

INVERZNI TOK SNAGE U AKTIVNOJ DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

REVERSED POWER FLOW IN AN ACTIVE ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK

Vladica MIJAILOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak
Aleksandar RANKOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak

KRATAK SADRŽAJ

Tradicionalne distributivne mreže su realizovane uz pretpostavku jednoznačnog toka snage, od mreže višeg naponskog nivoa ka mreži nižeg naponskog nivoa. Kada se distribuirani generatori (DG) priključe na distributivnu mrežu ona postaje dvostrano napajana i napred pomenuta pretpostavka više ne važi.

DG bitno utiču, između ostalog, na naponske prilike, tokove snaga i struje kvarova. Efekti DG-a na mrežu mogu biti pozitivni ili negativni, zavisno od tipa, snage, mesta priključenja na mrežu i odnosa proizvodnje i potrošnje na datom izvodu.

U radu je analiziran slučaj kada proizvodnja DG-a premaši zahtevanu potrošnju u distributivnoj mreži i dođe do vraćanja snage u mrežu višeg naponskog nivoa, odnosno do inverznog toka snage. Dat je školski primer proračuna za jedan SN-izvod na kome je priključen DG (vrednost napona na napojnim sabirnicama i u tački priključenja DG-a za datu vrednost generisane snage) kao i pregled inostranih iskustava na datu temu.

Ključne reči: distributivna mreža- distribuirani generator- napon- energetski transformator- inverzan tok snage

ABSTRACT

Traditional electrical distribution networks are designed with the assumption of a unidirectional power flow, from a higher voltage level network to a lower voltage level network. When distributed generators (DG) are connected to the electrical distribution network, it becomes bidirectionally powered, and the aforementioned assumption no longer holds. DGs significantly influence, among other things, voltage conditions, power flows, and fault currents. The effects of DG on the network can be positive or negative, depending on the type, power, connection point in the network, and the production-consumption ratio at a given location. The paper analyzes the case when DG production exceeds the required consumption in the electrical distribution network, leading to power being fed back into the higher voltage level network, i.e., reversed power flow. A step-by-step calculation example is provided for a MV-feeder where a DG is connected (voltage value at the supply bus and at the DG connection point for a given generated power value), along with a review of foreign experiences on the subject.

Keywords: distribution network, distributed generator, voltage, distribution transformer, reversed power flow

Vladica Mijailović, vladica.mijailovic@ftn.kg.ac.rs
Aleksandar Ranković, aleksandar.rankovic@ftn.kg.ac.rs

1. UVOD

Struktura i vrste kontrole u postojećim distributivnim mrežama su realizovane uz pretpostavku jednoznačnog toka snage, od mreže višeg naponskog nivoa ka mreži nižeg naponskog nivoa. Međutim, svakodnevno povećanje broja i snage priključenih distribuiranih generatora (DG) na mrežu drastično menja pravila eksploatacije i principe planiranja.

Kada se DG priključuju na SN-mrežu postoji nekoliko kriterijuma po kojima se određuje dozvoljena snaga generatora (elektrane):

- ne sme da dođe do preopterećenja postojećih elemenata;
- napon u tački priključenja ne sme da premaši gornju vrednost dozvoljenog radnog napona za dati naponski nivo;

- snaga priključenih jedinica ne sme da premaši snagu napojne TS VN/SN pri ispunjenom kriterijumu „n-1“ sigurnosti. Imajući u vidu da su u napojnim TS VN/SN instalisani po jedan ili po dva energetska transformatora (ET), ovaj kriterijum se u praksi svodi na uslov da snaga priključenih DG-a ne bude veća od naznačene snage jednog ET.

Priključenje DG-a na postojeću distributivnu mrežu uzrokuje, između ostalog, probleme sa pojavom harmonika, prenapone, probleme sa koordinacijom uređaja relejne zaštite, povećanje vrednosti struje kvara kroz mesto kvara, promenu smera toka snage u normalnom režimu, probleme sa koordinacijom izolacije i probleme pri ulasku u ostrvski režim rada.

