Broj rada: R2-02
DOI:10.46793/CIRED2026.R2-02_119

UTICAJ DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE NA KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE KORIŠĆENJEM NESIMETRIČNIH INVERTORA SMANJENJEM NESIMETRIJE OPTEREĆENJA U NISKONAPONSKOJ MREŽI

THE INFLUENCE OF DISTRIBUTED GENERATION USING ASYMMETRICAL INVERTERS ON THE QUALITY OF ELECTRICAL ENERGY BY REDUCING LOAD ASYMMETRY IN THE LOW-VOLTAGE NETWORK

Siniša SPREMIĆ, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Srbija*
Aleksandar ANTONIĆ, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U većem delu niskonaponske distributivne mreže je prisutna manja ili veća amplitudna nesimetrija opterećenja po fazama. Ovo uzrokuje dodatne gubitke u niskonaponskim faznim provodnicima i u neutralnom provodniku i amplitudno nesimetrične fazne napone. Jedna od mera koje bi mogle da pomognu u rešavanju nesimetrije opterećenja je korišćenje nesimetričnih invertora. Nesimetrični invertori su prvenstveno osmišljeni da kod trofaznih kupaca-proizvođača (prozjumera) koji imaju distribuiranu proizvodnju i koja je na niskom naponu uglavnom fotonaponske prirode omoguće da se proizvedena električna snaga iskoristi bez obzira na nesimetričnu potrošnju prozjumera. Nesimetrični invertor može davati različite električne snage po fazama kako bi svu ili većinu proizvedene snage iskoristio prozjumer u vreme kada je distribuirana proizvodnja prisutna uz zanemarenje mogućnosti korišćenja skladištenja električne energije. Nesimetrični invertori se koriste zbog velike razlike u cenama električne energije koja je značajno veća kada prozjumer koristi električnu energiju od distributera nego kada on električnu energiju isporučuju u niskonaponsku distributivnu mrežu. Nesimetrični invertori bi se mogli koristiti za smanjenje nesimetrije napona u niskonaponskim mrežama kod prozjumera koji isporučuju električnu energiju u niskonaponsku mrežu. Za ovo je neophodan odgovarajući algoritam koji bi prepoznao u koju od faza se treba isporučiti veća snaga. Dati su rezultati proračuna u kojima se vide koristi od korišćenja nesimetričnih invertora u pogledu poboljšanja i ujednačavanja vrednosti napona po fazama duž niskonaponskog voda i smanjenja gubitaka električne energije u vreme kad postoji distribuirana proizvodnja.

Ključne reči: Nesimetrični invertor, Niskonaponski, Vod, Prozjumer, Napon

ABSTRACT

In most of the low-voltage distribution network, there is a smaller or larger load asymmetry per phase. This causes additional losses in the low-voltage phase lines and in the neutral conductor and amplitude-asymmetrical phase voltages. One of the measures that could help to solve the load asymmetry is the use of asymmetrical inverters. Asymmetrical inverters are primarily

* Siniša Spremić, sinisa.spremic@es.rs; Aleksandar Antonić, aleksandar.antonic@es.rs

designed for three-phase producers/consumers (prosumers) who have distributed production and which is mainly of a photovoltaic nature at low voltage, to allow the produced electrical power to be used regardless of asymmetrical consumption of the prosumer. An asymmetrical inverter can provide different electrical powers per phase so that all or most of the produced power is used by the consumer at a time when distributed generation is present, neglecting the possibility of using electrical energy storage. Asymmetrical inverters are used because of the large difference in electricity prices, which is significantly higher when the consumer uses electricity from the distributor than when he injects the electricity into the low-voltage distribution network. Asymmetrical inverters could be used to reduce asymmetry in low-voltage networks with distributed prosumers supplying electricity to the low-voltage distribution network. For this, a suitable algorithm is necessary, which would recognize in which of the phases the greater power should be delivered. The results of the calculations are given, which show the benefits of using asymmetric inverters in terms of improving and symmertization the voltage per phase along the low-voltage line and reducing the losses of electricity at the time when there is distributed production.

