

UTICAJ DISTRIBUTIVNIH GENERATORA NA AUTOMATSKU REGULACIJU NAPONA**IMPACT OF DISTRIBUTED GENERATION ON AUTOMATIC VOLTAGE REGULATION**

Vasilija Šešlija, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U radu je razmatran uticaj distributivnih generatora na regulaciju napona. Izložena su i upoređena rešenja dobijena korišćenjem klasične i modifikovane regulacije napona. Za potrebe verifikacije razvijen je program u programskom jeziku FORTRAN.

Ključne reči: Regulacija napona, distributivni generatori

Abstract – In this paper impact of distributed generation on voltage regulation with automatic voltage regulator is presented. Solutions obtained by using classical and modified voltage regulation are shown and compared. Solution verification is developed in programming language FORTRAN

Keywords: Voltage regulation, distributed generation

1 UVOD

Prateći svetske trendove, poslednjih godina i u Srbiji intenzivno raste broj distributivnih generatora (DG) priključenih na distributivnu mrežu (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 regulaciju napona (RN) [1], rad i koordinaciju relejne zaštite, restauraciju napajanja nakon kvara, planiranje distributivnih kompanija, itd. U skladu sa tim, distributivne kompanije moraju da se prilagode i/ili u potpunosti promene klasične principe u okviru svog delovanja [2]. Od interesa za razmatranja u ovom radu jeste uticaj DG na rad klasične automatske regulacije napona (KRN) u DM.

2 OSNOVNI POJMOVI

U ovom delu razmotreni su pojmovi koji su od interesa za razumevanje koja slede:

- Potrošnja,
- Slični i karakteristični potrošači,
- Karakteristični dani i sezone,
- Regulacioni transformatori,
- Automatski regulatori napona.

NAPOMENA:

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

2.1 Potrošnja

Pod potrošnjom se smatra ukupna potrošnja svih potrošača koji se napajaju sa NN sabirnica transformatora. Njena vrednost definisana je bar sa dve veličine, npr: modulom struje i faktorom snage, odnosno aktivnom i reaktivnom snagom. Za razmatrani period, potrebne su njihove [3]:

- minimalna i maksimalna vrednost,
- dnevni hronološki dijagrami (DHD),
- normalizovani dnevni hronološki dijagrami (NDHD).

2.2 Slični i karakteristični potrošači

Svi potrošači čija potrošnja može da se opiše jedinstvenim NDHD predstavljaju grupu sličnih potrošača. Reprezent te grupe je karakteristični potrošač sa istim tim NDHD i jediničnim kvantitativnim pokazateljem potrošnje.

2.3 Karakteristični dani i sezone

Period unutar kojeg svaki od karakterističnih potrošača, za sve karakteristične dane, može da se opiše jedinstvenim skupom NDHD, a svaki od potrošača jednim kvantitativnim pokazateljem potrošnje, predstavlja sezonu – karakteristični period.

2.4 Regulacioni transformatori

Najčešći regulacioni transformatori u praksi su transformatori za regulaciju odnosa veličina napona uz fiksni odnos faznog pomeraja. Oni se mogu podeliti na:

- regulacione transformatore sa regulacijom pod opterećenjem (RTPO),
- regulacione transformatore sa regulacijom u beznaponskom stanju (RTBS).

RTPO su uobičajeno naponskog nivoa $VN/SN_1/SN_2$ sa stepenom regulacije $\pm 12 \times 1.25 \%$, odnosno $\pm 10 \times 1.6 \%$. Promena odnosa transformacije je diskretna.

2.5 Automatski regulatori napona

Uloga automatskog regulatora napona (ARN) je da se na osnovu izmerene vrednosti modula struje na sekundaru RTPO 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 razlike, preko kontrolnih releja se inicira promena položaja regulacionog otepa na RTPO [3].

3 POSTAVKA PROBLEMA

Osnovni pokazatelj kvaliteta regulacije napona jeste šteta koju elementarni potrošači električne energije (električni aparati) trpe usled odstupanja napona od nominalnih vrednosti [1].