Svi napred nabrojani problemi su, u manjoj ili većoj meri, analizirani i uspešno rešeni. Međutim, jedan od problema koji još uvek izaziva kontradikcije u stavovima i proizvođača opreme i inženjera u eksploataciji je pojava vraćanja snage u mrežu višeg naponskog nivoa, odnosno pojava „inverznog toka snage“. Do ovoga dolazi kada proizvodnja priključenih DG-a premaši trenutnu potrošnju izvoda ili potrošačkog područja. Tok snage u suprotnom smeru može imati negativne posledice na rad energetskih transformatora, ukoliko za takav režim nisu predviđeni. Veliki broj proizvođača u tom slučaju ne garantuje ispravan rad energetskih transformatora.

Promena smera toka snage može uzrokovati promenu raspodele magnetnog fluksa, porast gubitaka i temperature, što, posledično, može dovesti do skraćanja životnog veka. Takođe, može doći do znatnog povećanja struje magnetčenja i pojave višeharmoničnih komponenti.

Uspostavljanje inverznog toka snage može predstavljati problem za ET sa automatskim regulatorima napona sa otporničkim premošćavanjem koji se standardno nalaze na višenaponskoj strani. Tada se sposobnost regulatora da obavi predviđenu funkciju smanjuje za $(30 \div 70)\%$ u odnosu na naznačenu snagu ET-a. Kod modernih regulatora sa divertorskim sklopovima ovo ograničenje ne postoji.

Kod svih vrsta regulatora kritično pitanje može da predstavlja primenjeni način kontrole napona. U većini slučajeva kontrolne šeme dobro funkcionišu i u slučaju inverznog toka snage. Problemi mogu da nastanu ako je u mreži primenjena mera kompenzacije linijskog pada napona i/ili su ugrađene redne kondenzatorske baterije. Obe mere se zasnivaju na merenju radne struje energetskog transformatora, tako da promena smera toka snage može imati posledice.

Savremeni regulatori imaju senzore za prepoznavanje inverznog toka snage, zbog čega se menja kontrolni algoritam. Promena se bazira na usvojenoj pretpostavci o toku snage iz napojne mreže prema niženaponskoj strani, tako da se pomenuti senzori koriste na izvodima na kojima su priključeni DG.

Problemi sa inverznim tokom snage mogu da se jave i na energetskim transformatorima sa ručnim regulatorima napona.

Pojedine kompanije imaju ugrađene zaštite koje ne dozvoljavaju inverzan tok snage.

Jedan od parametara koji određuju stabilnost i efektivnost EES-a je naponski profil, koji može bitno da se promeni nakon priključenja DG-a. Nedoovoljeno visok napon u tački priključenja će izvesno dovesti do promene smera toka snage. Prema praksi velikog broja elektrodistributivnih kompanija, prenaponska zaštita vrši isključenje ako napon dostigne vrednost $1,07 \cdot U_{ns}$. Kritične situacije nastaju tokom perioda „visoka proizvodnja distribuiranih izvora- mala potrošnja“.

Mogućnost uspostavljanja inverznog toka snage predstavlja veliki izazov kada su u pitanju realizacija i podešavanje sistema relejne zaštite. U tradicionalnim distributivnim mrežama uobičajene su, i veoma efikasne, prekostrujna i prenaponska zaštita. Međutim, u aktivnim distributivnim mrežama, sa promenljivim smerovima tokova snaga, pomenute vrste zaštite često pogrešno reaguju, što zahteva drugačiji pristup podešavanju i primenu složenijih vrsta relejnih uređaja. Neprecizno podešena relejna zaštita može biti uzrok nestabilnosti distributivnog sistema, zavisno od snage priključenih DG-a.

Promena smera toka snage može da dovede do preopterećenja elemenata mreže (energetskih transformatora i nadzemnih i kablovskih vodova), što izvesno generiše veće gubitke, smanjuje stepen efikasnosti i skraćuje životni vek opreme. Takođe, može doći do ugrožavanja kvaliteta isporučene električne energije (povećan napon, pojava višeharmoničnih komponenti)

Zbog preopterećenja elemenata može doći do „zagušenja mreže“, posebno ako u mreži dominiraju izvori čija proizvodnja zavisi od vremenskih prilika (FN-sistemi i vetroelektrane). Ukoliko ne postoji sistemski pristup prevaziđenju takvih situacija posledice mogu biti skupe i dugotrajne.