Keywords: Asymmetrical inverter, Low voltage, Line, Prosumer, Voltage

UVOD

Fotonaponski paneli za proizvodnju električne energije se već duže vreme koriste za sopstvene potrebe i/ili za isporuku u elektrodistributivnu ili prenosnu mrežu. Elektrodistributivni potrošači na niskonaponskoj (u daljem tekstu: NN) distributivnoj mreži u većini slučajeva za distribuiranu proizvodnju (u daljem tekstu: DG – skraćenica od Distributed Generation) koriste solarne panele za podmirivanje sopstvene potrošnje, ali i za isporuku električne enregije u NN elektrodistributivnu mrežu. Potrošači koji imaju proizvodnju električne energije koju isporučuju NN distributivnoj mreži se zovu prozjumeri (kupci-proizvođači). Retko koriste baterije za čuvanje električne energije da bi je isporučivali u NN distributivnu mrežu zbog visoke cene, već samo za svoje potrebe manje rezerve u slučaju nestanka napajanja sa NN distributivne mreže. U razdobljima proizvodnje električne energije iz solarnih panela sa simetričnim invertorima prozjumer bi deo snage iskoristio za sopstvenu potrošnju. Zbog neravnomernosti potrošnje po fazama prozjumera deo snage u manje opterećenoj ili manje opterećenim fazama prozjumera bi se isporučivao u distributivnu mrežu. U nekim zemljama je odnos cene električne energije preuzete iz distributivne mreže u odnosu na cenu električne energije isporučene u distributivnu mrežu visok, npr. prozjumer za preuzetu električnu energiju plaća deset dinara, a za isporučenu električnu energiju u distributivnu mrežu mu se obračuna dva dinara. Kako bi prozjumer u najvećoj meri iskoristio proizvedenu električnu energiju bez isporuke NN distributivnoj mreži po manjoj ceni koriste se nesimetrični invertori koji raspoređuju snagu po fazama kako najbolje odgovara prozjumeru. Već na ovaj način se delom utiče na smanjenje amplitudne nesimetrije na NN distributivnoj mreži. Bez obzira na to u mnogim slučajevima može da postoji višak snage koju prozjumer isporučuje NN distributivnoj mreži. Ta snaga bi se mogla iskoristiti za ujednačavanje opterećenja po fazama NN vodova, tj. smanjenje nesimetrije opterećenja koja je uzrok nesimetrije napona u NN distributivnoj mreži i povećanih gubitaka snage i energije. Kao što postoji algoritam za maksimalno korišćenje električne energije kod samog prozjumera u nesimetričnom invertoru se može napraviti algoritam čime bi se mogući višak snage prozjumera isporučio u NN distributivnu mrežu na način da se smanji nesimetrija opterećenja na NN vodu, smanje padovi napona na NN vodu i ujednače fazni naponi. Prvenstvo bi imale potrebe samog prozjumera, a preostalo bi se isporučivalo u NN distributivnu mrežu.

Simetrični invertor od 6 kW može po fazi maksimalno dati 2 kW. Nesimetrični invertor može po fazi dati veću snagu od 2 kW što zavisi od izvedbe, a ukupna snaga invertora ostaje na 6 kW. Postojeći nesimetrični invertori uglavnom mogu po fazi da daju 50% veću snagu od trećine nazivne snage invertora. Za nazivnu snagu nesimetričnog inverora od 6 kW bi invertor u prvoj fazi mogao dati maksimalno 3 kW dok bi za preostale dve faze ostalo 3 kW. Razvijaju se i nesimetrični invertori koji bi po fazi mogu da daju i 100% od trećine nazivne snage nesimetričnog invertora.

Prikazani su rezultati proračuna u kojima se vide koristi od korišćenja nesimetričnih invertora u pogledu poboljšanja i ujednačavanja napona po fazama duž NN voda u vreme kad postoji DG, a takođe i smanjenja gubitaka. Dati su rezultati proračuna i dijagrami struja, napona i delom gubitaka uz sledeće pretpostavke: simetrično opterećenje bez DG, nesimetrično opterećenje bez DG i nesimetrično opterećenje sa DG koja uravnotežuje opterećenja u čvoru u kojem se nalazi DG. Ovime se prave greške u odnosu na stvarno stanje zbog zanemarenja moguće nesimetrije i vrednosti napona na početku voda zbog padova napona u transformatoru, zbog uslova opterećenosti nadređenog naponskog nivoa i podešenja automatske regulacije napona na transformatorima sa regulacionom sklopkom pod opterećenjem pa naponi mogu biti nesimetrični i viši i niži od pretpostavljenih 230 V. Sve prethodno navedene pretpostavke odudaraju od stvarnih parametara pojedinih NN izvoda. Bez obzira na greške mogu da se sagledaju dobici u veličini i ujednačenosti vrednosti faznih napona i smanjenju gubitaka korišćenjem DG sa nesimetričnim invertorima priključenim na NN vodove.

