

UTICAJ DISTRIBUTIVNIH GENERATORA NA REGULACIJU NAPONA DISTRIBUTIVNIH MREŽA**IMPACT OF DISTRIBUTED GENERATORS ON VOLTAGE REGULATION IN DISTRIBUTION NETWORK**

Kristina Milić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U ovom radu je razmatran problem regulacije napona u distributivnim mrežama (DM) sa distributivnim generatorima (DG). Usled proizvodnje aktivne snage u DM, merenja modula struje i napona samo na sekundaru regulacionog transformatora nisu dovoljna za korektan rad klasičnih automatskih regulatora napona. Za korektnu regulaciju napona aktivnih DM potrebna je modifikacija klasične regulacije napona. U radu su date teoretske osnove o klasičnoj i modifikovanoj regulaciji napona. Njihove mogućnosti analizirane su na primeru jednostavne aktivne DM.

Ključne reči: Regulacija napona, aktivne distributivne mreže, regulacioni transformatori sa regulacijom pod opterećenjem

Abstract – This paper discusses the problem of voltage regulation in networks with distributed generators. Measurement of current and voltage on secondary winding aren't sufficient for correct operation of classical automated regulation transformers, during their active power supply to the distribution network. In order to correctly regulate the voltage of an active distributed network, modification is necessary to achieve classic voltage regulation. The paper presents the basic theory of classical and adaptive voltage regulation. Their capabilities are analyzed by using the example of simple active distribution network.

Keywords: Voltage control, Active distribution networks, on-load tap-changing transformer

1. UVOD

Kao posledica tokova snaga na čvorovima DM se realizuju naponi različitih vrednosti. Te vrednosti više ili manje odstupaju od nominalnih vrednosti za koje su potrošači konstruisani. Ako se na potrošačima realizuje napon čija je vrednost niža od nominalne: smanjuju se stepen iskorišćenja i produktivnost rada. Kao posledice napona čija je vrednost veća od nominalne, povećava se naprezanje izolacije opreme, odnosno smanjuje se vek trajanja električnih aparata i stepen iskorišćenja. Prema tome, potrošači trpe štetu kad god vrednost napona odstupa od nominalne. Zbog toga je regulacija vrednosti napona u sistemu jako važna.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Goran Švenda, red. prof.

U skladu sa savremenim trendovima u elektroenergetici (deregulacija tržišta, očuvanje životne sredine, Kyoto protokol, dekarbonizacija i napredak tehnologije) radikalno se menja struktura izvora električne energije. Posledica je da u DM intenzivno raste broj i uticaj DG. Klasična regulacija napona [1-3], zasnovana na automatskom regulatoru napona i unapred podešenom zakonu regulacije, nije spremna da odgovori na nove izazove [4,5].

Nakon Uvoda u drugom delu rada opisani su regulacioni transformatori i postupak proračuna tokova snaga. U trećem delu je izvršena je postavka problema regulacije napona u pasivnim i aktivnim DM. Njihova verifikacija na primeru jednostavne aktivne DM prikazana je u četvrtom delu rada. Zaključci rada i referentno navedena literatura koja je korišćena pri izradi ovog rada, dati su u petom i šestom delu rada, respektivno.

2. OPŠTI POJMOVI

U ovom delu prikazani su regulacioni transformatori, automatski regulatori napona i postupak za proračun tokova snaga, korišćeni za izradu ovog rada.

2.1. Regulacioni transformatori

Regulacioni transformatori (RTr) su energetske transformacije sa mogućnošću podešavanja odnosa transformacije oko nominalne vrednosti, odnosno regulacije napona na sabirnicama njegovog sekundara. U tu svrhu kod njih je promenljiv broj navojaka jednog od namota. Promenljiv broj navojaka se dobija tako što jedna strana namotaja na svakom stubu ima više izvoda. Ti izvodi mogu biti na primarnoj, ili na sekundarnoj strani. Zbog lakšeg preklapanja manjih struja, regulaciona sklopka se postavlja na stranu višeg napona [2].

Prema mogućnostima regulacije izlaznog napona, RTr mogu da budu:

- sa regulacijom pod opterećenjem,
- sa regulacijom u beznaponskom stanju.

2.2. Automatski regulatori napona

Uloga automatskog regulatora napona (ARN) je da se na osnovu izmerene vrednosti modula struje na sekundaru RTr definiše željena (referentna) vrednost modula napona na kontrolisanim SN sabirnicama. Željena vrednost napona se poredi sa izmerenom vrednošću. Ako je njihova razlika veća od dozvoljene, inicira se promena položaja regulacionog otepa na RTr preko kontrolnih releja.

2.3. Algoritam sumiranja struja

Algoritam sumiranja struja, odnosno Shirmohammadi-ev algoritam, je iterativni postupak za proračun tokova snaga. Algoritam počinje sa inicijalizacijom postupka. Ova inicijalizacija se sastoji u učitavanju podataka o DM, numeraciji grana i čvorova po slojevima i inicijalizaciji indeksa iteracija (h) na početnu vrednost ($h=1$). Nakon inicijalizacije započinje iterativni postupak, gde se svaka iteracija sastoji se od sledeća tri koraka [6]:

1. **Proračun injektiranih struja** – Proračun se izvodi za svaki čvor, počevši od čvorova u prvom sloju, prema sledećoj relaciji, (i)-indeks čvora:

$$i_i^{(h)} = \left(\frac{S_{p,i}}{V_i^{(h-1)}} \right)^* + y_{0,i} \cdot V_i^{(h-1)}, i = 1, \dots, n_{cv} \quad (1)$$

2. **Proračun struja po granama** ("zamena unazad") – Proračun se izvodi za svaku granu, počevši od grana u poslednjem sloju, prema sledećoj relaciji:

$$j_i^{(h)} = i_i^{(h)} + \sum_{j \in i} j_j^{(h)}, i = n_{gr}, \dots, 1, \quad (2)$$

3. **Proračun napona u čvorovima** ("zamena unapred") – Proračun se izvodi za svaki čvor, počevši od čvora u prvom sloju, prema sledećoj relaciji:

$$V_i^{(h)} = V_{i-1}^{(h)} - z_i \cdot j_i^{(h)}, i = 1, \dots, n_{cv}. \quad (3)$$

- Proveriti vrednosti napona u dve uzastopne iteracije:
 $\Delta V(h) < \varepsilon.$ (4)

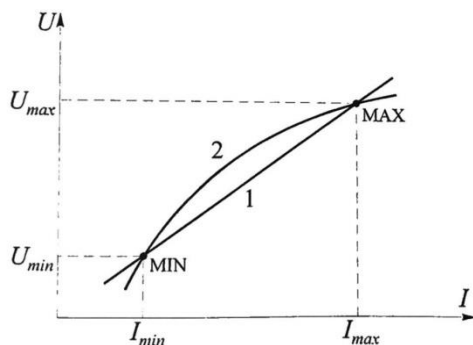
3. REGULACIJA NAPONA U DM

Osnovni cilj regulacije napona je da održava napone u svim čvorovima mreže u granicama propisanih graničnih vrednosti, pritom, ako je moguće što bliže nominalnim vrednostima.

3.1 Klasična regulacija napona

Regulacija napona u DM, pomoću RTr zasniva se na principu kompenzacije pada napona jedinstvenog voda. Ovaj princip se sadrži u ideji da se potrošaču priključenom u određenom čvoru mreže obezbediti konstantan napon, nezavisno od promene opterećenja, ali i nezavisno od promene stanja na visokonaponskim sabirnicama transformatora. Ovakva kontrola, odnosno regulacija naziva se **kompaundovana regulacija napona** [1,2].

Optimalna, minimalna i maksimalna vrednost napona na SN sabirnicama RTr, određena je za režime maksimalnog i minimalnog opterećenja. Na osnovu te dve tačke, definisan je zakon regulacije.



Slika 1. Zakon regulacije i karakteristike regulacije za dva tipa regulatora: (1) linearna i (2) nelinearna

3.2 Regulacija napona u aktivnim DM

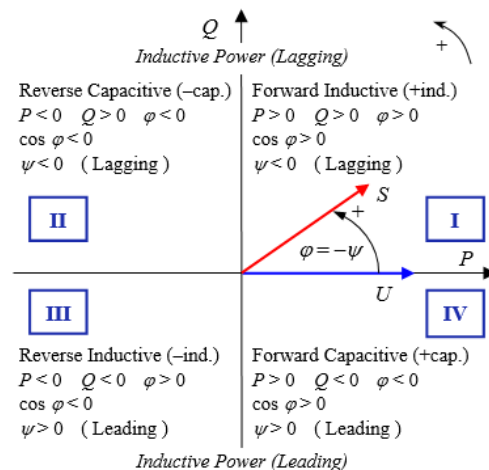
Ugradnjom DG današnje pasivne DM postaju aktivne DM. Pritom, smer tokova aktivne snage više nije samo u jednom smeru, od primara ka sekundaru RTr. Posledica je da merenjem samo modula struje na strani sekundara Tr nije moguće kvalitetno proceniti vrednost opterećenja DM, a samim tim ni optimalnu vrednost napona na sekundaru Tr.

Kada DG injektira snagu u DM, na sekundaru RTr će se realizovati napon čija je vrednost niža od optimalne U_{opt} .

Za razumevanje problema rada klasične regulacije napona u DM sa DG potrebno je razmatrati četiri ekstremna primera:

- 1) DG ne radi, potrošnja je minimalna (maksimalna);
- 2) maksimalna proizvodnja DG, potrošnja je minimalna (za različite vrednosti faktora snage);
- 3) maksimalna proizvodnja DG, potrošnja je maksimalna i
- 4) proizvodnja DG jednaka je potrošnji.

Na slici 2 prikazani su režimi DM, koji mogu da se ostvare priključenjem DG u DM. U pasivnim DM podrazumeva se da su tokovi aktivnih snaga jednosmerni, od korena DM ka njenim potrošačima, I i IV kvadrant. U aktivnim DM tokovi aktivne snage mogu biti dvosmerni (reverse), II i III kvadrant [5].



Slika 2 – P-Q dijagram DM sa DG [5]

3.3 Modifikovana klasična regulacija napona

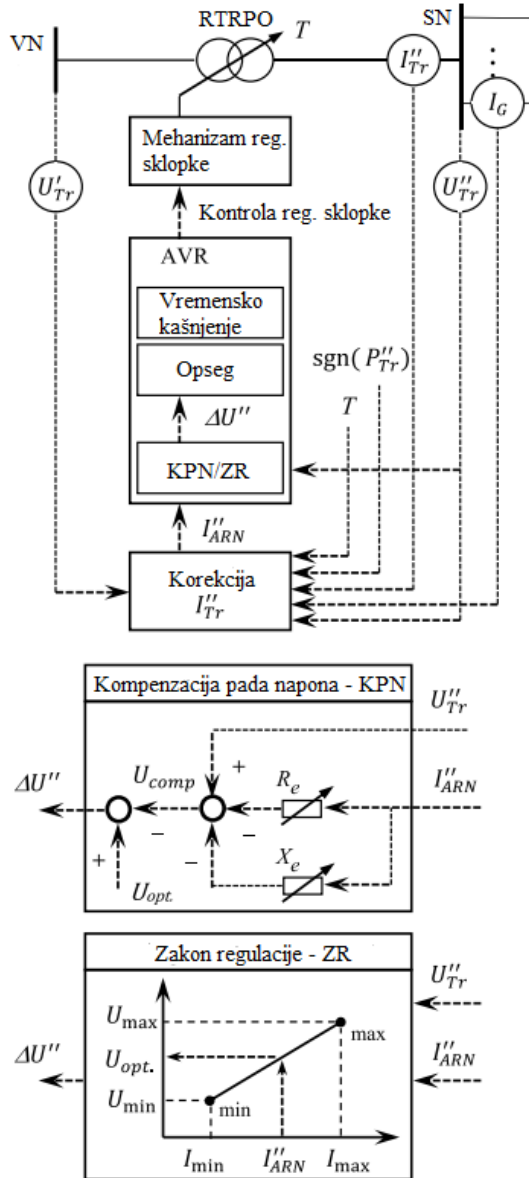
Modifikovana KRN zasniva se na korekciji vrednosti modula struje I''_{Tr} sa sekundara RTr. Za njenu korekciju potrebne su aktuelne vrednosti modula napona sa primara i sekundara RTr, modula struje sa sekundara RTr, pozicije regulacione sklopke t i smer aktivne snage kroz RTr. Blok dijagram modifikovane klasične regulacije napona prikazan je na slici 3 [5].

Korekcija struje I''_{Tr} vrši se na osnovu procene stanja na izvodu i rada DG, korišćenjem RTr pod opterećenjem i ukupne struje potrošnje. Korigovana struja I''_{ARN} se šalje na AVR relej.

U zavisnosti od tipa AVR releja i struje koja u njega ulazi, izmerena vrednost napona na sekundaru U''_{Tr} biva korigovana sa procenjenim padom napona u DM. Taj napon obeležava se sa U_{comp} – komparativni napon. Kada se odredi njegova vrednost uzima se optimalna vrednost napona U_{opt} koja je određena direktno pomoću karakteristike releja. Kada se te dve vrednosti dobiju,

njihovim poređenjem dobija se razlika napona $\Delta U''$.

U drugom slučaju, uzima se optimalna vrednost napona definisana karakteristikom zakona regulacije U_{opt} i poredi se sa izmerenom vrednošću napona na sekundaru U''_{Tr} . Na osnovu njihove razlike određuje se da li je potrebno da se promeni prenosni odnos RTr.



Slika 3 – Blok dijagram sistema modifikovane KRN [5]

3.4 Procena režima grane sa DG

Procena režima grane sa priključenim DG se vrši na osnovu unapred definisane vrednosti faktora snage DG $\cos(\varphi_G) \approx 1$ i izmerenih vrednosti modula struje I_G i napona U''_{Tr} na početku izvoda [3]:

$$\hat{I}_G = -I_G \cos(\varphi'_G + \alpha) + jI_G \sin(\varphi'_G + \alpha) \quad (5)$$

gde su:

I_G – modul struje sa početka izvoda sa DG,

φ'_G – fazni stav struje generatora,

α – ugao između fazora struja sa početka i kraja izvoda sa DG

3.5 Procena potrošnje potrošača

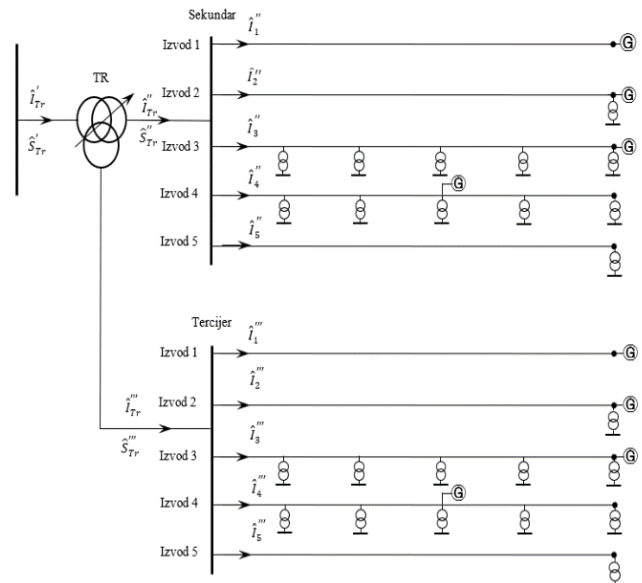
Za korektan rad KRN sa ugrađenim ARN, sa zakonom regulacije koji je podešen bez uticaja DG, ARN treba da se prosledi sledeća vrednost modula struje [3]:

$$I_{ARN} = \{[I''_{Tr} \cos \psi'_{Tr} + I_G \cos(\varphi'_G + \alpha - \theta)]^2 + [I''_{Tr} \cos \psi'_{Tr} + I_G \cos(\varphi'_G + \alpha - \theta)]^2\}^{1/2} \quad (6)$$

4. VERIFIKACIJA MODELA

Verifikacija modela regulacije napona aktivnih DM izvršena je na primeru jednostavne DM, slika 4 [7]. Ona se sastoji od tronamotajnog RTr sa pet različitih izvoda na sekundaru i tercijeru. Svi izvodi imaju jednake parametre i dužine 10 km. Pritom: I izvod – nema potrošače, na njegovom kraju je priključen DG1 snage S_G ; II izvod – na kraju su priključeni potrošač snage S_P i DG2 snage S_G ; III izvod – ima N (N=5) jednakih ravnomerno raspoređenih potrošača ukupne snage S_P i DG3 na kraju voda snage S_G ; IV izvod – ima N jednakih ravnomerno raspoređenih potrošača ukupne snage S_P i DG4 na sredini voda S_G ; V izvod – nema DG, na kraju je priključen potrošač snage S_P .

Na svakom izvodu sa potrošnjom raspodeljena je ista ukupna snaga potrošnje i u zavisnosti od trenutka iznosi: $S_P = 4 - j2$ [MVA], $S_P = 4 + j2$ [MVA] ili $S_P = 4 - j0$ [MVA]. Snaga distributivnih generatora se menja od 0 do 8 MW.



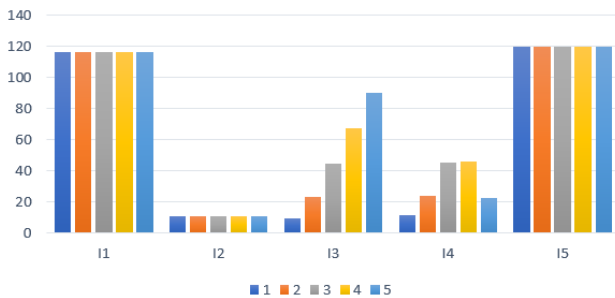
Slika 4 Test distributivna mreža [7]

Na slici 5 prikazane su vrednosti modula struje po izvodima sekundara RTr u slučaju $S_G = S_P = 4$ MVA. Za klasičnu regulaciju napona najkritičniji primer je kada ukupna potrošnja i proizvodnja DM imaju međusobno bliske vrednosti, a u DM postoje izvodi samo sa potrošačima i izvodi samo sa DG.

Vrednosti modula struja po deonicama, za pet izvoda na sekundaru, prikazane su na slici 5. Sa tamno plavom bojom naznačene su vrednosti struje na 2km, sa narandžastom na 4km, sa sivom na 6km, sa žutom na 8km, i sa svetlo plava 10km (na kraju izvoda).

Struje na prvom (I_1), drugom (I_2) i petom izvodu (I_5) su konstantne i iste su na svim deonicama. Struja na drugom izvodu (I_2) je znatno manja jer postoji i potrošnja i

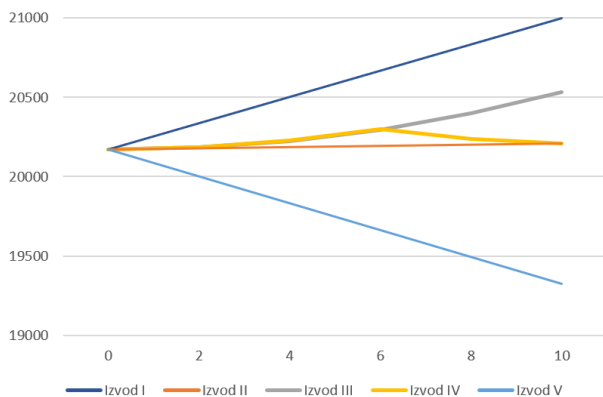
proizvodnja na kraju izvoda. Na trećem izvodu (I_3) struja je najmanja na početku izvoda i onda se sve više povećava do kraja izvoda jer je tu priključen DG. Na četvrtom izvodu (I_4) je struja najveća na sredini izvoda gde je priključen DG, struja se smanjuje udaljavanjem od sredina i najmanja je na krajevima.



Slika 5 – Promena struje po deonici voda za svaki izvod na sekundaru RTr

Na slici 6 prikazane su vrednosti promene napona duž izvoda. Plavom, narandžastom, sivom, žutom i svetloplavom bojom prikazane su promene duž I, II, III, IV i V izvoda, respektivno.

Može se uočiti da vrednost napona značajno raste na I izvodu (samo DG na kraju izvoda); blago raste na II izvodu (isti potrošač i DG na kraju izvoda); raste na III izvodu (ravnomerno raspoređena potrošnja i DG na kraju izvoda); raste do sredine izvoda IV gde je povezan DG i posle opada (ravnomerno raspoređena potrošnja i DG na sredini izvoda); značajno opada na V izvodu (samo potrošač na kraju izvoda). Vrednost napona se povećava od početka ka kraju izvoda.



Slika 6 – Vrednosti napona duž izvoda

5. ZAKLJUČAK

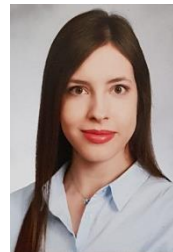
Ugradnjom DG tokovi aktivne snage na sekundaru regulacionog transformatora ne samo da više nisu jednaki opterećenju DM, već i njihov smer više nije unapred poznat. U takvim okolnostima, ARN donosi odluke na osnovu pogrešnih informacija o opterećenju DM čime je onemogućena kvalitetna procena optimalne vrednosti napona na sekundaru RTr, odnosno onemogućen je njen kvalitetan rad i tada se potrošačima isporučuje električna energija sa naponom čija je vrednost ispod vrednosti koja je definisana zakonom regulacije.

Jedan od načina za rešavanje ovih problema jeste modifikacijom klasične regulacije napona koja se sastoji samo u korekciji lažne slike o opterećenju DM.

6. LITERATURA

1. G.Švenda: *Specijalizovani softveri u elektroenergetici*, skripta sa predavanja iz istoimenog predmeta na master studijama, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2022.
2. V.Strezoski: *Sistem regulacije napona distributivnih mreža*, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 1997.
3. G.S.Švenda, Z.Simendic, V.Strezoski: Advanced Voltage Control Integrated in DMS, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 43, Issue 1, December 2012, pp. 333-343, DOI: [10.1016/j.ijepes.2012.05.014](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.05.014)
4. G.Švenda, I.Krstić, S.Kanjuh, M.Jajčanin: Voltage Improvement in Distribution Networks with High Penetration of Electric Vehicles and Renewable Energy Sources; *CIRE2022 workshop on E-mobility and power distribution systems*, 2-3 June 2022, Porto, Portugal, Paper No. 1225, DOI: [10.1049/icp.2022.0728](https://doi.org/10.1049/icp.2022.0728)
5. G.Švenda, Z.Simendić: Adaptive On-Load Tap-Changing Voltage Control for Active Distribution Networks; *Electrical Engineering*, Vol. 104, April 2022, pp. 1041-1056, DOI: [10.1007/s00202-021-01357-8](https://doi.org/10.1007/s00202-021-01357-8)
6. D.Shirmohammadi, H.W.Hong, A.Semlyen, G.X.Luo: A compensation- based power flow method for weekly meshed distribution and transmission networks; *IEEE Trans. on PS*; 1988; Vol.3, pp. 753-762, DOI: [10.1109/59.192932](https://doi.org/10.1109/59.192932)
7. S.Bosančić: Regulacija napona klasične distributivne mreže sa distributivnim generatorom; master rad, FTN, Novi Sad, septembar 2021.

Kratka biografija:



Kristina Milić rođena je u Novom Sadu 1997. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Energetika, elektronika i telekomunikacije odbranila je 2020.god. Kontakt: kristinamilic15@gmail.com