

REGULACIJA NAPONA KLASIČNE DISTRIBUTIVNE MREŽE SA DISTRIBUTIVNIM GENERATOROM**VOLTAGE REGULATION OF A CLASSIC DISTRIBUTION NETWORK WITH A DISTRIBUTION GENERATOR**Strahinja Bosančić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U radu je analiziran uticaj distributivnih generatora (DG) na regulaciju napona u distributivnoj mreži (DM). Iznete su teorijske osnove iz aspekta regulacije napona, tokova snaga i uticaja DG na regulaciju napona. Izložena su i upoređena rešenja dobijena korišćenjem klasične i modifikovane regulacije napona. Upoređeni su rezultati dobijeni kontinualnom i diskretnom regulacijom

Ključne reči: Regulacija napona, distributivni generatori.

Abstract – The paper analyzes the influence of distribution generators (DG) on voltage regulation in the distribution network (DN). Theoretical bases from the aspect of voltage regulation, power flows and the influence of DG on voltage regulation are presented. The solutions obtained by using classical and modified voltage regulation are presented and compared. The results obtained by continuous and discrete regulation were compared.

Keywords: Voltage regulation, distribution generators.

1 UVOD

Napon i učestanost elektroenergetskog sistema (EES) predstavljaju dve osnovne promenljive koje karakterišu sisteme za proizvodnju, prenos i distribuciju električne energije [1]. Prisustvo DG u DM ima veliki uticaj na struje kratkih spojeva, tokove snaga i kvalitet električne energije.

Nakon Uvoda u drugom delu rada opisan je postupak proračun tokova snaga i problem regulacije napona DM, koja se zasniva automatskom regulatoru napona, sa na zakonom regulacije. U trećem delu izvršena je postavka problema i parametara, kao i opis mreže. Zavisnost štete od pozicije regulacione sklopke za različite režime mreže, i snage DG, analizirana je četvrtom delu rada. U isto delu, upoređeni su rezultati dobijeni primenom diskretne i kontinualne regulacije napona. Zaključci rada i referentno navedena literatura koja je korišćena pri izradi ovog rada, dati su u petom i šestom delu rada, respektivno. Glava 7 sadrži prilog u kome se nalaze rezultati tokova snaga koji su primenjeni u radu. Tabelarno su prikazane vrednosti struja, napona, proizvodnje i potrošnje po granama.

NAPOMENA:

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

2 OSNOVNI POJMOVI

U ovom delu prikazani su regulacioni transformatori i postupak za proračun tokova snaga, korišćeni u izradi ovog rada.

2.1 Regulacioni transformatori

Energetski transformatori su statički uređaji koji na principu elektromagnetne indukcije pretvaraju napon/struju između dva, ili više namotaja, pri istoj učestanosti, na druge vrednosti napona/struja. Ako je prenosni odnos transformatora promenljiv, onda su to regulacioni transformatori [9]. U zavisnosti da li se vrednost prenosnog odnosa menja pod opterećenjem, ili ne, oni se dele na:

- regulacione transformatore sa regulacijom pod opterećenjem (RTrPO),
- regulacione transformatore s regulacijom u beznaponskom stanju (RTrBS).

2.2 Tokovi snaga

Proračun tokova snaga se sastoji u proračunu promenljivih stanja (odnosno kompletnog režima) DM, na bazi poznatog napona izvora napajanja mreže (korena) i poznatih potrošnji u svim čvorovima mreže [6].

2.2.1 Metodologija za tokove snaga

Za razliku od prenosnih mreža, distributivne mreže su dominantno radijalne, sa veoma malim brojem petlji. Zbog te činjenice poznati i široko korišćeni iterativni algoritmi, za proračune tokova snaga u prenosnim mrežama, zasnovanih na matičnim modelima, nisu dovoljno efikasni za proračune tokova snaga u DM. Razvojem specijalizovanih algoritama za proračune tokova snaga u DM [6], koji se zasnivaju na karakteristikama DM (pre svega da je DM dominantno radijalna mreža), prethodno navedeni problemi su prevaziđeni.