1 MODEL I REZULTATI PRORAČUNA

U nastavku ovog poglavlja su prikazani model i rezultati proračuna.

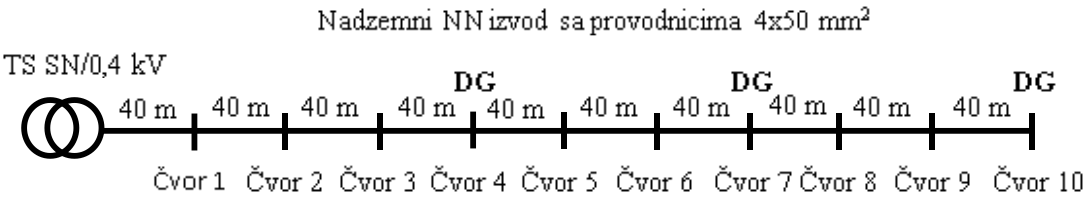
1.1 Pretpostavke i opis modela proračuna

Pretpostavke za izradu modela proračuna su sledeće:
- međufazni napon na početku voda (0,4 kV sabirnice transformatorske stanice (u daljem tekstu: TS)) je simetričan i po fazi i po veličini i iznosi 400 V,
- razmatraju se samo ustaljeni režimi bez kvarova,
- struja potrošača se zadaje sa faktorom snage, tj. faznim uglom struje potrošača u odnosu na početni napon na 0,4 kV sabirnicama TS x/0,4 kV. Time je stvarni fazni ugao između napona i struje potrošača različit od zadatog i u proračunu se izračunava i prikazuje,
- neutralni provodnik je iste vrste provodnika i preseka kao fazni provodnici (što je stvarno stanje na najvećem delu mreže) i za gubitke je bitno u slučaju nesimetričnog opterećenja,
- podaci o radnom i induktivnom otporu provodnika su korišćeni iz fortranskih paketa računarskih programa za izračunavanje gubitaka u elementima mreže, J.P. Elektrovojvodina, 1992.

Zanemarenja koja su korišćena za pojednostavljenje modela proračuna prikazanog u [1]:
- zanemaruju se kapacitivnosti vodova zbog malog uticaja na rezultat proračuna,
- zanemaruje se uticaj višestrukog uzemljenja neutralnog provodnika zbog malog uticaja na struju kroz neutralni provodnik u ustaljenom režimu bez kvara [2],
- ne razmatra se povećanje gubitaka usled povećanja temperature provodnika,
- kod nadzemnih vodova se zanemaruje uticaj na nesimetriju faznog provodnika (posebno izvedenog) za javno osvetljenje koji je obično manjeg preseka od provodnika voda, a javno osvetljenje koristi nulti provodnik NN izvoda.