U nastavku ćemo analizirati naponski profil izvoda 10kV na koji je priključen DG i mogućnost vraćanja snage u mrežu 35kV kroz energetski transformator sa ručnim regulatorom napona. Analize su urađene za različite dužine izvoda i za poznato podužno opterećenje izvoda. Analizirani slučaj nije najrealniji, ali omogućava da se sagleda uticaj pojedinih činilaca i da se shvati suština problema. Takođe, na osnovu njega se mogu rešavati stvarni eksploatacioni problemi.

2. POSTAVKA PROBLEMA I PODACI

Izložićemo najpre postupak određivanja maksimalne snage DG-a koja može da se priključi na izvod datog naponskog nivoa, a da se ne premaši zadata vrednost napona u tački priključenja *PCC* (*Point of Common Coupling*) (to je, najčešće, najveći radni napon za dati naponski nivo). Dakle, posmatraćemo radijalno napajan izvod, naznačenog napona 10 kV i dužine L , čije opterećenje na početku iznosi: $\underline{S} = P + j \cdot Q$. Izvod se napaja iz TS $\frac{35}{10} \text{ kV/kV}$,

sl.1. Neka je opterećenje duž izvoda ravnomerno raspodeljeno, sl. 2, znači važi: $\underline{S}' = \frac{S}{L} = P_p + jQ_p$. Podužna

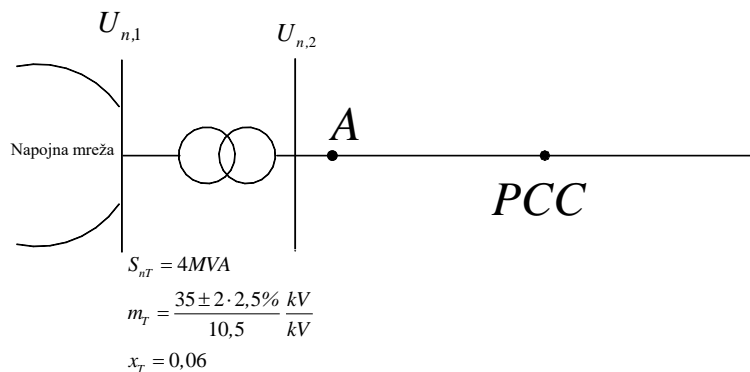
impedansa izvoda je $\underline{z} = \frac{R + j \cdot X}{L} \left(\frac{\Omega}{\text{km}} \right)$. Pod pretpostavkom da se napon na napojnim sabirnicama održava na

vrednosti U_2 izračunaćemo pad napona od njih do bilo koje tačke na vodu, na udaljenosti $l = \lambda \cdot L$, $\lambda \in [0,1]$.

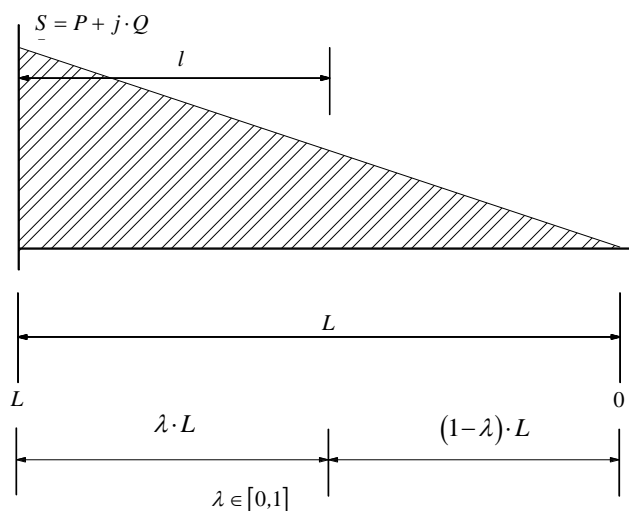
Dakle:

$$d(\Delta U_{-bez\ DG-a}) = \sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{-l} \cdot \underline{I}_{-l} = \sqrt{3} \cdot \underline{z} \cdot l \cdot \frac{\underline{S}^*}{\sqrt{3} \cdot U_2} \cdot dl \Rightarrow$$

$$\Delta U_{-bez\ DG-a} = \frac{R + jX}{L} \frac{P - jQ}{L \cdot U_2} \cdot \int_{L-\lambda L}^L l \cdot dl = \left(\frac{R \cdot P + X \cdot Q}{U_2} + j \frac{X \cdot P - R \cdot Q}{U_2} \right) \cdot \left(\lambda - \frac{\lambda^2}{2} \right)$$
(1)