U postavci problema regulacije napona izvršena je prostorna i vremenska dekompozicija problema, pri čemu je kriterijum štete postavljen kao osnovni motiv za regulaciju napona. U tradicionalnim distributivnim mrežama (DM) problem je u potpunosti rešen primenom klasične regulacije napona (KRN), međutim osnovni princip na kome ona počiva, a to je jednosmeran tok snage, prestaje da važi u DM sa DG.

3.1 Prostorno- vremenska dekompozicija problema

Regulacija napona je kompleksan problem koji se može razložiti u prostoru i vremenu [1]. U zavisnosti od veličine mreže nad kojom se vrši upravljanje može se izvršiti prostorna dekompozicija problema. U zavisnosti od brzine upravljanja regulacionim resursima, što pre svega zavisi od tipa i mogućnosti regulacionog resursa, može se izvršiti vremenska dekompozicija problema kontrole napona.

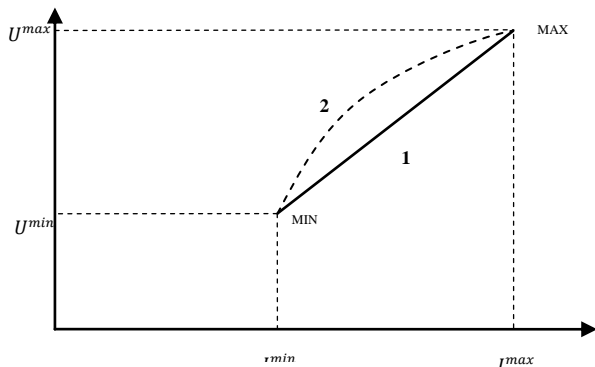
3.2 Kvantifikacija naponskog profila mreže – Šteta

Distribuciju električne energije neminovno prate padovima napona na njenim elementima (vod, transformator). Pad napona je promenljiva veličina, njena vrednost zavisi od parametara i režima DM. Promena pada napona ima za posledicu promenu napona na potrošačima i štete koju potrošači trpe jer se napajaju električnom energijom s naponima različitim od nominalnih. Iako se primenom RTPO i unapred definisanim naponskim podrškama na RTBS (Tr SN/NN i SN₁/SN₂), vrednosti napona mogu regulisati, štete se ne može potpuno izbeći [1].

3.3 Klasična regulacija napona

Klasična regulacija napona (KRN) se zasniva na [3,5]:

- predstavi DM samo sa RTPO, sa ARN i ekvivalentnim vodom, s rednim parametrima R i X , na čijem je kraju priključen jedinstven (ekvivalentni) potrošač,
- proceni (proračunu) minimalnog i maksimalnog opterećenja na sekundaru napojnog RTPO (I^{min} , I^{max}) i
- proračunu optimalnih vrednosti napona na SN sabirnici RTPO za min. i max. režim DM (V_{min} , V_{max}).



Slika 1. Karakteristika zakon regulacije: (1) linearna i (2) nelinearna [1]

Na osnovu rezultata proračuna, za ta dva režima, definisana je karakteristika zakona regulacije ARN, tačke MIN i MAX, odnosno funkcionalna zavisnost napona sekundara

RTPO, V_{sek} od njegovog opterećenja, struje I^{sek} , slika 1.

3.4 Problem KRN u DM sa distributivnim generatorima

Jedan od osnovnih preduslova za korektan rad KRN jeste da je smer tokova aktivne snage od korena DM ka njenim potrošačima, odnosno da je DM pasivna. U aktivnim DM merenje modula struje na sekundaru RTPO 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 RTPO, odnosno onemogućen je njen kvalitetan rad [2].

U pasivnim mrežama napon opada duž izvoda. Pri maksimalnoj potrošnji, maksimalan je i pad napona. Da bi poslednji potrošač na izvodu imao napon u dozvoljenim granicama, potrebno je podići napon na RTPO. Kada je potrošnja mala, napon na RTPO potrebno je sniziti, kako naponi ne bi bili iznad dozvoljene granice. Ove aktivnosti koordinisane su zakonom regulacije.

Problem nastaje kada se deo potrošnje DM pokriva iz DM, proizvodnjom DG. Tada, RTPO nema korektnu sliku o vrednosti potrošnje DM za koju treba da izvrši kompenzaciju pada napona.