1.2 Podaci i rezultati proračuna

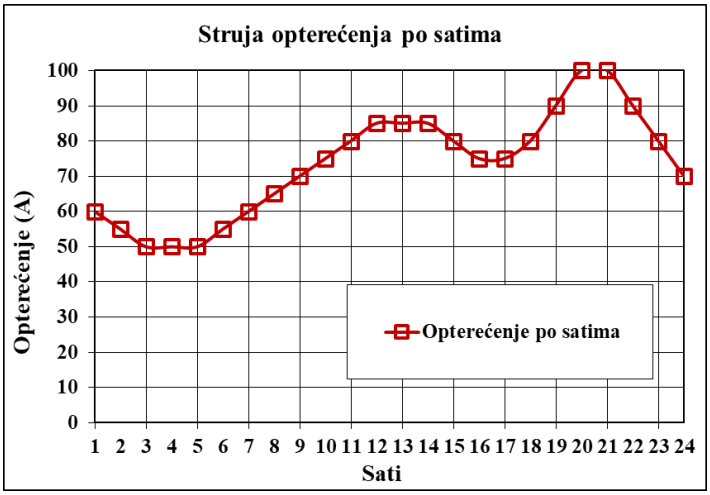
Mora se napomenuti da se napon na 0,4 kV sabirnicama TS x/0.4 kV menja zbog promene napona na višenaponskoj strani transformatora i zbog pada napona na impedansi transformatora, ali je zbog jednostavnijeg prikaza to zanemareno. U proračun [2] su ubačeni podaci o NN nadzemnom izvodu sa presekom provodnika od 50 mm^2 i za fazne i za neutralni provodnik što je još uvek najčešća vrsta NN nadzemnog voda. NN izvod se sastoji od 10 deonica dužine od po 40 m, ukupno 400 m sa sabirnicom i deset čvorova. Na Slici 1 je prikazana jednopona šema NN izvoda korišćenog u proračunu sa podacima. U nekim proračunima postoji DG u svim označenim čvorovima, a u nekim ne postoji DG.



Slika 1 – Jednopolna šema NN izvoda sa podacima

Sagledavanjem potrošnje pojedinačnog domaćinstva procenjeno je da je prosečna potrošnja električne energije pojedinačnog potrošača iz kategorije domaćinstvo (uvećano za uticaj potrošača iz kategorije ostala potrošnja) oko 500 kWh mesečno odnosno 6000 kWh godišnje. Pretpostavka je da je na NN izvodu u proseku 30 potrošača sa 3 niskonaponska izvoda po TS [3]. Pretpostavljeno maksimalno jednovremeno opterećenje pojedinačnog potrošača je oko 2,3 kVA. Faktor snage potrošača je 0,95.

Na Slici 2 je prikazan pretpostavljeni prosečan dijagram simetričnog opterećenja NN izvoda bez izvora, tj. solarnih panela. Maksimalna struja opterećenja je 100 A u večernjim satima, a minimalna 50 A u posleponoćnim satima.



Slika 2 - Dijagram struje NN izvoda bez izvora

Uz pretpostavku da prozjumeri koriste samo fotonaponske panele za proizvodnju električne energije njihov uticaj postoji samo u razdoblju osunčanosti. Uticaj je na severnoj polulopti Zemlje značaniji u letnjem razdoblju, a manje značajan u zimskom razdoblju. Zbog promena

navika i potreba potrošača pojavom klima uređaja korišćenje fotonaponskih panela ima značajan uticaj u letnjem razdoblju na pokrivanje potrošnje koja je značajno povećana sa povećanjem prosečnih i maksimalnih temperatura okoline. Takođe u zimskom razdoblju u smanjenom obimu ima uticaj na pokrivanje povećane potrošnje električne energije na zagrevanje električnim grejnim telima, zagrevanje i dogrevanje korišćenjem klima uređaja i zagrevanje korišćenjem toplotnih pumpi.

Ukoliko uvažimo mogućnost prozjumera da preraspodeli snagu po fazama za svoje potrebe kako bi izbegao odavanje snage u NN distributivnu mrežu u vreme kad snagu želi maksimalno iskoristiti za sebe, uz pretpostavljen nepovoljan odnos cene isporučene i preuzete električne energije za prozjumera, ipak se može očekivati da će deo snage ipak biti raspoloživ za isporuku u NN distributivnu mrežu. U proračunu je na nekoliko čvorova (stubova) NN distributivne mreže postavljena distribuirana proizvodnja sa isporukom snage u NN distributivnu mrežu sa i bez razlika u snazi opterećenja po fazama. Prikazani su dijagrami struja i napona po fazama bez uticaja isporučene snage DG i sa uticajem isporučene snage DG. Prikazani su i ukupni gubici na NN vodu. U proračunu se pretpostavlja opterećenje od 80 A po fazi koje je raspodeljeno podjednako po svakom čvoru u proseku po fazi 8 A, ali sa nesimetrijom po čvorovima i ukupnoj nesimetriji na NN izvodu. U čvorovima četiri, sedam i deset je prisutna DG. Prikazana su dva proračun sa simetričnim i nesimetričnim opterećenjem bez DG, dva proračuna sa nesimetričnim opterećenjem sa DG sa simetričnim invertorima u odabranim čvorovima pri čemu je struja potrošnje DG simetrična i odaje simetrično u NN vod i kad su fazne struje potrošnje DG jednaka faznim strujama opterećenja (potrošnje) u čvoru, a takođe i proračuni sa DG sa nesimetričnim invertorima pri čemu je odata struja u faze NN voda raspoređena po fazama kako bi se dobile što uravnoteženije vrednosti napona na NN vodu. Faktor snage DG je jednak 0.95.

