers in SS 110/35 kV Velika Plana. Determining the function of the automatic voltage regulator of the transformers is a part of a wider analysis possibilities of voltage regulation on power losses reduction in the Velika Plana distribution system. For the Velika Plana distribution area we had a complete model of the 0.4 - 35 kV network, which is supplied from SS 110/35 kV Velika Plana, as well as data of acquired energies of each customer and voltage, active and reactive power measurements at characteristic points in the network, which has enabled the formation and verification of the model. All calculations are done in the PSS® Sincal software tool (ver. 11.0).

DETERMINATION OF PARAMETERS OF AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR OF TRANSFORMERS IN TS 110/35 KV VELIKA PLANA (EPS)

Petar Pavlović, Igor Belić, Saša Minić, Zoran Radonjić