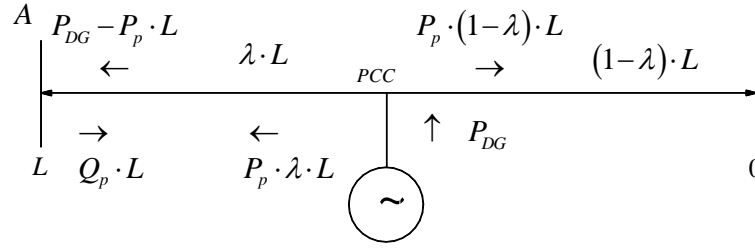


Slika 1 - Deo analiziranog distributivnog sistema



Slika 2 - Raspodela opterećenja duž izvoda

Analiziraćemo sada slučaj kada je na izvodu u nekoj tački priključen DG koji u mrežu injektira samo aktivnu snagu P_{DG} koja je veća od ukupne potrošnje P na izvodu $P_{DG} > P$. Znači, snaga $(P_{DG} - P)$ se vraća na sabirnice, sl. 3.

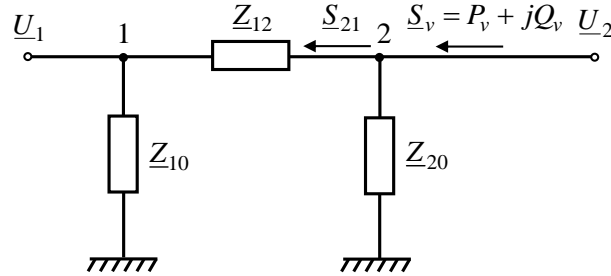
Slika 3 - Tokovi snaga po izvodu sa sl.1 za slučaja kada je $P_{DG} > P$

Konstatujemo da je napon U_{PCC} u tački PCC veći od napona U_2 na sabirnicama A . Pad napona za slučaj toka aktivne snage ka sabirnicama iznosi:

$$\begin{aligned} \Delta U_{-sa DG} &= U_{-PCC} - U_{-2} = \frac{R + jX}{L} \left(\frac{P_{DG}}{U_2} \cdot \int_{L-\lambda \cdot L}^L dl - \frac{P - jQ}{L \cdot U_2} \cdot \int_{L-\lambda \cdot L}^L l \cdot dl \right) = \\ &= (R + jX) \cdot \frac{P_{DG}}{U_2} \cdot \lambda - \Delta U_{-bez DG-a} \end{aligned} \quad (2)$$

Na kraju, na sl.4 je data zamenska šema regulacionog transformatora sa sl.1, da bismo analizirali najnepovoljniji slučaj: ako na sabirnicama nema drugih izvoda koji bi preuzeli snagu $(P_{DG} - P)$ kroz energetski transformator će se uspostaviti tok aktivne snage suprotnog smera u odnosu na predviđeni. Kao što je dato na sl. 1, regulator napona na strani $35kV$ ima 5 regulacionih otecpa $n = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$, vrednost jednog otecpa je $\Delta t = 0,025$. Vrednosti impedansi na sl. 4 se računaju prema sledećim izrazima:

$$Z_{-T} = j \cdot x_T \cdot \frac{U_{nT}^2}{S_{nT}} \quad , \quad t = 1 + n \cdot \Delta t \quad , \quad Z_{-10} = \frac{t^2}{1-t} \cdot Z_{-T} \quad , \quad Z_{-12} = t \cdot Z_{-T} \quad , \quad Z_{-20} = \frac{t}{1-t} \cdot Z_{-T} \quad (3)$$



Slika 4 - Zamenska šema regulacionog transformatora

Na sl. 4 su:

$$P_v = P_{DG} - P = P_{DG} - P_p \cdot L \quad , \quad Q_v = -Q_p \cdot L \quad (4)$$

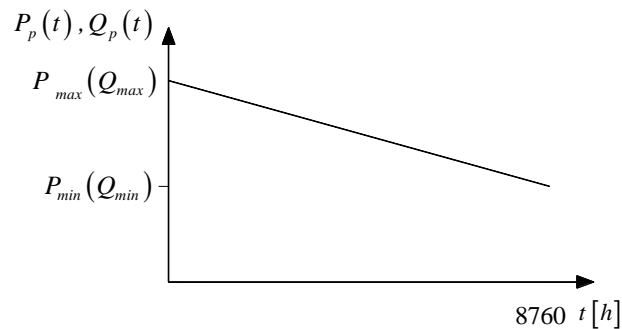
Takođe, usvojili smo da je $U_{-2} = U_2 |0^0$ tako da važi:

$$S_{-21} = S_{-v} - \frac{U_2^2}{Z_{-20}^*} \quad , \quad \Delta U_{-21} = \sqrt{3} \cdot Z_{-12} \cdot \frac{S_{-21}^*}{\sqrt{3} \cdot U_2} \quad , \quad U_{-1} = U_2 - \Delta U_{-21} \quad (5)$$

3. REZULTATI ANALIZA

Cilj sprovedenih analiza je da utvrdimo šta će se desiti u sistemu ukoliko proizvodnja DG-a bude veća od potrošnje na izvodu na koji je DG priključen. Imajući u vidu naponska ograničenja i postojanje relejne zaštite, analizirali smo naponske prilike na izvodu u režimu „maksimalna proizvodnja DG-a – minimalna potrošnja“ i ponašanje energetskog transformatora sa ručnim regulatorom u kontekstu mogućnosti da dođe do inverznog toka snage.

Odredićemo maksimalnu snagu DG-a koja se može priključiti na mrežu, sl. 1, u zavisnosti od mesta postavljanja, ako je maksimalna vrednost radnog napona na vodu ograničena na $U_{PCC} = 1,05 \cdot U_{n,2}$. Linearizovani dijagram trajanja opterećenja voda dat je na sl.5.



Slika 5 - Linearizovani dijagram trajanja opterećenja voda

Podužna impedansa izvoda je $\underline{z} = (0,309 + j0,329) \frac{\Omega}{km}$ a maksimalna i minimalna podužna opterećenja su:

$S'_{-max} = P_{pmax} + jQ_{pmax} = (200 + j100) \frac{kVA}{km}$, $S'_{-min} = P_{pmin} + jQ_{pmin} = (100 + j50) \frac{kVA}{km}$. Analize su urađene za slučaj bez kompenzacije i za slučaj sa kompenzacijom reaktivne snage za tri vrednosti dužine izvoda: 18 km, 10 km i 5 km, uz uslov da se napon na sabirnicama (sekundarnim krajevima energetskog transformatora) održava u propisanim granicama.

Vrednost snage DG-a koja može da se priključi na izvod se određuje na osnovu maksimalnog i minimalnog opterećenja izvoda. Maksimalne snage koja mogu da se priključe tokom pojedinih perioda, a da pri tome ne dođe do preopterećenja i/ili vraćanja snage u mrežu, za pojedine dužine izvoda iznose:

$L [km]$	$P_{DG,max} [MW]$	$P_{DG,min} [MW]$
18	3,6	1,8
10	2	1
5	1	0,5

Sada ćemo posmatrati sledeći slučaj: Na izvodu je ostala priključena snaga $P_{DG,max}$ a opterećenje je minimalno P_{min} i Q_{min} , što predstavlja pomenuti kritičan slučaj „visoka proizvodnja distribuiranih izvora- mala potrošnja“. Analiziraćemo naponske prilike na izvodu uz uslov da napon na sabirnicama ima jednu od sledećih vrednosti: 9,5 kV, 10 kV ili 10,5 kV. Prenaponska zaštita neće reagovati sve dok je napon u tački priključenja manji od 10,7 kV. Vrednosti napona U_{PCC} za analizirane slučajeve date su u Tabelama 1, 2 i 3.

Podvučene “boldirane” vrednosti se odnose na slučajeve kada će reagovati zaštita, što znači da su to situacije za koje zaključujemo da ne smeju da se dozvole. U ostalim slučajevima postoji mogućnost da će doći od vraćanja snage u mrežu, što ćemo takođe analizirati. Primetimo da problema sa nedozvoljenim vrednostima napona nema na kratkim izvodima.

Tabela 1 - Vrednosti napona u tački priključenja za slučaj „maksimalna proizvodnja DG-a- mala potrošnja na izvodu“ za dužinu izvoda $L = 18 km$, $P_{DG,max} = 3,6 MW$

$L = 18 km$	Bez kompenzacije reaktivne snage na izvodu			Sa kompenzacijom reaktivne snage $\cos \varphi = 1$		
	Napon na sabirnicama			Napon na sabirnicama		
Udaljenost λ tačke PCC od napojnih sabirnica	9,5 kV	10 kV	10,5 kV	9,5 kV	10 kV	10,5 kV
	$U_{PCC} [kV]$			$U_{PCC} [kV]$		
0,01	9,51	10,00	10,50	9,51	10,01	10,51
0,1	9,56	10,06	10,55	9,61	10,10	10,60
0,2	9,64	10,13	10,62	9,74	10,22	10,71
0,3	9,73	10,22	10,71	9,87	10,35	10,83
0,4	9,85	10,33	10,81	10,02	10,49	10,97

0,5	9,99	10,46	10,94	10,18	10,65	11,11
0,6	10,14	10,61	11,07	10,36	10,81	11,27
0,7	10,32	10,77	11,23	10,55	10,99	11,44
0,8	10,52	10,96	11,41	10,75	11,18	11,62
0,9	10,74	11,16	11,60	10,97	11,39	11,82
1	10,97	11,38	11,80	11,21	11,61	12,02

Na kraju, izračunaćemo napon na krajevima energetskog transformatora, prema sl. 4, u situacijama kada postoji mogućnost da dođe do vraćanja aktivne snage u mrežu 35 kV , na osnovu podataka koji se imaju u prethodno analiziranim slučajevima:

s-1) za izvod dužine $L = 18\text{ km}$ višak aktivne snage iznosi $3,6\text{ MW} - 0,1 \cdot 18\text{ MW} = 1,8\text{ MW}$, a u slučaju da nije sprovedena kompenzacija reaktivne snage iz mreže se uzima $0,05 \cdot 18\text{ MVar} = 0,9\text{ MVar}$. Dakle, saglasno oznakama i smerovima sa sl. 4: $S_{-v} = (1,8 - j \cdot 0,9)\text{ MVA}$ - bez kompenzacije i $S_{-v} = 1,8\text{ MVA}$ - za slučaj da je sprovedena kompenzacija reaktivne snage.

s-2) za izvod dužine $L = 10\text{ km}$ višak aktivne snage iznosi $2\text{ MW} - 0,1 \cdot 10\text{ MW} = 1\text{ MW}$, a u slučaju da nije sprovedena kompenzacija reaktivne snage iz mreže se uzima $0,05 \cdot 10\text{ MVar} = 0,5\text{ MVar}$. Dakle, saglasno oznakama i smerovima sa sl. 4: $S_{-v} = (1 - j \cdot 0,5)\text{ MVA}$ - bez kompenzacije i $S_{-v} = 1\text{ MVA}$ - za slučaj da je sprovedena kompenzacija reaktivne snage.

s-3) za izvod dužine $L = 5\text{ km}$ višak aktivne snage iznosi $1\text{ MW} - 0,1 \cdot 5\text{ MW} = 0,5\text{ MW}$, a u slučaju da nije sprovedena kompenzacija reaktivne snage iz mreže se uzima $0,05 \cdot 5\text{ MVar} = 0,25\text{ MVar}$. Dakle, saglasno oznakama i smerovima sa sl. 4: $S_{-v} = (0,5 - j \cdot 0,25)\text{ MVA}$ - bez kompenzacije i $S_{-v} = 0,5\text{ MVA}$ - za slučaj da je sprovedena kompenzacija reaktivne snage.

Tabela 2 - Vrednosti napona u tački priključenja za slučaj „maksimalna proizvodnja DG-a- mala potrošnja na izvodu“ za dužinu izvoda $L = 10\text{ km}$, $P_{DG,max} = 2\text{ MW}$

$L = 10\text{ km}$	Bez kompenzacije reaktivne snage na izvodu			Sa kompenzacijom reaktivne snage $\cos \varphi = 1$		
	Napon na sabirnicama			Napon na sabirnicama		
Udaljenost λ tačke PCC od napojnih sabirnica	9,5 kV	10 kV	10,5 kV	9,5 kV	10 kV	10,5 kV
	$U_{PCC} [\text{kV}]$			$U_{PCC} [\text{kV}]$		
0,01	9,50	10,00	10,50	9,50	10,22	10,50
0,1	9,52	10,02	10,52	9,53	10,03	10,53
0,2	9,54	10,04	10,54	9,57	10,07	10,56
0,3	9,57	10,07	10,56	9,61	10,11	10,60
0,4	9,60	10,10	10,59	9,66	10,15	10,64
0,5	9,64	10,13	10,63	9,71	10,19	10,69
0,6	9,69	10,18	10,67	9,76	10,24	10,73
0,7	9,74	10,22	10,71	9,81	10,30	10,78
0,8	9,79	10,28	10,76	9,87	10,35	10,83
0,9	9,85	10,33	10,82	9,93	10,41	10,89
1	9,92	10,40	10,88	10,00	10,47	10,95

Tabela 3 - Vrednosti napona u tački priključenja za slučaj „maksimalna proizvodnja DG-a- mala potrošnja na izvodu“ za dužinu izvoda $L = 5\text{ km}$, $P_{DG,max} = 1\text{ MW}$

$L = 5\text{ km}$	Bez kompenzacije reaktivne snage na izvodu			Sa kompenzacijom reaktivne snage $\cos \varphi = 1$		
	Napon na sabirnicama			Napon na sabirnicama		
Udaljenost λ tačke PCC od napojnih sabirnica	9,5 kV	10 kV	10,5 kV	9,5 kV	10 kV	10,5 kV
	$U_{PCC} [\text{kV}]$			$U_{PCC} [\text{kV}]$		
0,01	9,50	10,00	10,50	9,50	1,00	10,50

0,1	9,50	10,00	10,50	9,51	10,01	10,51
0,2	9,51	10,01	10,51	9,52	10,02	10,52
0,3	9,52	10,02	10,51	9,53	10,03	10,52
0,4	9,52	10,02	10,52	9,54	10,04	10,3
0,5	9,53	10,03	10,53	9,55	10,05	10,55
0,6	9,54	10,04	10,54	9,56	10,06	10,56
0,7	9,56	10,05	10,55	9,58	10,07	10,57
0,8	9,57	10,07	10,56	9,59	10,09	10,58
0,9	6,58	10,8	10,58	9,61	10,10	10,60
1	9,60	10,10	10,59	9,62	10,12	10,61

Pod uslovom da se na napojnim sabirnicama održava napon 9,5kV ili 10kV ili 10,5kV izračunali smo koliki napon U_1 [kV] bi trebalo da bude na primarnoj strani u zavisnosti od položaja regulacionog otepa, Tabele 4, 5 i 6. Ako imamo u vidu da je dozvoljena varijacija napona $\pm 5\%$ u odnosu na naznačeni napon, na strani 35kV napon mora biti u opsegu $[33,25 \div 36,75]$ kV. U Tabelama 4, 5 i 6 podvučene i „boldirane“ vrednosti ne mogu biti ostvarene jer nisu u dozvoljenom opsegu, dakle reagovala bi, u većini slučajeva, podnaponska zaštita ili nadnaponska (u jednom slučaju). Ovdje nije uzeto u obzir postojanje drugih izvoda koji mogu da preuzmu višak snage, čime bi problemi prividno bili rešeni.

Tabela 4 - Potrebna vrednost napona U_1 [kV] na primarnim krajevima energetskog transformatora za slučaj s-1) u zavisnosti od položaja regulacionog otepa

n	Bez kompenzacije reaktivne snage			Sa kompenzacijom reaktivne snage		
	Zahtevani napon na sekundarnim krajevima			Zahtevani napon na sekundarnim krajevima		
	9,5kV	10kV	10,5kV	9,5kV	10kV	10,5kV
U_1 [kV]			U_1 [kV]			
-2	30,5	32,1	33,71	30,09	31,68	33,26
-1	31,3	32,95	34,60	30,88	32,51	34,14
0	32,1	33,79	365,48	31,68	33,34	35,01
1	32,91	34,64	36,37	32,47	34,18	35,89
2	33,71	35,48	37,26	33,26	35,00	37,76

Tabela 5 - Potrebna vrednost napona U_1 [kV] na primarnim krajevima energetskog transformatora za slučaj s-2) u zavisnosti od položaja regulacionog otepa

n	Bez kompenzacije reaktivne snage			Sa kompenzacijom reaktivne snage		
	Zahtevani napon na sekundarnim krajevima			Zahtevani napon na sekundarnim krajevima		
	9,5kV	10kV	10,5kV	9,5kV	10kV	10,5kV
U_1 [kV]			U_1 [kV]			
-2	30,31	31,90	33,50	30,00	31,67	33,25
-1	31,11	32,70	34,38	30,88	32,50	34,13
0	31,90	33,59	35,27	31,67	33,34	35
1	32,7	34,43	36,15	32,46	34,17	35,88
2	33,5	35,27	37	33,25	35,00	36,75

Tabela 6 - Potrebna vrednost napona U_1 [kV] na primarnim krajevima energetskog transformatora za slučaj s-3) u zavisnosti od položaja regulacionog otepa

n	Bez kompenzacije reaktivne snage			Sa kompenzacijom reaktivne snage		
	Zahtevani napon na sekundarnim krajevima			Zahtevani napon na sekundarnim krajevima		
	9,5kV	10kV	10,5kV	9,5kV	10kV	10,5kV
U_1 [kV]			U_1 [kV]			
-2	30,20	31,79	33,37	30,08	31,67	33,25
-1	30,99	32,62	34,25	30,87	32,5	34,13

0	31,79	33,46	35,13	31,67	33,34	35
1	32,58	34,29	36,01	32,46	34,17	35,88
2	33,37	35,13	36,89	33,25	35,00	36,75

4. ZAKLJUČAK

U radu je izvršena teorijska analiza problema koji mogu da se jave u aktivnim distributivnim mrežama, usled proizvodnje DG-a koja je veća od potrošnje. Analiza je urađena na školskom primeru jednog izvoda, da bi se uočio uticaj nekih parametara kada su u pitanju mogući prenaponi i mogućnost vraćanja snage u mrežu višeg napona. Na osnovu sprovedenih analiza možemo da zaključimo sledeće:

- Problemi sa prenaponima su više izraženi na dugim izvodima. Na izvodima prosečne dužine za dati naponski nivo ovih problema nema.
- vraćanje snage u mrežu višeg naponskog nivoa je tehnički neodrživo, imajući u vidu vrednost napona koju treba imati na primarnoj strani energetskeg transformatora.
- problema sa vrednošću napona neće biti ukoliko na napojnim sabirnicama ima priključenih izvoda koji će preuzeti višak proizvedene snage.

LITERATURA

- [1] Daisuke Iioka et al, "Voltage reduction due to reverse power flow in distribution feeder with photovoltaic system", *Electrical Power and Energy Systems* 113 (2019) 411–418
- [2] *Studies on the Effects of High Renewable Penetrations on Driving Point Impedance and Voltage Regulator Performance*, Technical Report, NREL/TP-5D00-70517, January 2018.
- [3] P. Upadhyay et al, "Distributed Energy Resources (DERs): Impact of Reverse Power Flow on Transformer", *Cigre Science & Engineering*, N°19 October 2020.
- [4] A. S. Akinyemi et al, "Analysis of voltage rise phenomena in electrical power network with high concentration of renewable distributed generations", *Scientific Reports*, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11765-w>, 2020.
- [5] *Capacity of distribution feeders for hosting DER*, CIGRE WG C6.24, June 2014.
- [6] Mahmud, MA et al, "Voltage Control of Distribution Networks with Distributed Generation using Reactive Power Compensation", *IECON 2011: 37th annual conference on IEEE industrial electronics society*
- [7] L.M. Cipcigan and P.C. Taylor, "Investigation of the reverse power flow requirements of high penetrations of small-scale embedded generation", *The Institution of Engineering and Technology* 2007, doi:10.1049/iet-rpg:20070011
- [8] E. Eiriksson, "Distribution grid capacity for reactive power support", Degree project in electrical engineering, Second cycle, KTH, Stockholm, Sweden 2017.
- [9] A. Monga, "Voltage Regulation in Electric Distribution Grid Integrated with Distributed Energy Resources", MSc Thesis – Department of Energy Technology, Aalborg University, 2021.
- [10] D. da C. Pinheiro et al, "Robust Local Inhibitor of Reverse Power Tap Changer Runaway Events in Reconfigurable and Active Distribution Networks", DOI 10.1109/TPWRD.2021.3071865, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2021.
- [11] V. Mijailović, "Distribuirani izvori i sistemi za distribuciju električne energije", *Akademski misao*, Beograd, 2019.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-66 / 2024-03 / 200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerzitet u Kragujevcu.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia, and these results are parts of the Grant No. 451-03-66 / 2024-03 / 200132 with University of Kragujevac - Faculty of Technical Sciences Čačak.