1.2.1 Prvi proračun sa simetričnim opterećenjem po čvorovima bez DG [4]

U prvom proračunu sa simetričnim opterećenjem je svaka faza čvora opterećena sa 8 A tako da je na početku NN voda u svakoj fazi 80 A. Ukupni gubici snage su zbog simetrije prisutni samo na faznim provodnicima i iznose 1.901 kW ili 3.626%. Gubici neutrale su nula. Fazni napon sve tri faze na kraju NN voda je 217.5 V. U tabeli I su u kolonama prikazani čvorovi i sabirnica, a u redovima struje faznih i neutralnog provodnika. ovaj proračun je neophodan zbog poređenja sa drugim proračunima, ali se ne prikazuju dijagrami. Isti oblik tabela je korišćen u narednim podtačkama.

Tabela I – Ulazni podaci o vrednostima struja opterećenja faza u čvorovima i izračunate vrednosti struje neutrale

Provodnik/Čvor	Sabirnica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_{L1} (A)	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
I_{L2} (A)	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
I_{L3} (A)	0	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
I_N (A)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

1.2.2 Drugi proračun sa nesimetričnim opterećenjem po čvorovima bez DG [4]

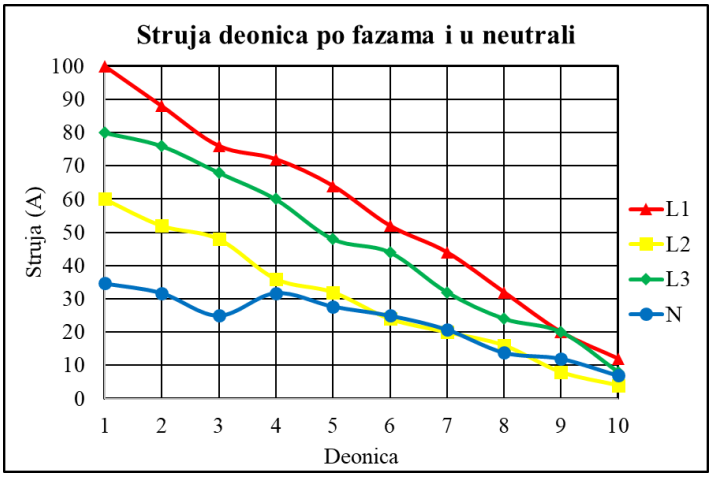
Drugi proračun je sa nesimetričnim strujama opterećenja po čvorovima bez DG datim u tabeli II. Struje opterećenja po čvorovima su odabrane tako da je prosečna struja po fazi čvora 8 A. U trećem i četvrtom proračunu su struje opterećenja čvorova iste kao u ovom proračunu.

Tabela II – Ulazni podaci o vrednostima struja opterećenja faza u čvorovima i izračunate vrednosti struje neutrale

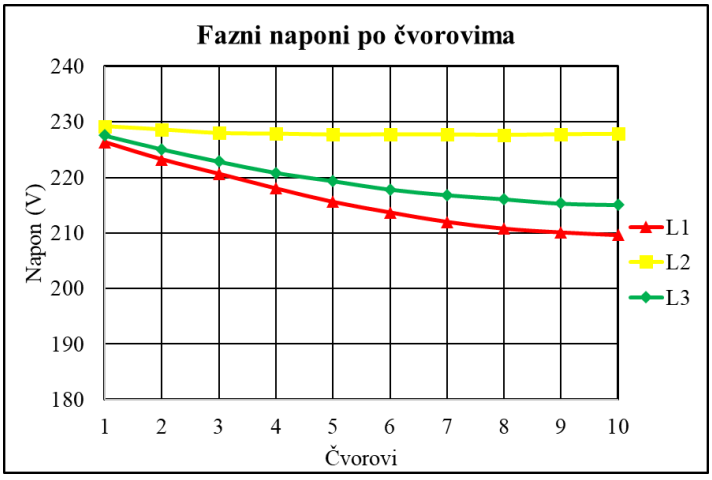
Provodnik/Čvor	Sabirnica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_{L1} (A)	0	12	12	4	8	12	8	12	12	8	12
I_{L2} (A)	0	8	4	12	4	8	4	4	8	4	4
I_{L3} (A)	0	4	8	8	12	4	12	8	4	12	8
I_N (A)	0	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93	6.93