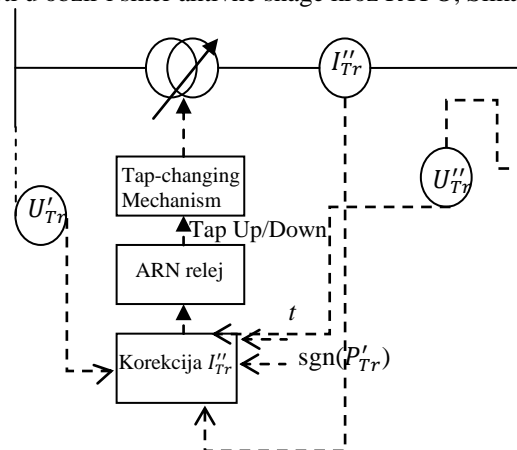
4 MATEMATIČKI MODEL

Ulazni podaci u ARN su vrednosti modula struje i napona sa sekundara RTPO. Kada DG ne radi, potrošači se napajaju iz prenosne mreže, preko RTPO, tako da je struja kroz transformator jednaka struji potrošnje. Kad se uključi DG, te struje više nisu jednake i ulazni podaci u ARN nisu validni. Kada DG proizvodi više nego što potrošnja zahteva, deo snage se preko RTPO šalje u prenosnu mrežu, u suprotnom smeru od podrazumevanog. Ampermetar na RTPO, meri samo moduo fazora struje (ali ne i njen smer). Konačno, struja koja se šalje na ARN ne odgovara režimu DM, odnosno vrednosti njene ukupne potrošnje.

4.1 Blok dijagram modifikovane KRN

Modifikovana KRN (ModKRN) zasniva se na korekciji vrednosti modula struje I''_{Tr} sa sekundara RTr. Ulaz u ARN više neće biti samo modul struje sa sekundara, već vektorski zbir struja sa sekundara RTPO i struje DG.

Pored modula napona sa primara i sekundara, modula struje sa sekundara RTPO i pozicije sklopke, potrebno je uzeti u obzir i smer aktivne snage kroz RTPO, Slika 2.



Slika 2. Blok dijagram sistema modifikovane KRN [2]

4.2 Procena režima grane sa generatorom

Procena režima grane sa priključenim DG se vrši na osnovu unapred definisane vrednosti faktora snage DG $\cos(\varphi_G) \approx 1$, izmerenih modula struje DG, kao i napona sa sekundara RTPO [2]:

$$\hat{I}_G = -I_G \cos(\hat{\varphi}'_G + \alpha) + jI_G \sin(\hat{\varphi}'_G + \alpha) \quad (1)$$

gde su:

I_G – modul struje sa početka izvoda sa DG,

$\hat{\varphi}'_G$ – fazni stav struje generatora,

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

4.3 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 RTPO. Dve moguće varijante fazora struja i napona su takve da je vrednost modula napona primara, svedena na sekundar, veća od vrednosti modula napona koja je izmerena na sekundaru i obrnuto.

Moguće su sledeće vrednosti ugla fazora struje na sekundaru RTPO [2]:

$$\psi''_{Tr} = -90^\circ \pm \arccos \left[\frac{dU''_{Tr}}{X''_k \cdot I''_{Tr}} \right] \quad (2)$$

gde su:

$d\hat{U}''_{Tr}$ – pad napona na RTPO,

X''_k – impedansa RTPO svedena na sekundar,

I''_{Tr} – struja sekundara RTPO.

U skladu sa izrazom (2), i za pozitivnu i negativnu vrednost pada napona, postoje po dva matematički korektna rešenja.

4.4 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 [2]:

$$I_{ARN} = \left\{ [I''_{Tr} \cos \psi''_{Tr} + I_G \cos(\varphi'_G + \alpha)]^2 + [I''_{Tr} \sin \psi''_{Tr} - I_G \sin(\varphi'_G + \alpha)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

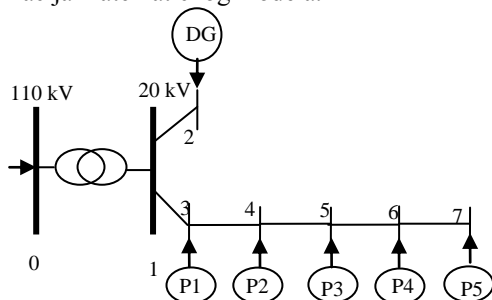
gde je sa I_{ARN} naznačena vrednost modula struje koja ulazi u ARN.

5 VERIFIKACIJA MATEMATIČKOG MODELA

Verifikacija prikazanog matematičkog modela izvršena je na primeru jednostavne DM. Analizirane su mogućnosti rada KRN i ModKRN u zavisnosti od režima DM.

5.1 Test mreža

Na slici 3 je prikazana test mreža nad kojom je izvršena verifikacija matematičkog modela.



Slika 3. Jednostavna test mreža

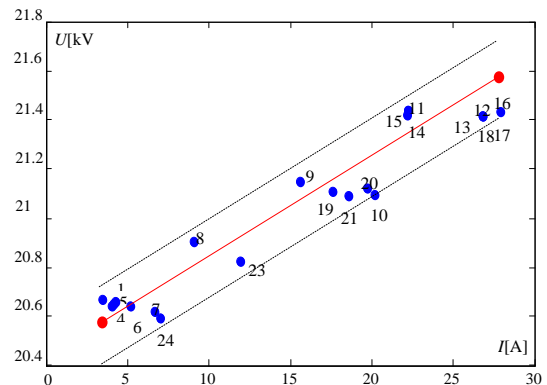
5.2 Potrošnja

Potrošači su modelovani kao potrošači konstantne struje (samo pri nominalnom naponu imaju međusobno jednake vrednosti koje se kreću od 8.4 do 57 A).

Proizvodnja DG je modelovana kao negativna potrošnja (DG injektira snagu u DM). Za potrebe verifikacije modela, proizvodnja se menja od 0 do 10 MW.

5.3 Automatska regulacija napona

Na slici 4 je prikazana karakteristika zakona regulacije za razmatran primer, bez DG. Crvene tačke su optimalne vrednosti napona za minimalnu (3h) i maksimalnu (16h) potrošnju – na osnovu njih je formirana karakteristika. Plave tačke predstavljaju optimalne vrednosti napona za svaki sat.



Slika 4 – Karakteristika zakona regulacije (DM bez DG)

5.4 Regulacija napona – DM bez DG

Struja koja ulazi u ARN jednaka je struji potrošnje, stoga regulacija radi korektno. Vrednosti dobijene u ovom primeru su referentne vrednosti, one treba da se primenom regulacije napona dobiju bez obzira na proizvodnju DG.

U nastavku se razmatraju tri premera: DG proizvodi 1, 5 i 10 MW. U tabelama 1, 2 i 3 su prikazane vrednosti dobijene proračunom tokova snaga, u skladu sa zakonom regulacije, slika 4, koji dobija vrednost struje sa sekundara RTPO (KRN) i modifikovanu struju sa sekundara RTPO (ModKRN).

5.5 Regulacija napona – DG proizvodi 1 MW

Primena KRN kritičnija je za režime sa malim opterećenjem, 3 h, kada je potrošnja mala i bliska proizvodnji DG (kada se većim delom napaja iz DG). Posledica je mala struja kroz RTPO, primenom KRN nije dobro definisana optimalna vrednost napona, tako da raste šteta koju trpe potrošači. Za režime sa velikom potrošnjom, 16 h, potrošači se pretežno napajaju preko RTPO, a manje iz DG, pa je struja I_{ARN} bliska struji potrošnje.

Korišćenjem ModKRN naponski profil na SN sabirnici isti je kao kada je DG bio isključen.