2.2.2 Algoritam sumiranja struja

Jedna od najčešće korišćenih specijalizovanih algoritama za proračune tokova snaga u DM, Algoritam sumiranja struja, poznatija kao Shirmohammadi-ev algoritam [3], predstavlja iterativni postupak za proračun tokova snaga. Algoritam počinje inicijalizacijom postupka, a nakon toga sledi iterativni postupak, koji se sastoji od tri koraka:

1. Proračun injektiranih struja prema relaciji:

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

2. Proračun struja po granama prema relaciji:

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

3. Proračun napona u čvorovima prema relaciji:

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

3 POSTAVKA PROBLEMA

U ovom delu razmatra se uticaj DG na DM kao i postupak formiranja zakona regulacije.

3.1 Uticaj DG na DM

Primena DG u distributivnom sistemu ima brojne pogodnosti. Sa ekonomskog stanovišta to su [8]: pokrivanje povećanja potrošnje određenog broja potrošača, mogućnost proširenja DG u malim koracima, upravljanje potrošnjom. Sa stanovišta eksploatacije sistema [8]: pozitivan uticaj na naponske prilike, smanjenje gubitaka energije, poboljšanje pouzdanosti.

Pored prethodno navedenih pozitivnih efekata, priključenje DG u DM ima i neke negativne posledice. Tako na primer, priključenjem DG, u DM koje su projektovane kao pasivne mreže (tokovi aktivne snage su uvek od mreže višeg ka mreži nižeg napona), moguće je da tokovi aktivnih snaga imaju oba smera. To dovodi do problema vezano za stabilnost, upravljanje i zaštitu mreže.

3.2 Formiranje zakona regulacije

Zakon regulacije se formira za DM bez uticaja DG. Optimalna pozicija regulacione sklopke se računa za tri različite vrednosti potrošnje. Zatim se navedeni postupak ponavlja, ali sa uvaženim DG. Razmatra se i situacija kada se za proračun štete uvažavaju i potrošači na tercijeru. U tom slučaju, vrednosti optimalne pozicije regulacione sklopke su veće u odnosu na pozicije dobijene sa zanemarenim potrošačima na tercijeru.

4 VERIFIKACIJA PROBLEMA REGULACIJE NAPONA DM SA DG

U ovoj glavi obrađeno je više različitih problema regulacije napona DM sa DG. Analizirana je promena štete u zavisnosti od pozicije regulacione sklopke za različite vrednosti proizvodnje i potrošnje. Upoređeni su rezultati dobijeni kontinualnom i diskretnom regulacijom. Takođe, analiziran je uticaj promene snage DG na štetu, struju, napon i gubitke u mreži.

4.1 Test distributivna mreža

Test distributivna mreža prikazana je na slici 4.1. Mreža se sastoji od jednog trofaznog tronamotajnog regulacionog transformatora (Tr), sa pet različitih izvoda na sekundaru i pet različitih izvoda na tercijeru. Svi izvodi su jednake dužine, 10 km:

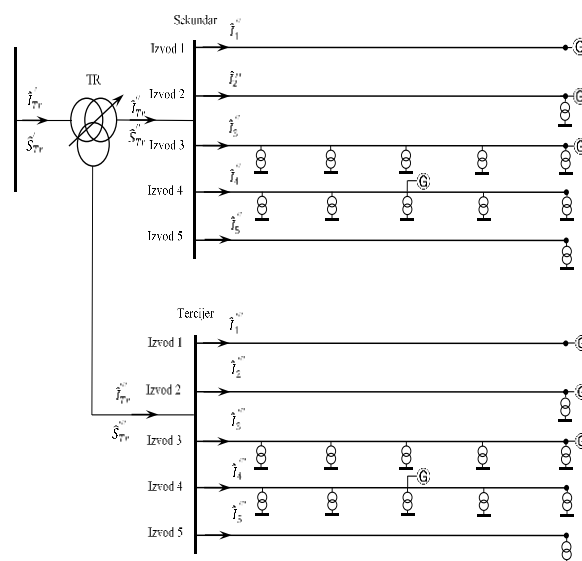
I izvod - nema potrošače, na kraju je priključen DG;

II izvod - na kraju je priključen potrošač i DG;

III izvod - ima N jednakih, ravnomerno raspoređenih potrošača, kao i DG na kraju voda;

IV izvod - ima 5 jednakih ravnomerno raspoređenih potrošača i DG na sredini voda;

V izvod - nema DG, na kraju je priključen potrošač.

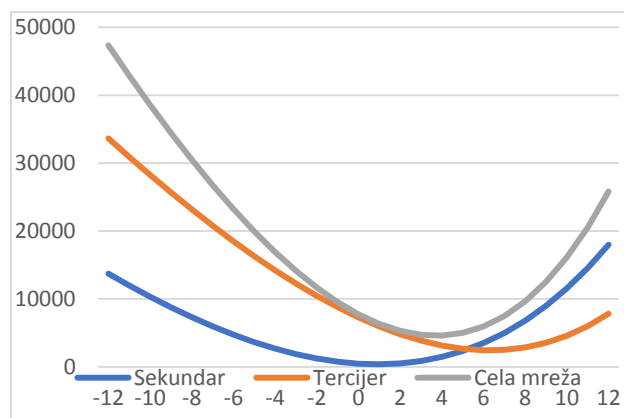


Slika 4.1 – Test distributivna mreža

4.2 Zavisnost štete od promene pozicije regulacione sklopke

U ovom poglavlju analizirana je promena vrednosti štete koju potrošači trpe usled odstupanja napona od nominalne vrednosti, u zavisnosti od snage DG. Snaga koju DG injektiraju u mrežu menja vrednost u rasponu od 0 MW do 8 MW. Pritom, vrednosti ukupne snage potrošnje na svakom od izvoda sa potrošačima imaju jednu od sledeće tri vrednosti: (4+j2) MVA, (4-j2) MVA i (4+j0) MVA.

Zavisnost štete od pozicije regulacione sklopke za slučaj, u kome je snaga potrošača $S_p=(4+j0)$ MVA, a proizvodnja DG $S_G=0$ MW, prikazana je na slici 4.2.



Slika 4.2 – Zavisnost štete od pozicije regulacione sklopke

Sa slike se može uočiti sledeće, kad se posmatraju:

- samo potrošači koji se napajaju preko sabirnica sekundara (plava linija), optimalna pozicija regulacione sklopke je 1, a vrednost štete 372.19 n.j.;
- samo potrošači sa tercijera (narandžasta linija), optimalna pozicija regulacione sklopke je 6, a vrednost štete 2438.03 n.j.;
- svi potrošači (siva linija) optimalna pozicija regulacione sklopke je 4, a vrednost štete 4606.04 n.j.

Očekivano, optimalna pozicija regulacione sklopke je veća kada se posmatraju samo potrošači na tercijeru (10 kV), u odnosu na poziciju kada se posmatraju samo potrošači na sekundaru (20 kV). Komentar: za isto opterećenje, na tercijeru, gde je niži napon, veće su struje, pa samim tim je veći pad napona.

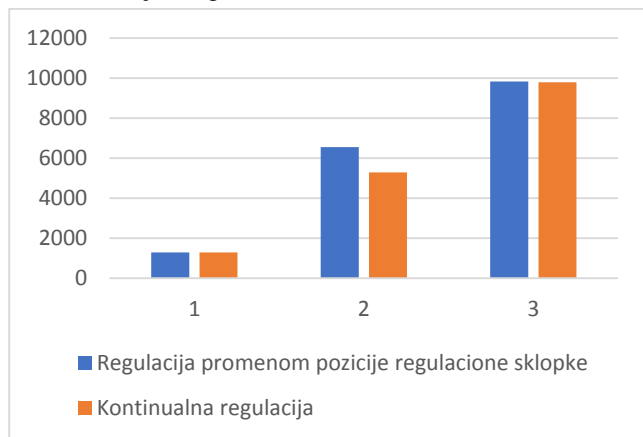
4.3 Kontinualna regulacija

Minimalne vrednosti štete mogu se proračunati pomoću dve različite metode [9]:

- regulacija promenom pozicije regulacione sklopke (diskretna regulacija),
- kontinualna regulacija.

Na slici 4.3 prikazane su vrednosti minimalne štete u zavisnosti od tipa regulacije. Minimalna vrednost štete dobijena promenom pozicije regulacione sklopke je naznačena plavom bojom, a minimalna vrednost štete dobijena primenom kontinualne regulacije je naznačena narandžastom bojom. Grafik se sastoji od tri para vrednosti, vrednost štete kada se:

1. uvažavaju samo potrošači sa sekundara,
2. uzima u obzir samo potrošače sa tercijera,
3. obuhvataju svi potrošače u mreži.



Slika 4.3 – Minimalna šteta u zavisnosti od tipa regulacije

Prilikom određivanja minimalne štete promenom pozicije regulacione sklopke, napon korena je konstantan i iznosi 110 kV. Kod kontinualne regulacije, postupak je drugačiji. Pozicija regulacione sklopke se postavi na nulu i ne menja se tokom proračuna. U tom slučaju napon se menja u opsegu od 90 kV do 130 kV sa korakom 0.2 kV.

U tabeli 4.3, prikazane su vrednosti za sledeći primer: ukupna snaga na izvodu je $S_p = (4+j2)$ MVA, a snaga DG je $S_G = 0$ MW.

Tabela 4.3 – Vrednosti štete pri različitim regulacijama

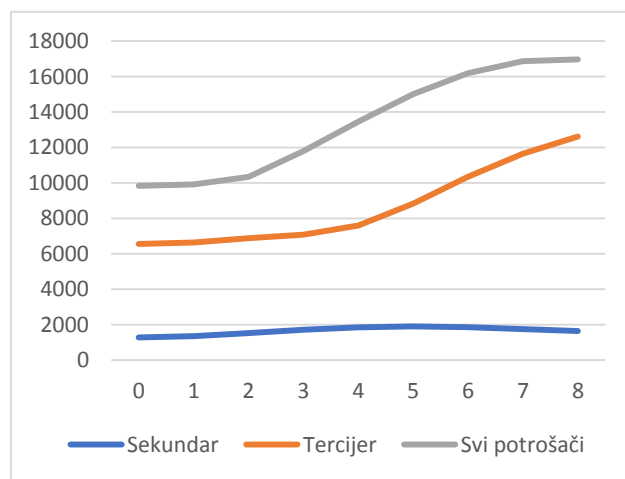
Diskretna regulacija			Kontinualna regulacija		
Napon [kV]	Opt. poz.	Šteta [n.j]	Napon [kV]	Opt. poz.	Šteta [n.j]
110	8	1281.20	120.2	0	1281.20
110	12	6551.60	130.0	0	5285.99
110	12	9834.93	125.6	0	9795.54

Sa grafika se vidi da su vrednosti štete dobijene diskretnom regulacijom uvek veće od vrednosti dobijenih kontinualnom regulacijom. To se dešava zbog toga što se

minimalna vrednost štete dobijena kontinualnom regulacijom određuje tako što se napon korena menja u veoma malim koracima. Kako su promene napona na sekundaru i tercijeru dosta manje, postižu se bolje vrednosti napona, a samim tim je i šteta je manja.

4.4 Minimalna šteta u zavisnosti od promene snage DG

Razmatra se zavisnost štete od promene snage DG, pri čemu su pozicije regulacione sklopke fiksirane na prethodno određenim optimalnim vrednostima – vrednosti koje su prikazane u delu 4.2. Snaga DG se menja od 0 MW do 8 MW. Na slici 4.4, prikazana je zavisnost štete od promene snage DG (y osa - šteta, x osa - snaga DG.). Plavom bojom je prikazana zavisnost štete od snage DG za sve potrošače koji se napajaju preko sekundara Tr. Narandžastom bojom uvaženi su samo potrošači koji se napajaju preko tercijera Tr, dok je sivom bojom prikazana ukupna šteta, koja obuhvata sve potrošače razmatrane mreže.



Slika 4.4 – Zavisnost štete od promene snage DG

U tabeli 4.4 prikazani se su vrednosti za sledeći primer: ukupna snaga potrošača na izvodu je $S_p = (4+j2)$ MVA, a optimalne pozicije regulacione sklopke za potrošače na sekundaru, tercijeru i sve potrošače DM su 8, 12 i 12, respektivno. Zelenom bojom prikazane su minimalne, a ljubičastom maksimalne vrednosti štete.

Tabela 4.4 – Šteta u zavisnosti snage DG

S_G [MW]	Primar [n.j]	Sekundar [n.j]	Svi [n.j]
0	1281.20	6551.60	9834.93
1	1351.50	6636.37	9911.16
2	1528.82	6880.94	10335.23
3	1717.43	7082.34	11791.26
4	1852.56	7595.79	13458.84
5	1899.89	8830.00	15007.43
6	1855.92	10344.92	16194.63
7	1749.46	11651.93	16868.13
8	1644.34	12617.01	16972.38

Sa grafika se može uočiti da su vrednosti štete na tercijeru

znatno veće nego vrednosti štete na sekundaru. To se dešava zbog toga što su svi parametri i potrošnja na sekundaru i tercijeru isti, ali je struja na tercijeru duplo veća. Šteta je najveća kada se posmatra čitava mreža.

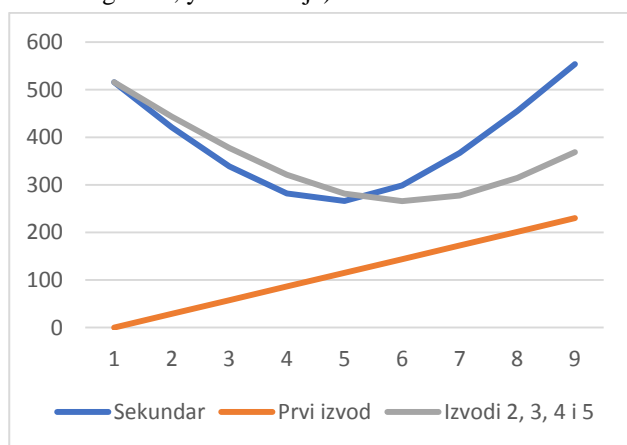
4.5 Uticaj promene snage DG na struje, napone i gubitke u mreži

Razmatra se zavisnost struje, napona i gubitaka snage od snage DG koja se menja u opsegu od 0 MW do 8 MW. U prikazanim primerima, ukupna snaga potrošača u čitavoj DM je (4+j2) MVA. Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 4.5. Zelena polja u tabeli označavaju minimalne, a ljubičasta maksimalne vrednosti struja.

Tabela 4.5 – Zavisnost struje od snage generatora

S_g [MW]	Struja na sekundaru Tr [A]	Struja na prvom izvodu [A]	Suma struja sa izvoda 2, 3, 4 i 5 [A]
0	515.88	0	515.88
1	420.82	28.75	443.57
2	338.87	57.5	377.46
3	281.81	86.25	321.46
4	266.24	115	281.73
5	298.8	143.75	265.73
6	366.99	172.5	277.67
7	455.14	201.25	314.48
8	553.88	230	368.87

Na slici 4.5 prikazana je zavisnost struje od snage DG (x osa - snaga DG, y osa - struja).



Slika 4.5 – Zavisnost struje od snage DG

Narandžastom linijom na grafiku prikazana je promena struje na prvom izvodu u zavisnosti od snage DG. Sa povećanjem snage DG, povećava se i struja. Povećanje struje je linearno, jer se na prvom izvodu nalazi samo DG.

Struja na sekundaru transformatora je prikazana plavom bojom. Kada je snaga DG 0 MW, nema proizvodnje i tada sva struja prelazi preko transformatora. Sa povećanjem snage DG, struja na sekundaru transformatora se smanjuje, jer sada deo snage dolazi i iz mreže. Struja se smanjuje do snage DG od 4 MW. Tada su proizvodnja i potrošnja aktivne snage u mreži iste i zbog toga struja ima minimalnu vrednost koja iznosi 266.24 A. Nakon toga, sa povećanjem proizvodnje, javlja se višak aktivne snage u

DM, pa se ta snaga vraća u prenosnu mrežu. Samim tim se struja na sekundaru transformatora povećava. Maksimalna vrednost iznosi 553.88 A i dostiže se za snagu DG od 8 MW.

Sivom linijom prikazana je ukupna struja na izvodima 2, 3, 4 i 5. Sa povećanjem proizvodnje DG, smanjuje se struja na izvodima. Njena vrednost se smanjuje sve do snage DG od 5 MW, kada dostiže minimalnu vrednost 265.73 A. Nakon toga ponovo počinje da se povećava. Kriva ima sličan oblik kao u drugom slučaju.

5 ZAKLJUČAK

Priključenje DG na sistem drastično menja prirodu postojeće radijalno napajane distributivne mreže, od pasivne u aktivnu. Priključenje DG u manjoj ili većoj meri, menjaju se tokovi snaga, utiče se na rad zaštitnih uređaja, nivo struja kratkog spoja, stabilnost sistema, kvaliteta regulacije napona, vrednost gubitaka snage u mreži, kvalitet električne energije, itd. U ovom radu je razmatran uticaj DG na rad klasične regulacije napona, u kojoj je zakon regulacije formiran bez prisustva DG.

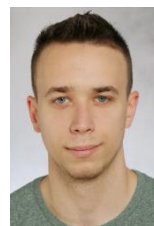
U skladu sa tim, priključenjem DG, regulacioni transformator ima lažnu sliku o ukupnom opterećenju svih potrošača koji se preko njega napajaju. Odnosno, priključenjem DG smanjuje se vrednost optimalne pozicije regulacione sklopke, i potrošačima se isporučuje električne energija sa naponom čija je vrednost ispod vrednosti koja je definisana zakonom regulacije.

Pored uticaja DG, na zakon regulacije veoma veliki uticaj ima činjenica da li se za određivanje minimalne štete posmatraju samo potrošači na sekundarnoj strani transformatora, ili se uvažavaju i potrošači napajani sa tercijera.

6 LITERATURA

1. G.Švenda: *Specijalizovani softveri u elektroenergetici*, skripta sa predavanja iz istoimenog predmeta na master studijama, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2019.
2. M.Jajčanin: *Izbor optimalnih pozicija regulatora napona u radijalnim distributivnim mrežama*, Master rad, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2016.
3. V. Strezoski: *Sistem regulacije napona distributivnih mreža*, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 1997.
4. G. Švenda: *Osnovi elektroenergetike – Matematički modeli i proračuni*; edicija: Tehničke nauke – Udžbenici, br. 177, FTN, Novi Sad, Novi Sad, 2007.

Kratka biografija:



Strahinja Bosančić rođen je u Novom Sadu 1995. godine. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu odbranio je 2019. godine u oblasti Elektrotehnika i računarstvo. Odmah po završetku osnovnih studija, upisuje master na smeru Elektroenergetski sistemi.