

MODELOVANJE AUTOMATSKE REGULACIJE NAPONA POMOĆU REGULATORA NAPONA NA SREDNJE NAPONSKIM IZVODIMA 10 kV OGRANAKA ARANĐELOVAC - POGON TOPOLA

Goran ŽIVKOVIĆ, JP EPS Tehnički odsek Aranđelovac, Srbija
Rastko KOSTIĆ, Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla" Beograd, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Rad obrađuje rešavanje problema pada napona većeg od dozvoljenog na srednjenaponskim izvodima 10 kV ugradnjom automatskog regulatora napona. Na određenim deonicama izvoda pojavljuju se padovi napona veći od dozvoljenih, iz razloga velike dužine voda, malih preseka provodnika ili dotrajalosti mreže. Ovi padovi napona u normalnom uklopnom stanju mogu se smanjiti na više načina, rekonstrukcijom dalekovoda, izgradnjom novih EEO, kompenzacijom reaktivne energije ili ugradnjom regulatora napona (autotransformatora). U radu je obrađena primena regulatora napona u cilju poboljšanja naponskih prilika na predmetnim delakovodima, sa izradom modela na konkretnim dalekovodima, i analizom energetskih veličina (napona, struje, gubitaka), sa i bez regulatora. Izvršena je i uporedba više načina smanjenja padova napona, ugradnjom regulatora napona, rekonstrukcijom dalekovoda i izgradnjom novih EEO.

Ključne reči: regulator napona, srednjenaponski izvod, automatska regulacija

ABSTRACT

The paper presents solution for voltages below prescribed value on 10 kV midlevel voltage feeders in the distribution area of Aranđelovac - department Topola by implementing automatic voltage regulators. On farthest sections of distribution feeders there are voltage drops higher than allowed, caused by length of feeders, small crosssections of lines, high loads or decrepit of network. These low voltage problems in normal operational state can be solved in several ways: by reconstructions of lines, by construction of new power facilities, by reactive power compensations or by integrating voltage regulators (autotransformers). This paper present application of voltage regulators in order to improve the poor voltage conditions on the subject lines, and analyses of electrical parameters (voltage, current and losses), with and without installed voltage regulators. Comparison of several ways of reducing voltage drops, by installation of regulators, by reconstruction of lines and construction of new power facilities has been performed.

Key words: voltage regulators, midlevel voltage feeder, automatic voltage regulation

Goran Živković, dipl.el. inž. JP EPS Odsek Aranđelovac, goran.zivkovic@eps.rs
Rastko Kostić, mast. el. inž. Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla" Beograd, rastko.kostic@ieent.org

UVOD

Analizom naponskih prilika u srednjenaponskoj mreži uočljiv je problem pada napona većeg od dozvoljenog (-10%). Razlozi su višestruki, velike dužine vodova, mali preseki provodnika, povećanje opterećenja vodova, povećanje kapacitivnog opterećenja vodova. Ugradnja automatskog regulatora napona je jedano od rešenja poboljšanja naponskih prilika na srednjenaponskim izvodima. Automatski regulator napona može biti izveden od 2 ili 3 jednofazna autotransformatora, ili sa jednim trofaznim autotransformatorom. U svetu se više koriste jednofazni regulatori napona, pre svega iz razloga niže cene, manjih gabarita i jeftinijeg održavanja. Regulatori napona su autotransformatori sa mogućnošću promene prenosnog odnosa pomoću regulacione sklopke pod

teretom i mogu se montirati u zasebnim postrojenjima na tlu, ili na stubu. Upravljačkom jedinicom se definiše željeni napon na izlazu iz regulatora napona, položaj regulacione sklopke se automatski menja, tako da se na izlazu (sekundaru) iz regulatora napona održi zahtevani napon u koliko je to moguće. Izlazni napon je direktno proporcionalan ulaznom (primarnom) naponu na regulatoru napona. Kako bi regulator napona bio maksimalno iskorišćen, odnosno dao najveći učinak, najbitnije je odrediti najbolju lokaciju na predmetnom izvodu. Uopšteno se može smatrati da je najbolje odabrana lokacija ona gde počinju problemi sa naponom prilikama maksimalnog i minimalnog opterećenja. Regulator napona je moguće uvesti u SCADA sistem, a samim tim se dispečerskom centru omogućava daljinsko upravljanje regulatorima, uvid u merene veličine struja i napona, položaj regulacione sklopke i druge podatke koji se mogu zahtevati.

KARAKTERISTIKE REGULATORA NAPONA

Opšte karakteristike

Regulacija napona u trofaznim sredjenaponskim mrežama, se može ostvariti sa tri jednofazna regulatora spojena u zatvoreni trougao, i u takvoj vezi je moguća regulacija u opsegu $\pm 15\%$, u odnosu na primarni napon. Sve tri jedinice su istih karakteristika sa regulacijom napona od $\pm 10\%$. U radu je analiziran jednofazni regulator napona, sa mogućnošću regulacije napona pod teretom u 32 položaja, 16 položaja regulacije napona za podizanje napona i 16 položaja regulacije napona za snižavanje napona. Upravljačkom jedinicom se definiše željeni napon na sekundarnoj strani regulatora, a napon se meri i sa primarne i sa sekundarne strane regulatora napona i na osnovu izmerenih vrednosti regulator napona održava napon unutar definisanih granica i osigurava ispravan rad uređaja koji su priključeni na distributivnu mrežu. Primer jednofaznog regulatora napona prikazan je na sl. 1.

Napon kV	Snaga kVA	Strujno opterećenje (A)				
		Opseg regulacije (%)				
		$\pm 10\%$	$\pm 8,75\%$	$\pm 7,5\%$	$\pm 6,25\%$	$\pm 5\%$
11	55	50	55	60	68	80
11	110	100	110	120	135	160
11	165	150	165	180	203	240
11	220	200	220	250	270	320
11	330	300	330	360	405	480
11	440	400	440	480	540	640
11	550	500	550	600	668	668
11	660	600	668	668	668	668

TABELA 1 - Dozvoljeno strujno opterećenje regulatora napona



SLIKA 1- Primer jednofaznog regulatora napona

Delovi regulatora napona

- a. Odvodnik prenapona
- b. Provodni izolator
- c. Stezaljke sa navojima
- d. Ventil za pritisak koji automatski otvara na 35 kPa
- e. Pokazivač položaja regulatora
- f. Natpisne pločice (dve identične, jedna na rezervoaru, a jedna na kontrolnoj tabli kućišta)
- g. Nosači za montiranje
- h. Ventil za uzorkovanje ulja
- i. Pokazivač nivoa ulja
- j. Sud
- k. Ručke za podizanje poklopca
- l. Priključak za dolivanje ulja
- m. Ručke za kompletno podizanje regulatora
- n. Priključci za uzemljenje
- o. Delovi za pričvršćenje regulatora
- p. Kontrolni panel – Upravljačka jedinica

Upravljačka jedinica – osnovni delovi

- a. Preklopka za interni ili eksterni izvor napajanja
- b. Preklopka za automatsko ili ručno upravljanje
- c. Sklopka za ručno ili automatsko podizanje i spuštanje napona
- d. Reset sklopka za graničnike regulacije
- e. Svetlo za indikaciju neutralnog položaja
- f. Brojač prorada
- g. Konektor za povezivanje za daljinski prenos podataka
- h. Stezaljke za ispitivanje napona
- i. Stezaljke za spoljni izvor napajanja

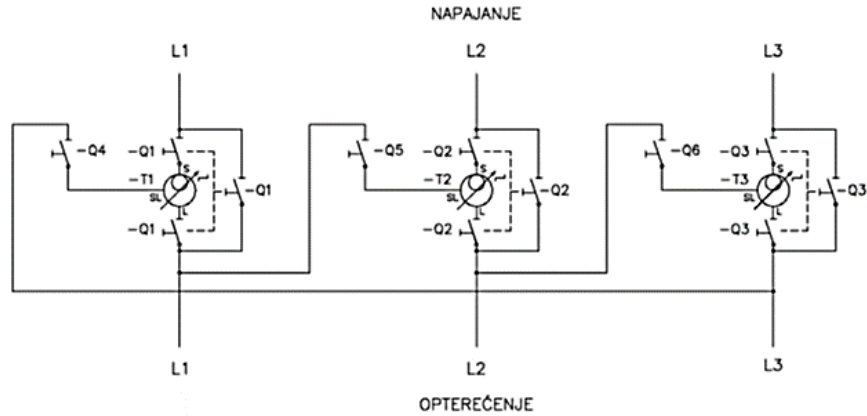
Osnovne funkcije upravljačke jedinice su:

- a. Podešavanje željenog napona
- b. Podešavanje opsega regulacije
- c. Podešavanje vremenskog kašnjenja
- d. Daljinska signalizacija stanja regulatora napona

- e. Daljinski prenos merenih vrednosti
- f. Daljinsko upravljanje regulatorom napona

Povezivanje regulatora napona

Povezivanje jednofaznih regulatora napona prikazano je na slici 2. Za svaki regulator napona upotrebljava se sklopka za premošćavanje i dva rastavljača. Navedeni sklop služi za premošćavanje regulatora napona, odnosno omogućava rad distributivnog voda bez ugrađenih regulatora napona. Sklop je opremljen blokadom koja onemogućava pogrešne manipulacije.



SLIKA 2 - Primer povezivanja tri jednofazna regulatora



SLIKA 3 - Primer povezivanja tri jednofazna regulatora na tlu (Grčka)

Zaštita regulatora napona

Prema preporukama proizvođača regulatora napona ugrađuju se četiri odvodnika prenapona. Prvi odvodnik prenapona (serijski odvodnik prenapona) nazivnog napona 3 kV se ugrađuje između stezaljke S i L. Sve tri stezaljke S, L i SL su štíčene *shunt* odvodnicima prenapona nazivnog napona 15 kV. Sva četiri odvodnika prenapona se isporučuju zajedno s regulatorom napona i na njega montiraju.

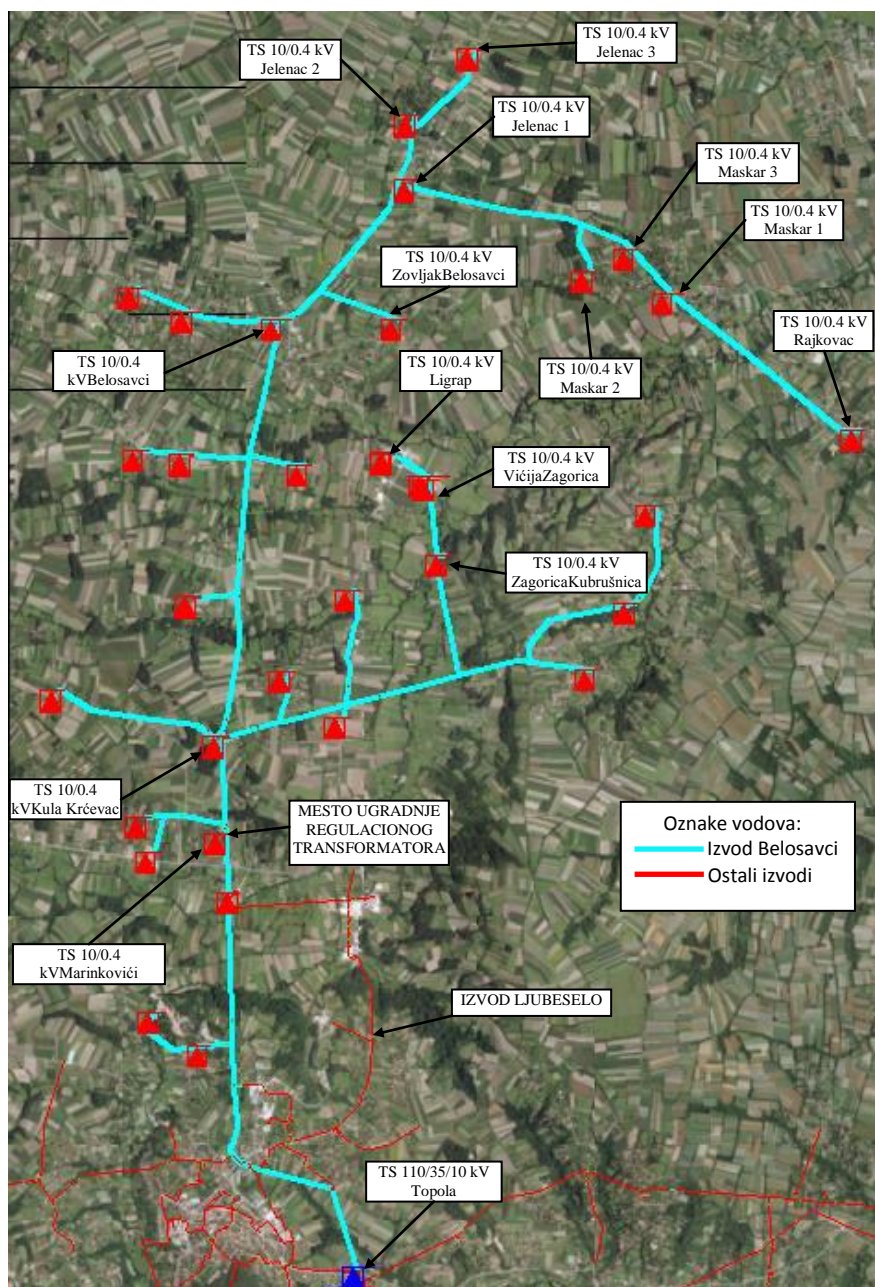
Napajanje pomoćnim naponom

Iz samog regulatora napona se dobija pomoćni naizmenični napon 240V, 50Hz, nominalne struje 6A, i koristi se za napajanje grejača, snage 50W, sijalica, punjača akumulatora. Takođe ako je potrebno mogu se instalirati i AKU baterije, 24/12V, za napajanje daljinskih stanica i drugih potrošača jednosmernog napona.

IZRADA MODELA NA KONKRETNOM 10 kV IZVODU

Analiza postojećeg stanja predmetnog 10 kV izvoda

Kao predmetni izvod izabran je nadzemni 10 kV izvod Belosavci iz TS 110/35/10 kV Topola koji je u dugodišnjoj eksploataciji često imao problema sa niskim naponima, što je potvrđeno i brojnim merenjima napona na različitim čvorištima na samom izvodu. Izvod Belosavci je najduži izvod u mreži ogranka Arandjelovac, sa ukupnom dužinom mreže od 38.7 km koji napaja od oko 2 MVA jednovremene maksimalne snage (1.5 MVA domaćinstva i oko 500 kVA industrijskih potrošača). Magistralni pravac dužine 17.5 km je gotovo čitavom dužinom izveden provodnikom preseka AlFe 50 mm², osim završne deonice dužine 2.3 km koja je izvedena provodnikom preseka AlFe 25 mm² i pojedinih kratkih kablovskih deonica. Ogranci izvoda su izvedeni provodnicima preseka AlFe 25 mm² i AlFe 50 mm². Kompletan izvod je izgrađen početkom 80-tih godina. Izvod Belosavci se napaja sa tercijera tronamotajnog transformatora 110/35/10 kV, kod koga je automatski regulisana 35 kV naponska strana transformatora na vrednost oko 36 kV, dok regulacija napona na 10 kV strani nije moguća. Zbog toga napon tercijera transformatora prvenstveno zavisi od napona u prenosnoj 110 kV mreži. Zbog toga se kao rešenje loših naponskih prilika na pomenutom izvodu nameće alternativno rešenje u vidu ugradnje automatskog regulatora napona na odgovarajućoj lokaciji na izvodu.



SLIKA 4 -Geografski prikaz izvoda Belosavci

Za potrebe analize funkcionisanja mreže 10 kV modelovana su opterećenja sa konstantnom snagom (P, Q čvorovi) po TS 10/0.4 kV i mernim mestima 10 kV. Opterećenja su proračunata na osnovu ukupne energije isporučene kupcima kroz svaku TS 10/0.4 kV i na svakom mernom mestu 10 kV u 2016. godini (u pitanju je period 1. oktobar 2015. godine - 30. septembar 2016. godine). Koeficijent srazmere energije isporučene kupcima i modelovanog aktivnog opterećenja je tzv. prosečno vreme korišćenja energije isporučene kupcima. U formiranom modelu mreže modelovana su opterećenja koja odgovaraju nivou vrha TS 110/35/10 kV Topola iz tzv. proračunske 2016. godine koja odgovaraju karakterističnim režimima sa visokim vrednostima opterećenja na izvodima.

Analizom tokova snaga i naponskih prilika na izvodu Belosavci pri vršnom opterećenju napojne TS zaključeno je da su početne nadzemne deonice izvedene uže tom AIFe 50 mm² visoko opterećene i da se počevši od 5.4 km od izvorne TS 110/35/10 kV (od TS Marinkovići Krčevac) pojavljuje problem previsokog pada napona, iznad 10%. Najviši napon na izvodu je očekivano na napojnim sabirnicama koje su vezane za tercijer TS 110/35/10 kV Topola, koji pri vršnom opterećenju mreže iznosi 9.69 kV, dok je najviša zabeležena vrednost 9.99 kV pri minimalnom opterećenju mreže. Najniži napon na izvodu Belosavci je zabeležen pri vršnom opterećenju mreže na samom kraju izvoda u TS 10/0.4 kV Rajkovac i iznosi 8.58 kV, što predstavlja procentualni pad napona više

od 11%. Najviši napon u TS 10/0.4 kV Rajkovac zabeležen pri minimalnom opterećenju mreže iznosi 9.47 kV. Zbog same dužine izvoda, kao i zbog loših naponskih prilika generisani gubici aktivne snage iznose 172 kW, odnosno oko 9% ukupnog aktivnog opterećenja izvoda Belosavci.

Analiza predmetnog 10 kV izvoda nakon modelovanja sa regulatorom napona

Kao logičan predlog nameće se ugradnja regulacionog transformatora na lokaciji od koje počinju problemi sa naponskim prilikama. Takođe, takav odabir lokacije predlažu i proizvođači regulacionih transformatora. Analizirane su naponske prilike i gubici na izvodu Belosavci pri karakterističnim eksploatacionim vrednostima napona na tercijeru tronamotajnog transformatora u TS 110/35/10 kV Topola pre i nakon ugradnje automatskog regulacionog transformatora. Rezultati analize prikazani su u tabeli 2.

TABELA 2 - Rezultati analize dobijeni za različite vrednosti napona na početku izvoda

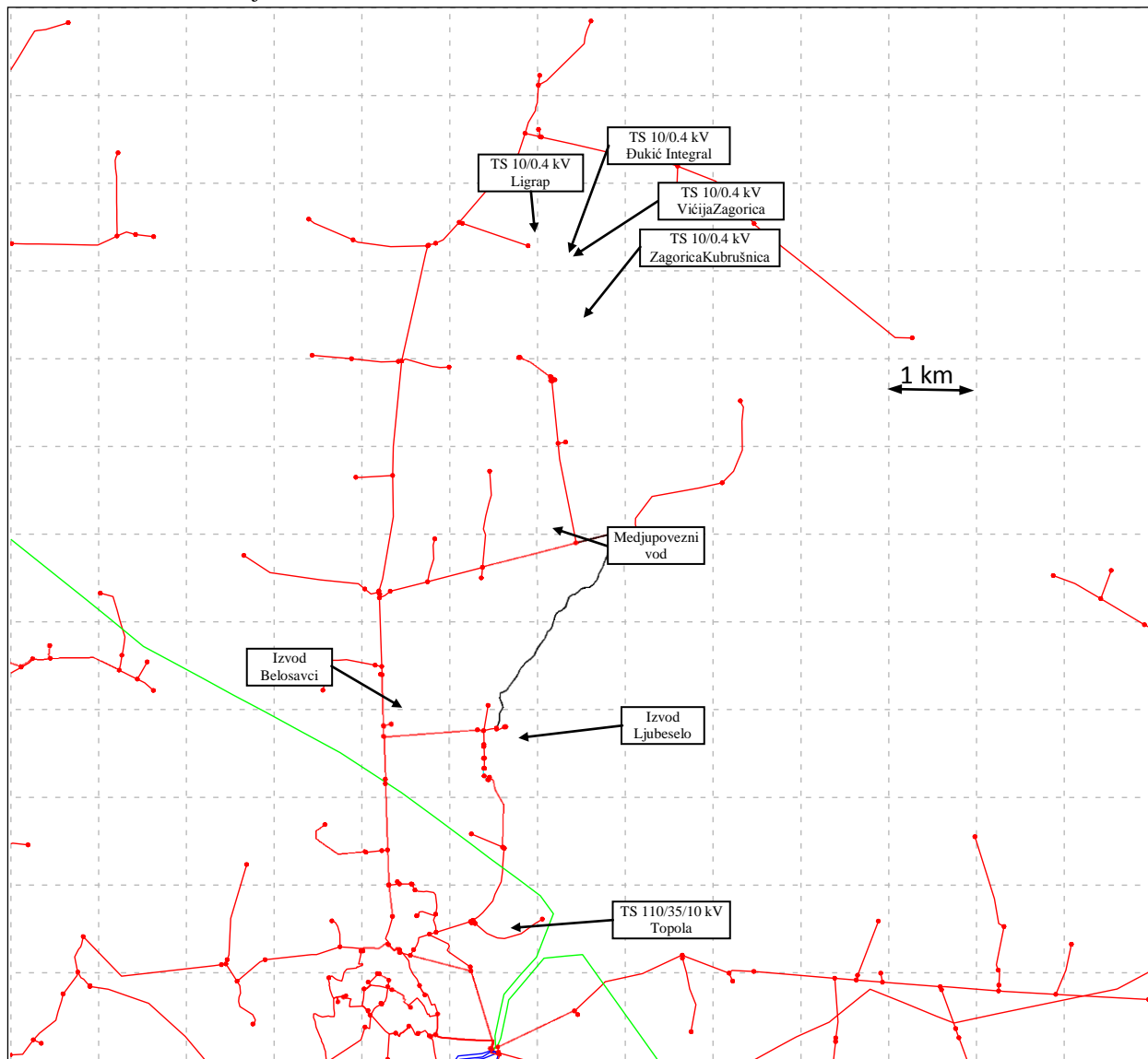
Napon na početku izvoda [kV]	Napon na mestu ugradnje regulatora napona (ne kontrolisana strana)	Napon na mestu ugradnje regulatora napona (kontrolisana strana)	Napon najudaljenije TS na izvodu pre ugradnje regulatora napona [kV]	Napon najudaljenije TS na izvodu nakon ugradnje regulatora napona [kV]	Gubici snage pre ugradnje regulatora napona [KW]	Gubici snage nakon ugradnje regulatora napona [KW]	Procenat gubiaka snage pre ugradnje regulatora napona	Procenat gubiaka snage nakon ugradnje regulatora napona	Procentualno smanjenje gubitaka
10.57	9.94	10.79	9.59	10.53	139	102	7.30%	5.32%	26.62%
10.24	9.58	10.39	9.21	10.04	150	110	7.82%	5.71%	26.67%
10	9.36	10.15	8.98	9.78	156	113	8.13%	5.89%	27.56%
9.91	9.22	9.99	8.84	9.62	163	119	8.41%	6.12%	26.99%
9.68	9	9.72	8.58	9.34	172	125	8.84%	6.44%	27.33%

Može se zaključiti da sa smanjenjem napona na početku izvoda (u napojnoj TS 110/35/10 kV) procenat gubitaka na izvodu raste. Već pri nominalnoj vrednosti napona na početku izvoda, napon na njegovom kraju je niži od dozvoljenog (pad napona veći od 10%). Ugradnjom regulacionog transformatora rešava se problem niskih napona na čitavom izvodu, čak i pri najnižem realnom naponu na tercijaru transformatora 110/35/10 kV u napojnoj TS. Ukupni procenat gubitaka na izvodu nakon ugradnje automatskog regulacionog transformatora je značajno opao (u proseku oko 26%). Naime, na deonicama izvoda iza regulacionog transformatora gubici na dalekovodima i distributivnim 10/0.4 kV transformatorima su se smanjili usled povećanja napona na istim, dok su gubici na deonicama ispred regulacionog transformatora ostali gotovo nepromenjeni. Treba naglasiti da sada u ukupnim gubicima na kompletnom izvodu učestvuju i gubici u bakru i gvožđu samog regulacionog transformatora, koji iznose u proseku oko (8 kW i 75 KVar).

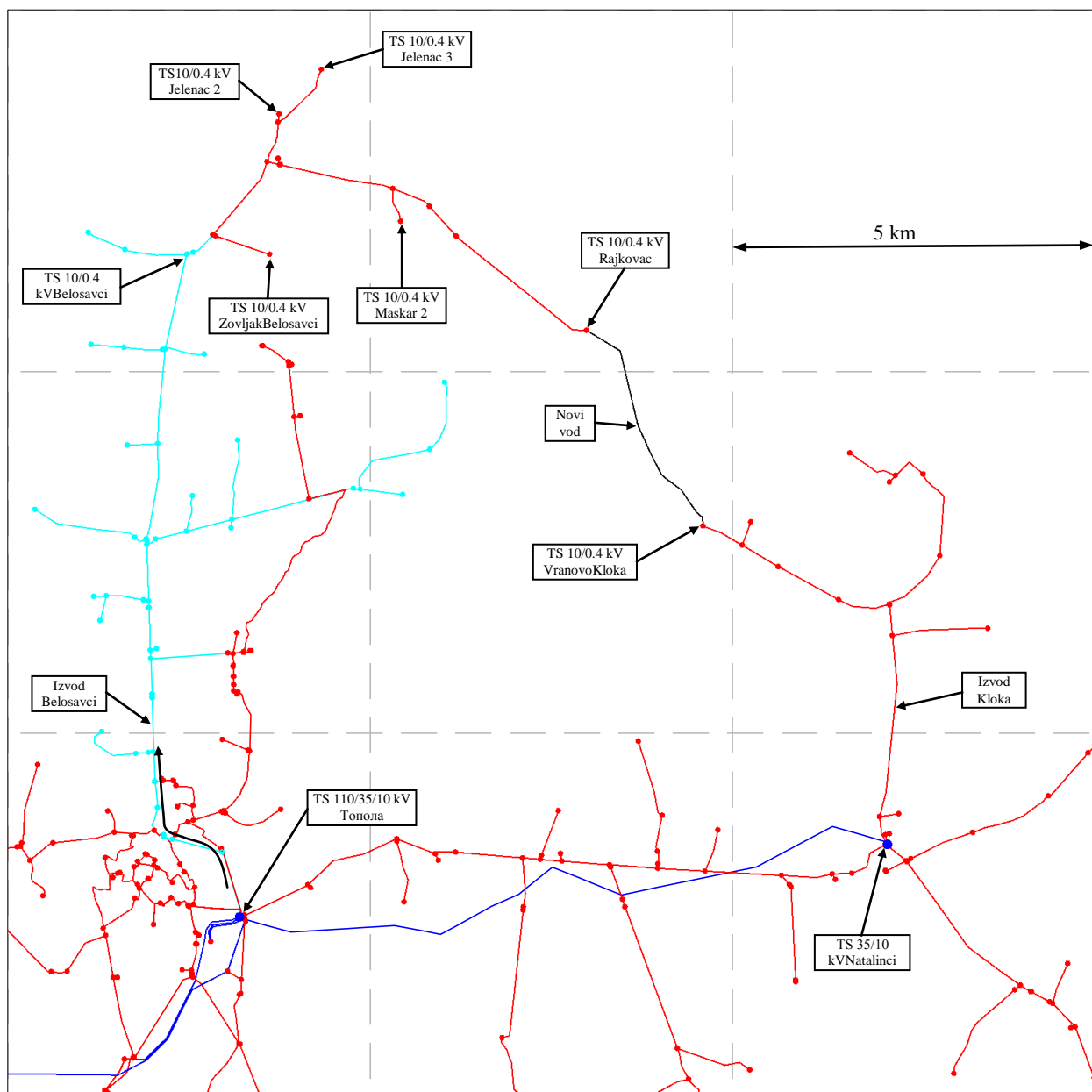
ANALIZA VIŠE RAZLIČITIH NAČINA REŠAVANJA PROBLEMA NISKOG NAPONA NA IZVODU BELOSAVCI

Prvo konvencionalno rešenje za loše naponske prilike na izvodu Belosavci je investicija u rekonstrukciju magistralnog izvoda Belosavci, što bi podrazumevalo povećanje preseka ugradnjom užeta preseka AlFe 70 mm² na dužini od oko 10.5 km (do TS 10/0.4 kV Kula Belosavci). Procenjena vrednost ovakve investicije bi iznosila oko 120 000 eura (zamena užeta, određenog broja stubova i izolacije). Drugo konvencionalno rešenje jeste izgradnja novog međupoveznog dalekovoda između izvoda Ljubesele i Belosavci (dužine oko 3.5 km), čime bi se omogućilo da izvod Ljubesele preuzme deo opterećenja izvoda Belosavci (TS 10/0.4 kV Đukić Integral, Vićija Zagoriaca i Zagorica Kubrušnica). Na opisan način realizovala bi se znatno ravnomernija raspodela opterećenja između dva pomenuta izvoda, što bi rešilo probleme visokog opterećenja početnih deonica i loših naponskih prilika izvoda Belosavci. Pomenuti međupovetzni vod prikazan je na slici 5. Procenjena vrednost ovakve investicije iznosila bi oko 95 000 eura. Treće konvencionalno rešenje bilo bi opremanje i puštanje u pogon TS 35/10 kV Natalinci, (koje trenutno radi kao RP 10 kV), izgradnja novog poveznog voda TS 10/0.4 kV Kloka- TS 10/0.4 kV Rajkovac u dužini od 3.4 km. Ovo rešenje prikazano je na slici 6. Procenjena vrednost

ovakve investitije bi iznosila oko 238 000 eura.



SLIKA 5 - Prikaz medjupoveznog voda izmedju izvoda Belosavci i Ljubesele



SLIKA 6 - Prikaz povezivanja izvoda Belosavci na napajanje sa TS 35/10kV Natalinci

Poređenje više načina rešavanja problema loših naponskih prilika na izvodu Belosavci prikazano je u tabeli 3.

TABELA 3 - Poređenje više načina rešavanja problema loših naponskih prilika na izvodu Belosavci

r.br.	Rešenje	Okvirne Cene (EUR)	Prednosti	Nedostaci
1	Ugradnjom regulacionih autotransformatora	30.000,00	<ul style="list-style-type: none"> - Brza i jednostavna montaža - Mali prostor zauzimanja nakon montaže (stub, tlo) -Jednostavnija procedura ispunjavanja uslova za gradnju - Mogućnost promene lokacije -Mogućnost daljinskog nadzora i upravljanja -Cena 	<ul style="list-style-type: none"> -Ograničenje nominalnom snagom, ulaznim naponom -Redovnost održavanja - Ne omogućava ispunjenost uslova „n-1”

2	Rekonstrukcijom magistralnog izvoda	120.000,00	-Povećanje prenosnog kapaciteta izvoda -U analiziranom slučaju dolazi do smanjenja gubitaka	-Ispunjavanje uslova za gradnju (rešavanje imovinsko pravnih odnosa) - Neomogućava ispunjenost uslova „n-1”
3	Izgradnjom novog međupoveznog voda između izvoda Ljubesele i Belosavci	95.000,00	- Smanjenje gubitaka -Ispunjavanje uslova „n-1”, za delove izvoda Belosavci i Ljubesele	-Ispunjavanje uslova za gradnju (rešavanje imovinsko pravnih odnosa) -Smanjenje kapaciteta izvoda Ljubesele koji napaja severnu industrijsku zonu Topole.
4	Prelazak RP Natalinci u TS 35/10 kV Natalinci i izgradnja međupoveznog 10 kV voda TS 10/0.4 kV Kloka-10/0.4 kVRajkovac	238.000,00	-Smanjenje gubitaka -Ispunjavanje uslova „n-1”, za kompletne izvode Belosavci i Kloka	-Ispunjavanje uslova za gradnju -Cena

ZAKLJUČAK

Ugradnja regulacionih autotransformatora je zasigurno jedno od rešenja za brzu popravku loših naponskih prilika na sredjenaponskim vodovima. Svaka pojava loših naponskih prilika na sredjenaponskim izvodima ima svoje specifičnosti. Zaključak je da je u cilju rešavanja problema neophodno izvršiti detaljnu analizu, locirati uzrok, pronaći više rešenja, uporediti ih u smislu prednosti, nedostataka i cena i odabrati najpovoljnije. Ugradnja regulacionih autotransformatora je jednostavno i brzo izvodljivo rešenje, ali takođe i ograničeno ulaznim naponom i snagom. Procentualni gubici koji se generišu na kompletnom izvodu nakon ugradnje regulacionog autotransformatora u pojedinim slučajevima mogu biti i veći nego pre ugradnje regulatora napona, to pre svega zavisi od opterećenja (niže vrednosti opterećenja) i gubitaka koje generiše sam uređaj.

LITERATURA

1. “Zakon o energetici Republike Srbije”, “Sl. Glasnik RS, br. 145/2014”
2. “Pravila o radu distributivnog sistema električne energije”, “Sl. Glasnik RS, br. 71/2017”
3. “Zakon o efikasnom korišćenju električne energije”, “Sl. Glasnik RS, br. 25/2013”
4. Pavlović P, Belić I, Minić S, 2016, “Analiza promene gubitaka aktivne i reaktivne snage sa promenom napona na konzumu elektrodistributivne mreže velika plana sa implementiranim statičkim karakteristikama opterećenja u modelu mreže”, “CIGRE Serbia 2016”, R C2 08
5. Petranović D, Kotoran-Munda M, Pečvarac D, Janjić D, “Projekt ugradnje regulatora napona”, “CIRED Croatia 2010”, SO2 – 01
6. H. L. Willis, 1997, “Power distribution planning reference book”, “Marcel Dekker”