Na Slici 3 su prikazane struje deonica (faze i neutrala), na Slici 4 fazni naponi po čvorovima i na Slici 5 gubici snage deonica (faze i neutrala) bez prisustva DG prema strujama iz tabele 1.

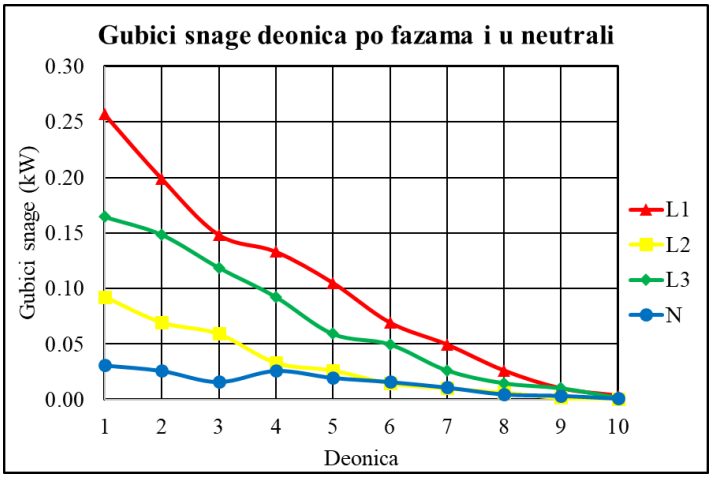
Dijagrami struja i snaga su slični pa će se za sledeće proračune samo navoditi ukupni i postotni gubici snage. Dijagrami snaga se za sledeće slučajeve neće prikazivati, a u ovom slučaju su prikazani da se vidi red veličine gubitaka po fazama i neutrali.



Slika 3 - Struje uz nesimetriju opterećenja bez DG



Slika 4 - Naponi uz nesimetriju opterećenja bez DG



Slika 5 - Gubici uz nesimetriju opterećenja bez DG

Ukupni gubici snage su 2.16 kW, a postotni 4.132%.

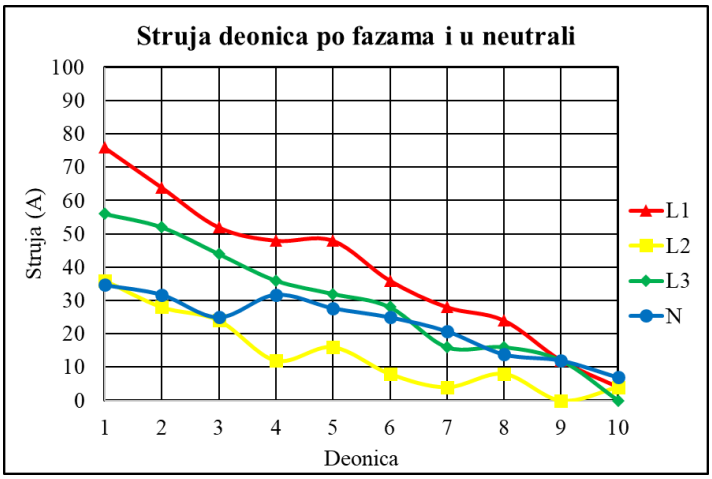
1.2.3 Treći proračun sa nesimetričnim opterećenjem po čvorovima sa simetričnim invertorom DG sa simetričnim opterećenjem prozjumera i simetričnom snagom odatom u čvorove [4]

Treći proračun uključuje DG smeštenu u četvrti, sedmi i deseti čvor. