

MODELI REGULACIJE NAPONA U KLASIČNIM DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA SA GENERATORIMA

Zoran SIMENDIĆ¹, ODS "EPS DISTRIBUCIJA" d.o.o. Beograd, Ogranak Elektrodistribucija Sombor, Srbija
Goran Švenda, Fakultet tehničkih nauka, Institut za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Novi Sad, Srbija
Vidoje Mijatović, ODS "EPS DISTRIBUCIJA" d.o.o. Beograd, Ogranak Elektrodistribucija Sombor, Srbija
Predrag Bajčetić, ODS "EPS DISTRIBUCIJA" d.o.o. Beograd, Ogranak Elektrodistribucija Sombor, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U klasičnim distributivnim mrežama (DM), uobičajeno jedini uređaj za regulaciju napona (RN) u realnom vremenu, jeste regulacioni transformator (RTr) sa regulacijom pod opterećenjem i ugrađenim automatskim regulatorom napona (ARN) – klasična regulacija napona (KRN). Praktično, takva KRN se zasniva na unapred definisanom zakonu regulacije i aktuelnom odnosu izmerenih vrednosti modula napona i struje na sekundaru RTr. Jedan od osnovnih preduslova za njen korektan rad jeste da je smer tokova snaga od korena DM ka njenim potrošačima, odnosno da je DM pasivna. Usled sve veće distribuirane proizvodnje električne energije, putem distributivnih generatora (DG), tradicionalno pasivne DM postaju sve više aktivne DM. U aktivnim DM merenje modula struje na sekundaru RTr nije jednako opterećenju DM. U skladu sa tim primenom KRN donose se odluke na osnovu pogrešnih informacija (lažne slike o opterećenju DM), čime je onemogućena kvalitetna procena optimalne vrednosti napona na sekundaru RTr, odnosno onemogućen je njen kvalitetan rad. Potpuna zamena KRN, sa nekom novom RN, zahteva potpunu izmenu koncepta RN, velike investicije u DM i dugotrajnu praktičnu realizaciju. Zato se u ovom radu, u cilju rešavanja navedenog problema, RN u DM sa DG, razmatraju mogućnosti prilagođenja postojeće KRN. Tri modela modifikovane KRN u DM sa DG i mogućnosti njihove primene upoređeni su sa mogućnostima danas primenjene KRN. Njihova praktična verifikacija izvršena je na primeru RN realne DM ED Sombor sa tri vetro elektrane.

Ključne reči: Distributivna mreža, Distributivni generatori, Regulacija napona, Regulacioni transformator sa regulacijom pod opterećenjem, Automatski regulator napona, Klasična regulacija napona.

SUMMARY

In ordinary Distribution Networks (DN), the only device used for voltage regulation in a real time, is Under Load Tap Changing Transformer (CTr) and having Automated Voltage Regulator (AVR) incorporated. This is so called Classic Voltage Regulation (CVR). It is based on a control algorithm which takes actual ratio of the measured voltage and current values on a secondary of CTr, as a referent value. One of the basic preconditions for CVR to be reliable is that there is "one way flow of the energy" (from the Source side of the DN to the Users side of DN), b.o.w. that DN is passive. Due to rapid increase of Distributed Generation (DG), traditionally "passive" Distribution Networks (DN) are getting "active" Distribution Networks. For the "active" DN's measured current value on CTr's secondary does not correspond to the load of DN. It means, by applying CVR we get output based on wrong input (wrong DN load value) and, as a consequence, it is not possible to do reliable prediction considering both, loading of DN and optimum voltage value on secondary of CTr. Complete replacement of CVR by any other type of VR means its new concept, including investment into DM's and longterm implementation. That is why this article, aiming to solve above mentioned problem, is dealing with possibility to modify and adapt existing CVR solutions. Three of such modified CVR models in Distribution Networks (DN) with Distributed Generation (DG) are compared with nowadays existing CVR's. Their evaluation in a real working conditions has been conducted in ED Sombor DN having three Wind Turbines as a Distributed Generation source.

Keywords: Distribution System, Distribution generator, Voltage Control, Under-Load Tap-Changing Transformer, Automatic Voltage Regulator, Classic Voltage Regulation.

¹ Z. Simendić, "EPS DISTRIBUCIJA" d.o.o. Beograd, Ogranak Elektrodistribucija Sombor, 25000 Sombor, Apatinski put b.b., e-mail: zoran.simendic@epsdistribucija.rs, tel 025 482933, faks 025 429399.

UVOD

Razvojem privrede raste potrošnja električnom energijom. U cilju zaštite životne sredine, nedostatak električne energije se sve više nadoknađuje izgradnjom obnovljivih izvora električne energije blizu samih potrošača. Prateći svetske trendove, poslednjih godina i u Srbiji intenzivno raste broj DG priključenih u DM. Njihovim priključenjem tradicionalno pasivne DM postale su aktivne DM, što ima direktan uticaj na promenu tokova snaga, vrednosti struja kratkih spojeva, kvalitet električne energije, itd. U takvim okolnostima ugrožena je pouzdanost i efikasnost široko primenjenih klasičnih postupaka za RN, rad i koordinaciju relejne zaštite, restauraciju napajanja nakon kvara, planiranje distributivnih kompanija, itd. (1). U skladu sa tim, distributivne kompanije moraju da se prilagode i/ili u potpunosti promene klasične principe u svim oblastima svog delovanja. Od interesa za razmatranja u ovom radu jeste uticaj DG na rad klasične automatske regulacije napona (KRN) u DM.

U Srbiji je KRN realizovana na principu kompenzacije pada napona na jedinstvenom vodu (2,3). Jedini uređaji za RN su ARN koji upravljaju RTr sa regulacijom pod opterećenjem. Pritom, zakon regulacije se formira na osnovu samo dve vrednosti: minimalnog i maksimalnog režima dela DM koji se napaja sa sekundara RTr. Praktična primena KRN se zasniva na velikom broju aproksimacija (3):

- zanemarena je prostorna i vremenska raspodela opterećenja (složena DM i svi potrošači ekvivalentirani su jedinstvenim vodom i jedinstvenim potrošačem);
- zanemaren je uticaj RTr s regulacijom u beznaponskom stanju (npr. Tr SN_1/SN_2 i Tr SN/NN);
- kruta karakteristika zakon regulacije je formirana obradom samo dva režima (s minimalnim i maksimalnim opterećenjem);
- kontrola (minimizacija) odstupanja napona od optimalnih vrednosti se vrši posredno, a ne neposredno.

Pritom, u potpunosti je zanemaren je uticaj DG koji svojom proizvodnjom direktno utiču na vrednost modula struje na sekundaru RTr. Posledica je da je primenom KRN, na osnovu lažne slike o opterećenju DM, onemogućen kvalitetan izbor optimalnih vrednosti napona na sabirnicama sekundaru RTr. Ovaj, više nego aktuelan problem RN aktivnih DM, višestruko je razmatran u literaturi. Neke od ponuđenih metoda zasnovane su na: modifikaciji postojećih ARN i RTr (4,5); regulaciji faktora snage (6,7); kontrolerima za koordinaciju akcija RTr i razmene reaktivne snage između DG i izvoda (8).

Nakon uvoda, u drugom delu rada je prikazan problem KRN kada u DM je priključen generator. U trećem delu ukratko je prikazan matematički model modifikovane KRN. Modeli modifikovane KRN su opisani u četvrtom delu. U petom delu, prikazane su mogućnosti njihove primene na delu realne DM ED Sombor sa tri vetro generatora, transformatorska stanica (TS) 110/20 "Kula". Zaključak rada i korišćena literatura date su u šestom i sedmom delu rada.

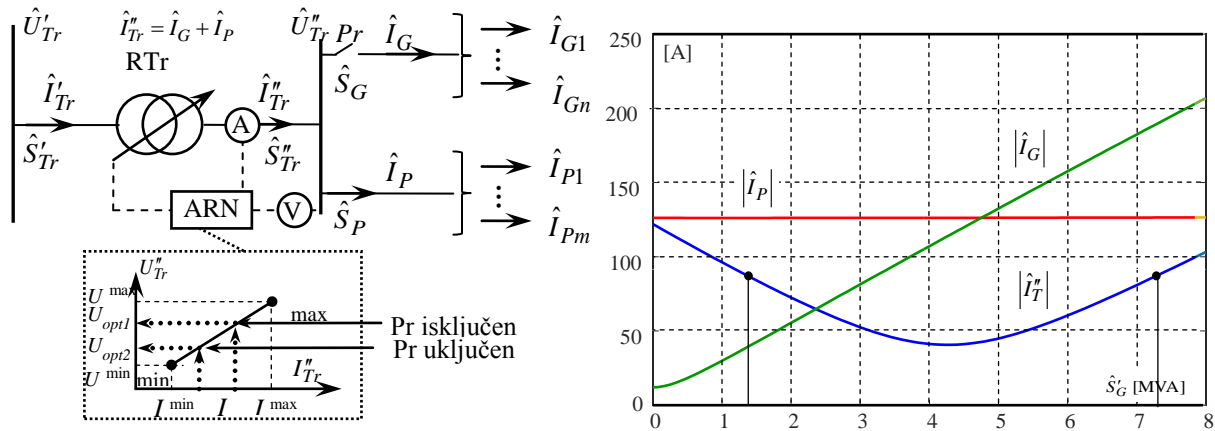
PROBLEM KLASIČNE REGULACIJE NAPONA

Postavka problema RN aktivnih DM izvršena je na primeru jednostavne DM sa više izvoda, slika 1. RN se vrši putem RTr sa ARN, preko kojeg se reguliše napona na njegovim SN sabirnicama. Na SN sabirnice je priključen DG putem SN izvoda na čijem se početku nalazi prekidač. KRN se bazira na principu kompenzacije pada napona na jedinstvenom vodu. Ona se praktično realizuje na osnovu lokalnih informacija o naponu i struji na sekundaru RTr. Jedini cilj takve regulacije je održavanje napona u čitavoj DM unutar tehničkih granica, odnosno da obezbedi napon na sekundarnoj strani RTr (\hat{U}_{Tr}^n), za koji će napon u krajnjoj tački DM imati unapred specificiran, konstantnu vrednost. Ta vrednost ne zavisi kako

od varijacije opterećenja (\hat{I}_{Tr}^n) tako i od vrednosti napona na visokonaponskim (VN) sabirnicama RTr. Kada je DG u pogonu, odnosno prekidač Pr je uključen, tada elektrana utiče na napon u krajnjoj tački DM.

KRN je bazirana samo na dva karakteristična režima DM, režima sa minimalnim i maksimalnim opterećenjem. Posledica je da naponi realizovani za režime koji su između dva karakteristična režima odstupaju od vrednosti optimalnih napona. Kako se karakteristični režimi veoma retko dešavaju sledi da se u DM veoma retko ostvaruju kvalitetne naponske prilike (10,11).

Za istu potrošnju DM, kada generator ne proizvodi električnu energiju (Pr isključen) napon na sekundaru RTr je U_{opt1} . Kada generator proizvodi električnu energiju napon je manji i iznosi U_{opt2} . Zbog različite snage vetra, vetro generator injektira različite vrednosti snaga i time čini RN složenijom. Na slici 2 je prikazana promena vrednosti modula struje na sekundaru RTr, na početku grane sa generatorom i početku grane sa potrošačem, usled promene proizvodnje aktivne snage DG. Ako je opterećenje DM konstantno, a aktivna snage DG se menja od najmanje do najveće vrednosti, modul struje na sekundaru RTr se smanjuje do neke vrednosti, a zatim počinje rasti (12).



SLIKA 1 – KOMPENZACIJE PADA NAPONA DM SA DG SLIKA 2 – PROMENE VREDNOSTI STRUJA DM

Uočava se da u aktivnim DM modul struje na sekundaru RTr nije jednak opterećenju DM. Najveći problem RN aktivnih DM kako da se kvalitetno obuhvate režimi od maksimalne potrošnje DM bez proizvodnje DG do minimalne potrošnjom sa maksimalnom proizvodnjom DG. Najteži problemi nastaju kod režima DM u kojima je ostvarena potrošnja DM i proizvodnja DG međusobno bliske (na slici 2 proizvodnja oko 3,7 MVA). U takvim režimima, usled lažne slike o opterećenju, KRN ne može korektno da deluje. Manji problem je kad se maksimalnoj proizvodnji DG električna energija isporučuje u Elektromrežu Srbije (EMS). Na slici 2 se uočava da KRN to ne prepoznaje i u tom slučaju se ponaša isto kao da EMS isporučuje električnu energiju Operatoru distributivnog sistema (ODS).

MATEMATIČKI MODEL MODIFIKOVANE KRN

U cilju formiranja modela modifikovane KRN svi izvodi jednostavne DM, prikazane na slici 1, predstavljeni su samo sa dve ekvivalentne grane. Prva, ekvivalentna grana, grana sa generatorom, predstavlja n izvoda koji aktivnu snagu injektiraju u SN sabirnice. Druga, ekvivalentna grana, grana sa potrošačima, predstavlja m izvoda koji aktivnu snagu preuzimaju sa SN sabirnica. Pritom, smatra se da, u literaturi često razmatran problem, RTr koji napaja jedan izvod na čijem kraju se nalazi i potrošnja i DG nije tako kritičan kao primer DM sa dve grane od kojih je jedna samo sa potrošačem i jedna samo sa DG. Dakle, smatra se da su izvodi na kojima postoje i potrošači i DG obuhvaćeni sa prethodna dva granična tipa izvoda (12). Napomena: na izvodima koji istovremeno imaju proizvodnju i potrošnju, naponske prilike će biti bolje nego na izvodima samo sa tom potrošnjom, ili samo sa tim DG.

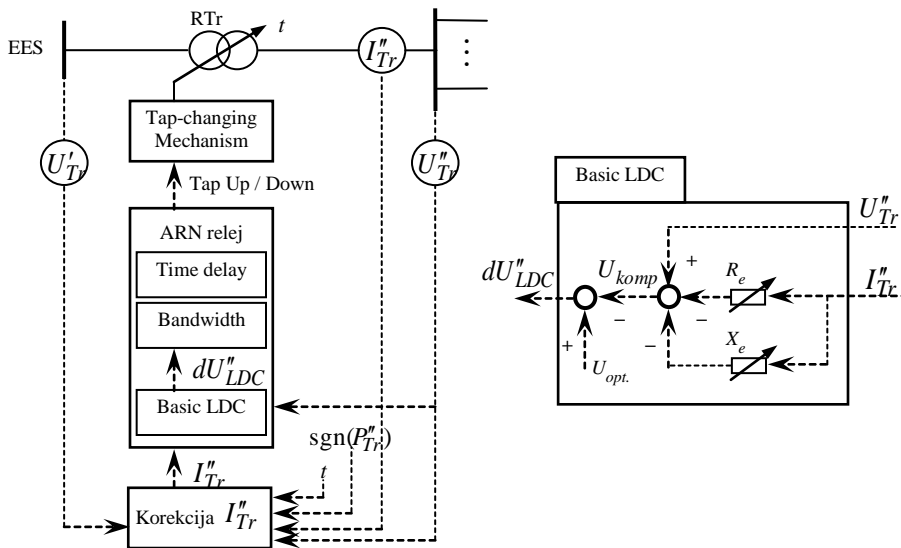
U klasičnim DM, parametri KRN (ARN i zakon regulacije) podešeni su pre instalacije DG. Samim tim pri izboru njenih parametara zanemaren je uticaj DG, tako da KRN korektno radi samo kada je DG isključen. Postavlja se pitanje da li KRN sa postojećim podešenjem, uz minimalne investicije, može da se iskoristi za RN svih mogućih režima aktivne DM, npr. kada DG ne radi, kada je njegova proizvodnja maksimalna, odnosno kada je jednaka potrošnji DM. Detaljan prikaz matematičkog modela je dat u radu (12).

Blok dijagram modifikovane KRN

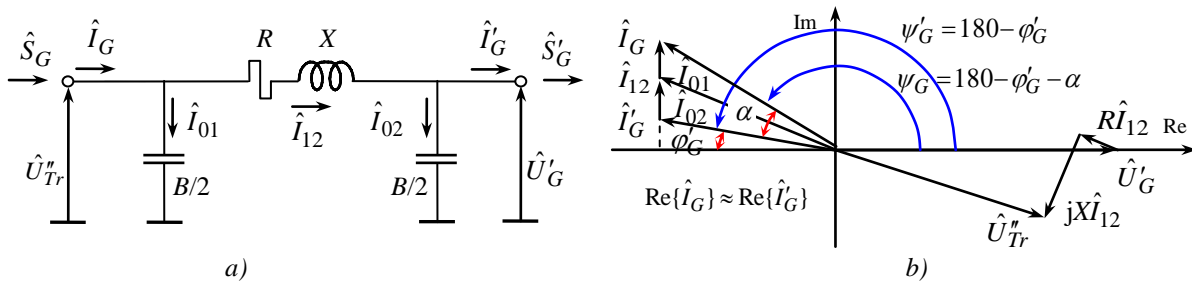
Modifikovana KRN zasniva se na korekciji vrednosti modula struje I''_{Tr} sa sekundara RTr. Za njenu korekciju potrebne su aktuelne vrednosti modula napona sa primara i sekundara RTr, modula struje sa sekundara RTr, pozicije regulacione sklopke t i smer aktivne snage kroz RTr. Blok dijagram modifikovane KRN prikazan je na slici 3.

Procena režima grane sa generatorom

Razmatra se izvod sa generatorom prikazan na slici 1. Potrebno je, na osnovu unapred definisane vrednosti faktora snage generatora $\cos(\varphi_G) \approx 1$ i izmerenih vrednosti modula struje I_G i napona U''_{Tr} na početku izvoda, proceniti njegov režim. Fazori struja i napona razmatranog izvoda prikazani su na slici 4b.



SLIKA 3 – BLOK DIJAGRAM SISTEMA MODIFIKOVANE KRN



Slika 4 – Izvod sa DG: a) ekvivalentna šema i b) vektorski dijagram fazora struja i napona

Na osnovu aproksimacije $\hat{U}''_{Tr} \approx \hat{U}'_G = U''_{Tr} \angle 0^\circ$, sledi:

$$\hat{I}_{01} \approx \hat{I}_{02} = I_0 \angle 90^\circ = j0.5 B U''_{Tr} . \quad (1)$$

Na osnovu jednakosti (1) i vektorskog dijagrama struja, slika 4b, sledi jednakost realnih delova fazora struja sa početka i kraja izvoda:

$$\text{Re}\{\hat{I}_G\} \approx \text{Re}\{\hat{I}'_G\} \Rightarrow I_G \cos(180 - \phi'_G - \alpha) \approx I'_G \cos(180 - \phi'_G) \Rightarrow -I_G \cdot \cos(\phi'_G + \alpha) \approx -I'_G \cdot \cos \phi'_G . \quad (2)$$

Na osnovu kosinusne teoreme, trigonometrijske smene i činjenice da struja sa početka izvoda prednjači u odnosu na struju sa njegovog kraja, može se odrediti vrednost ugla α :

$$\alpha = \arcsin \left| \frac{B U''_{Tr}}{I_G} \cos \phi'_G \right| . \quad (3)$$

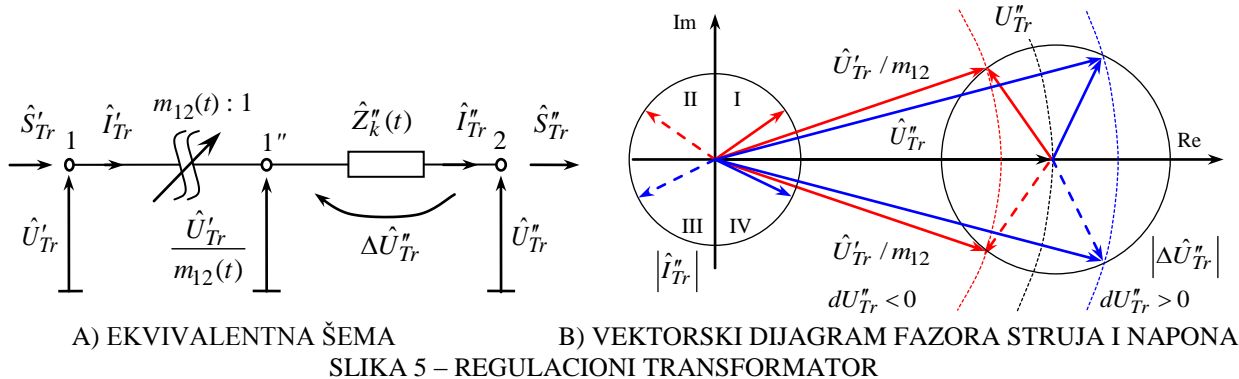
Konačno, za izračunatu vrednost ugla α i izmerenu vrednost modula struje na početku izvoda sa DG, definisana je i njena kompleksna vrednost:

$$\hat{I}_G = -I_G \cos(\phi'_G + \alpha) + j I_G \sin(\phi'_G + \alpha) . \quad (4)$$

Sumiranjem struja n izvoda sa DG, dobija se fazor struje ekvivalentne grana sa DG.

Procena režima regulacionog transformatora

Potrebno je, na osnovu izmerenih vrednosti modula struje na sekundaru I''_{Tr} i modula napona na sabirnicama primara U'_Tr i sekundara U''_{Tr} , proceniti režim RTr. Dve moguće varijante fazora struja i napona prikazane su na slici 5.b: 1) kada je vrednost modula napona primara, svedena na sekundar, veća od vrednosti modula napona koja je izmerena na sekundaru – vrednosti naznačene plavom bojom i 2) obrnuto – vrednosti naznačene crvenom bojom.



Vrednosti fazora i realnog dela pada napona i razlika modula fazora napona, svedene na sekundar RTr su:

$$\Delta \hat{U}_{Tr}'' = \hat{Z}_k'' \cdot \hat{I}_{Tr}'' = X_k'' \cdot I_{Tr}'' \angle (90^\circ + \psi_{Tr}'') , \quad (5)$$

$$\text{Re}\{\Delta \hat{U}_{Tr}''\} = X_k'' \cdot I_{Tr}'' \cdot \cos(90^\circ + \psi_{Tr}'') , \quad (6)$$

$$\frac{U_{Tr}'}{m_{12}(t)} - U_{Tr}'' = dU_{Tr}'' \approx \text{Re}\{\Delta \hat{U}_{Tr}''\} . \quad (7)$$

Na osnovu prethodnog izraza moguće su sledeće vrednosti ugla fazora struje na sekundaru RTr:

$$\psi_{Tr}'' = -90^\circ \pm \arccos \left[\frac{dU_{Tr}''}{X_{Tr}'' \cdot I_{Tr}''} \right] . \quad (8)$$

U skladu sa slikom 5b i izrazom 8, i za pozitivnu i za negativnu vrednost pada napona, postoje po dva matematički korektna rešenja. Odnosno matematički, postoje dve kompleksne vrednosti struje na sekundaru RTr za koje mogu da se usklade izmerene vrednosti modula napona sa krajeva RTr. Potrebno je uočiti da za procenu kompleksnog predstavnika struje RTr nisu potrebne vrednosti aktivne i reaktivne snage, kao i smer reaktivne snage. Potrebna je samo informacije o smeru P na sekundaru RTr. Ako je smer aktivne snage P poznat, konačno rešenje jednoznačno definisano. U tabeli 1 je prikazano koji se koristi predznak u formuli 11, odnosno četiri moguća rešenja izraza 8.

TABELA 1 – ČETIRI MOGUĆA REŠENJA VREDNOSTI STRUJE SEKUNDARA RTr

	Određivanje predznaka u formuli ψ_{Tr}''				predznak	$dU_{Tr}'' > 0$	$dU_{Tr}'' < 0$
	Smer energije od primara ka sekundaru		Smer energije od sekundara ka primaru				
	P	Q	P	Q			
1.	da	da			+	da	
2.	da			da	+		da
3.		da	da		-	da	
4.		da	da		-		da

Sličan postupak, može da se realizuje i ako je poznat fazni stav između fazora napona i struje na sekundaru RTr (npr. raspolaže se sa mikroprocesorskom zaštitom).

Procena potrošnje potrošača:

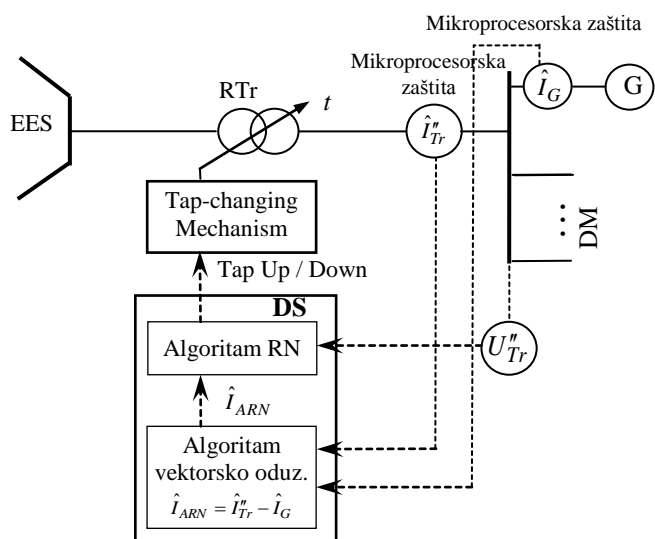
Na osnovu poznatih kompleksnih vrednosti fazora struja na sekundaru RTr i početku ekvivalentne grane sa DG jednostavno je odrediti fazor struje na početku ekvivalentne grane potrošnje:

$$\hat{I}_P = \hat{I}_{Tr}'' - \hat{I}_G . \quad (9)$$

Konačno, za korektan rad KRN sa ugrađenim ARN, sa zakonom regulacije koji je podešen bez uticaja DG, ARN treba da se proslediti sledeća vrednost modula struje:

$$I_{ARN} = \{ [I_{Tr}'' \cos \psi_{Tr}'' + I_G \cos(\phi_G' + \alpha)]^2 + [I_{Tr}'' \sin \psi_{Tr}'' - I_G \sin(\phi_G' + \alpha)]^2 \}^{1/2} . \quad (10)$$

Model 3 - Modifikovana KRN putem PLC algoritma i merenim vrednostima iz mikroprocesorskih zaštita



SLIKA 8 –MODEL 3

Današnje TS 110/x kV su većinom opremljene sa mikroprocesorskim zaštitama koje raspolažu vrednostima modula struja i uglova u odnosu na napon. Na slici 8 je prikazan model 3 RN koji je sličan kao u prethodnom poglavlju ali sada umesto algoritma za korekciju struje \hat{I}_{Tr}'' , imamo algoritam za vektorsko oduzimanje vrednosti struje sekundara RTr i struje izvoda na kojoj se nalazi generator. Na slici 10 su prikazana tri momenta vektorskog oduzimanja struja. Rezultat je struja koja ulazi u algoritam RN, odnosno predstavlja struju opterećenja DM. Znači, umesto postojećeg ARN koji se stavlja van funkcije, RN vodi algoritam RN.

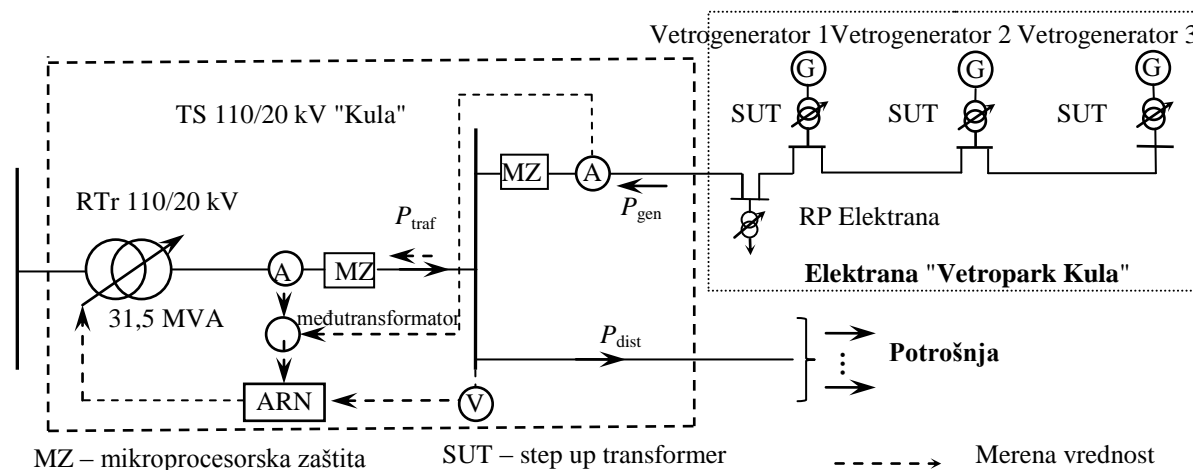
VERIFIKACIJA REGULACIJA NAPONA

Napojna TS "Kula", 110/20 kV/kV snabdeva DM preko jednog RTPO 31,5 MVA čiji odnos transformacije iznosi $(110 \pm 10 \times 1,6\%) / 21$ kV/kV (slika 9). RTr je snabdeven sa ARN tipa REG5A (16). DM napaja mesto Kulu sa okolnim naseljima Ruskim Krsturom i Liparom putem devet srednjenaponskih izvoda. DM se sastoji od 92 distributivne TS, odnosno 9.111 potrošača. TS je nadgledana i upravljana sa SCADA sistemom VIEW 2.

Napojna TS "Kula", 110/20 kV/kV snabdeva DM preko

Elektrana "Vetropark Kula" kod Kule je priključena na SN izvodnu mernu ćeliju u TS "Kula" putem SN kablova dužine 6,46 km. Na slici 9 je prikazana elektrana "Vetropark Kula" kod Kule koja se sastoji se od tri vetroturbine i tri generatora koji vrše konverziju mehaničke energije vetra u električnu energiju.

U julu 2018. godine je u TS 110/20 "Kula" je postavljen međutransformator. U toku eksperimenata snimani su sledeći podaci. Putem memorijskih registratora električnih veličina napona i struja su mereni moduli struja sekundara strujnih transformatora na sekundaru RTr i izvodu sa DG, kao i zbirna struja koja ulazi u ARN. Na sekundaru RTr ugrađena je mikroprocesorska zaštita čiji se podaci skidaju daljinski, kao i podaci sa SCADA. U dve TS 20/0,4 kV postavljana su dva kontrolna, dubinska merenja (memorijski registratori električnih veličina napona i struja). TS 20/0,4 kV "O.Gabor" je najbliža TS 110/20 "Kula", a TS 20/0,4 kV "Travnička" najudaljenija.



SLIKA 9 – PODRUČJE TS KULA SA ELEKTRANOM "VETROPARK KULA"

Mogućnosti modifikovane KRN sa međutransformatorom (Model 1) prikazan je za dan 15.08.2018. godine, slika 10. Na slici 10a prikazana je promena vrednosti napona na 110 kV sabirnicama. Promena vrednost napona na SN sabirnicama, koje su ostvarene na osnovu Modela 1, a vrednosti napona koje bi bile putem KRN su dobijene na osnovu krive RN i vrednosti struja na sekundaru RTr, slika 10b. Promene vrednosti SN struja prikazane su na slici 10c: puna plava linija – izmerene vrednosti na sekundaru RTr, crvena linija – izmerene vrednosti struje grane sa DG i crna linija – izmerene

vrednosti struje sa sekundara međutransformatora, odnosno struje ukupne potrošnje. Promena vrednosti aktivnih snaga prikazana je na slici 10d u istim bojama kao prikazane SN struje. Najveća proizvedena snaga DG ostvarena je tokom jutarnjih časova. Zbog male potrošnje DM u tom periodu, deo aktivne snage je iz ODS injektiran u EMS. Ostvarene pozicije regulacione sklopke t prikazane su na slici 10e. Na slici 10f prikazane su izmerene vrednosti napona na NN sabirnicama u u najbližoj TS 20/0,4 kV "Travnička" i u najudaljenijoj TS 20/0,4 kV "O.Gabor". Na osnovu prikazanih dijagrama može se uočiti sledeće:

- u periodu od 00:41 do 01:30 i od 01:55 do 02:13 sata električna energija se isporučivala u EMS slika 10d. Vetrogeneratori su isporučivali do 2,93 MW više električne energije od potrošnje DM i pozicija regulacione sklopke je bila na 9. Zbog vrednosti napona na 110 kV nivou od 116,5 kV, naponi na SN nivou su bili u okviru opsega zadate krive regulacije za taj nivo potrošnje DM.
- SN napon se kretao od 20,45 do 21,4 kV ali u okviru krive RN.
- Od 11 do 19 sati uočava se veće variranje struje generatora i do 30 A u dve minute što je osetljivost ARN.
- Na slici 10e je prikazano kretanje pozicije regulacione sklopke. Bilo je samo tri promene pozicije.
- Na slici 10f je prikazano kretanje napona u dve TS 20/0,4 kV. Priključenjem međutransformatora variranje napona tokom dana je do 13 V i ono je u okviru zakonske regulative. U najbližoj TS "Kula" naponi su dostizali vrednosti od 245 V. Brze promene struje od 30A na vetrogeneratoru nisu značajnije uticale na promenu napona kod potrošača. Zbog podignute i skoro položene krive ARN u odnosu na prethodni period (17), više nema niskih vrednosti napona ali su naponi kod niskonaponskih potrošača u blizini TS 110/20 kV "Kula" kreću i do 245 V.

U tabeli 2 su prikazane vrednosti napona na TS putem modela 1 koji je vodio RN. Naponi koji bi bili da je RN vodio KRN su računati. Da je VN napon imao vrednost 113 kV na najudaljenijoj TS napon bi imao vrednost 205 V. Pri vrednostima napona od 116 kV minimalni napon bi bio 220 V. Pošto su struje u modelima 2 i 3 skoro iste onda su i vrednosti napona iste. Zaključak je da problem u naponu pri KRN nastupa zbog više stvari: niskog napona u 110 kV mreži i kada je proizvodnja DG približno ista potrošni DM.

TABELA 2 – POKAZATELJI REGULACIJE NAPONA

Vrsta RN	Realizacija	Najbliža TS		Najudaljenija TS	
		U_{min}	U_{max}	U_{min}	U_{max}
		V	V	V	V
KRN	simulirano	216	245	210	240
Model 1	vodio RN	234	245	224	240
Model 2	simulirano	234	245	224	240
Model 3	simulirano	234	244	224	240

Kvalitet rezultata kvantifikovan je vrednostima srednjeg apsolutnog i srednjeg procentualnog odstupanja modifikovanih vrednosti struja sekundara RTr druge i treće metode u odnosu na izmerenu vrednost prve metode:

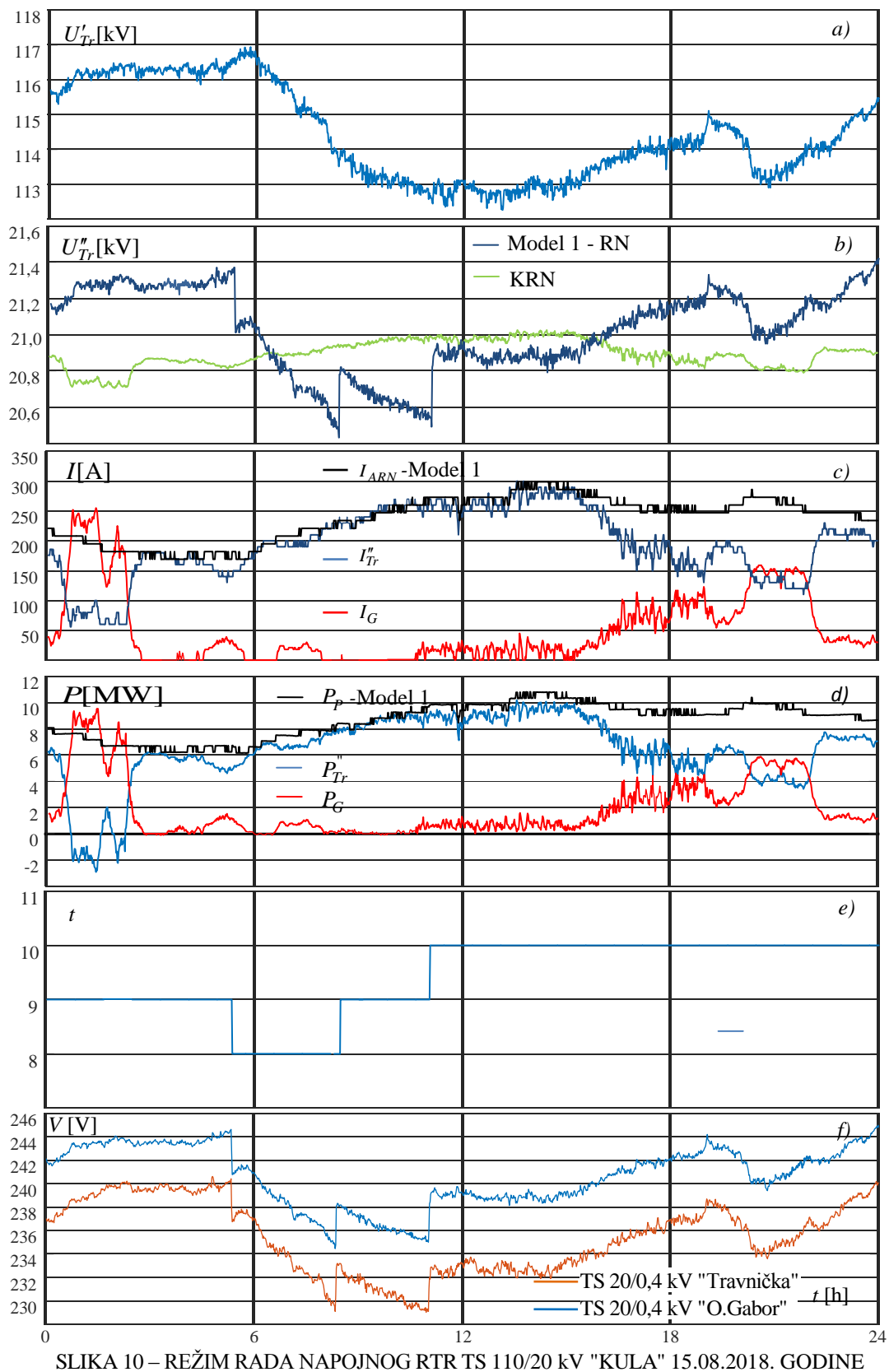
$$- \Delta I_{sr} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m |I_{\alpha_j} - I_{\beta_j}|, \quad \Delta I_{\%} = \frac{100}{m} \sum_{j=1}^m \frac{|I_{\alpha_j} - I_{\beta_j}|}{I_{\alpha_j}} [\%], \quad \alpha \in \{\text{Model 1}\} \text{ i } \beta \in \{\text{Model 2, Model 3}\}, \quad (11)$$

gde je m broj jednogminutnih merenja.

U tabeli 3 se uočava da su male razlike u vrednostima struja po modelima i to najviše do 3%.

TABELA 3 – Odstupanja modifikovane struje RTr u zavisnosti od modela

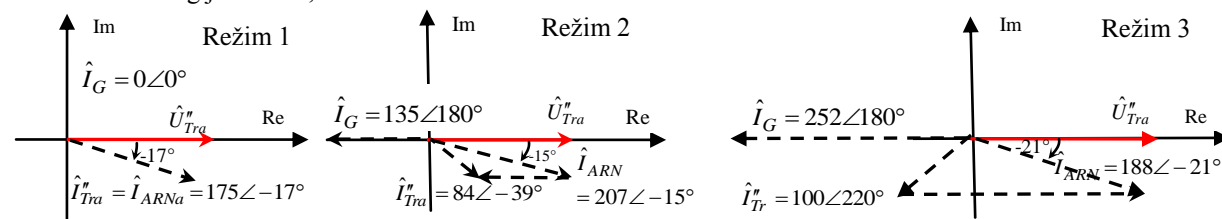
Datum	Model 1 – Model 2				Model 1 – Model 3			
	ΔI_{sr}		ΔI_{max}		ΔI_{sr}		ΔI_{max}	
	[A]	[%]	[A]	[%]	[A]	%	A	%
1. 13.8.2018	5,2	2,14	29,2	11,8	4,9	2,11	37,1	15,0
2. 14.8.2018	6,9	2,87	47,6	17,4	5,1	2,07	60,1	23,1
3. 15.8.2018	6,3	2,61	84,9	40,4	8,7	4,08	120,4	61,8
4. 16.8.2018	4,9	2,24	21,2	11,6	5,8	2,61	60,1	35,6



SLIKA 10 – REŽIM RADA NAPOJNOG RTR TS 110/20 kV "KULA" 15.08.2018. GODINE

Na slici 11 su prikazani fazori struja i napona u tri karakteristična režima dana 15.8.2018. Režim 1 – DG ne radi, u 02.54

sati, režim 2 – DG radi, EMS snabdeva električnom energijom ODS, u 00.34 sati i režim 3 – DG radi, ODS snabdeva električnom energijom EMS, u 01.23 sati.



a) REŽIM 1 U 02.54 SATI b) REŽIM 2 U 00.34 SATI c) REŽIM 3 U 01.23 SATI.

SLIKA 10 – DIJAGRAM FAZORA STRUJA I NAPONA TS "KULA" 15.08.2018. GODINE

ZAKLJUČAK

Svakodnevno imamo priključenje generatora električne struje iz obnovljivih izvora. Ugradnjom DG tokovi aktivne snage na sekundaru RTr ne samo da više nisu jednaki opterećenju DM, već i njihov smer više nije unapred poznat. U takvim okolnostima, ARN donosi odluke na osnovu pogrešnih informacija – lažne slike o opterećenju DM. Posledica je da današnja KRN, ne može korektno da se primeni u aktivnim DM. Problem sa naponom će biti izraženiji sa više DG.

Kao rešenje problema u radu su ponuđene tri jednostavne modifikacije postojećeg sistema KRN. Prvi model se sastoji samo u ugradnji međutransformatora. Drugi model se sastoji u izradi dva algoritma u DS (algoritam ARN i algoritam modifikacije struje sekundara RTr). Modifikacija struje sekundara RTr se realizuje na osnovu postojećih SCADA merenja. Model 2 je proveren u simulacionom modu. Treći model vrši RN na osnovu dva algoritma u DS i računa modifikovanu struju na osnovu podataka sa mikroprocesorskih zaštita. Model 3 je proveren u simulacionom modu. Sva tri modela se sastoje u korekciji vrednosti modula struje, koja je izmerena na sekundaru RTr.

Prvi dobijeni rezultati pokazuju velike mogućnosti korišćenja prikazanih modela. Odstupanja modifikovanih struja RTr po sva tri modela su mala. Potrebno je modele verifikovati u puno dužem periodu. Ove metode izbegavaju često skupa i komplikovana rešenja RN.

LITERATURA

1. D.Četenović, "Uticao distribuiranih generatora na rad relejne zaštite u srenjenaponskoj distributivnoj mreži",
2. R.Pelissier; "Les reseaux d'énergie électrique – Tome 1", Dunod, Paris, France, 1971.
3. V.Strezoski, D.Janjic: "Sistemi regulacije napona radijalnih distributivnih mreža"; Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, 1997.
4. G.Švenda, V.Strezoski, R.Bibić: "Regulacija napona u eksploataciji distributivnih mreža", *Elektroprivreda*, br. 3, 2008, str. 28-42.
5. J.H.Choi, J.C.Kim: "Advanced Voltage Regulation Method at the Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems", *IEEE Trans. on PWRD*, Vol. 15, No. 2, pp. 691-696, April 2000.
6. C.M.Hird, H.Leite, N.Jenkins, H.Li: "Network voltage controller for distributed generation", *IEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution*, 151 (2004) No.2, pp. 150-156
7. A.E.Kiprakis, A.R.Wallace: "Maximising energy capture from distributed generators in weak networks", *IEE Proc. on Generation, Transmission and Distribution*, 151 (2004) No.5, pp. 611-618
8. P.N.Vovos, A.E.Kiprakis, A.Wallace, G.Harrison: "Centralized and distributed voltage control: Impact on distributed generation penetration"; *IEEE Trans. on PS*, 22(1), 2007., pp.476-483
9. T.J.T.Hashim, A.Mohamed, H.Shareef: "A review on voltage control methods for active distribution networks"; *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review): Warszawa, Poland*, 2012; pp. 304-312
10. G.S.Švenda, V.C.Strezoski, Z.J.Simendić: "Verifikacija funkcije regulacije napona integrisane u DMS", *Elektroprivreda*, br. 4, 2009, str. 39-47.
11. Z.J.Simendić, V.C.Strezoski, G.S.Švenda: "Analiza rada automatskih regulatora napona u ED Sombor", "*JUKO CIGRE 28 savetovanje 2007*", Vrnjačka Banja, STK – B5, ISBN: 978-86-82317-63-0.
12. G.Švenda, Z.Simendić: "Advanced voltage control in distribution network with DG", *International Conference Energy and Ecology Industry*, October 2018, Belgrade, Serbia
13. Momir Kulić, "Merni transformatori priručnik za korisnike", Zaječar, maj 2013.
14. Z.Simendić, G.Švenda, A.Car, D.Glišić, M.Bjedov: "Softver za regulaciju napona smešten u daljinsku stanicu", *VII JUKO CIRED Regional Conference on electricity distribution*, 26.9.-1.10. R-4.08, Vrnjačka Banja, Srbija, 2010.
15. G.Švenda, Z.Simendić, V.Strezoski: "Advanced Voltage Control Integrated in DMS", *Electrical Power and Energy Systems*, No.43, 2012, pp. 333-343
16. Uputstvo za upotrebu: "Automatski regulator napona ARN5", Energoinvest, Sarajevo, 1969.
17. Z.Simendić, J.Činčurak; "Regulacija napona 20 kV distributivnih mreža sa vetrogeneratorom", "*CIGRE SRBIJE“ 33 savetovanje 2017*", Zlatibor, R B5 - 12, Srbija