Tabela 1. DG proizvodi 1 MW

	3h		16h	
	KRN	ModKRN	KRN	ModKRN
I''_{Tr} [A]	7.62		252.26	
I_{DG} [A]	27.87		28.18	
I_p [A]	37.10		282.28	
V_{opt} [V]	20669.97		21434.98	
I_{ARN} [A]	7.62	35.47	252.26	276.31
V_{SN} [V]	20347.93	20669.87	21439.10	21439.10
\dot{S} [n.j.]	30.47	1.012	354.64	354.64

5.6 Regulacija napona – DG proizvodi 5 MW

Vidi se da je u 3h, pri minimalnom opterećenju proizvodnja DG daleko veća od potrošnje, pa se određeni deo snage vraća u prenosnu mrežu. To za KRN znači da je I_{ARN} znatno veća od stvarne potrošnje, stoga u skladu sa karakteristikom po kojoj deluje podiže napon na sekundaru.

Kod ModKRN, I_{ARN} dobija se korekcijom I''_{Tr} , odnosno njenim vektorskim sabiranjem sa I_{DG} . Tako se dobija struja koja je dovoljno bliska struji potrošnje, pa regulator reaguje odgovarajućim naponom.

U 16 h, DG samo delimično napaja potrošnju, odnosno tok snage je jednosmeran. I_{ARN} vrlo je bliska struji potrošnje, pa se na sekundaru RTr dobija napon kao u slučaju kada je DG isključen.

Tabela 2. DG proizvodi 5 MW

	3h		16h	
	KRN	ModKRN	KRN	ModKRN
I''_{Tr} [A]	97.00		154.58	
I_{DG} [A]	131.73		132.19	
I_P [A]	37.10		282.28	
V_{opt} [V]	20669.97		21434.98	
I_{ARN} [A]	97.00	35.42	154.58	272.74
V_{SN} [V]	20980.00	20646.39	21077.76	21434.1
\dot{S} [n.j.]	43.55	3.15	894.48	357.14

5.7 Regulacija napona – DG proizvodi 10 MW

Može se uočiti da je, pri velikoj proizvodnji DG, KRN u režimima minimalne potrošnje 3h, realizovana kao da je režim sa maksimalnom potrošnjom. I obrnuto, u 16h, režim sa maksimalnom potrošnjom je tretiran kao režim sa minimalnom potrošnjom.

Vrednosti napona značajno su korigovane korišćenjem ModKRN, čime je skoro 5 smanjena ukupna šteta koju trpe potrošači.

Tabela 3. DG proizvodi 10 MW

	3h		16h	
	KRN	ModKRN	KRN	ModKRN
I''_{Tr} [A]	220.14		85.29	
I_{DG} [A]	254.49		256.92	
I_P [A]	37.10		282.28	
V_{opt} [V]	20669.97		21434.98	
I_{ARN} [A]	220.14	61.48	85.29	295
V_{SN} [V]	21257.62	20571.39	20680.39	21760.37
\dot{S} [n.j.]	132.6	2.5	2237.87	451.037

6 ZAKLJUČAK

Karakteristika regulacije za KRN zasniva se na vrednosti modula struje izmerene na sekundaru RTPO. U pasivnoj DM, ona je jednaka struji potrošnje, dok je u aktivnoj jednaka struji potrošnje umanjenoj za struju DG. U skladu sa tim, u aktivnim DM narušena je osnovna ideja rada KRN. Posledica je da će se njenom primenom na potrošačima realizovati loši naponi, odnosno nepotrebna šteta.

Rezultati prikazani u ovom radu pokazuju da se primenom ModKRN prethodno navedeni problemi uspešno prevazilaze.

7 LITERATURA

- [1] V. Strezoski, D. Janjić: *Sistemi regulacije napona radijalnih distributivnih mreža*; Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1997.
- [2] Z. Simendić, G. Švenda, V. Mijatović, P. Bajčetić: *Modeli regulacije napona u klasičnim distributivnim mrežama sa generatorima; XI Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije, sa regionalnim učešćem – CIRED*, Kopaonik, 24-28. septembar 2018, Smart Grid forum, R-F.07, str. 1-10
- [3] D. Đanić: *Primena URN u ED Sombor*; master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija, 2011.
- [4] G. Švenda, V. Strezoski, R. Bibić: *Regulacija napona u eksploataciji distributivnih mreža; Elektroprivreda*, br.3, 2008, str. 28-42.

Kratka biografija:



Vasilija Šešlija rođena je u Somboru, 1994. god. Osnovne studije završila je na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi 2017. god. i iste godine upisala master studije.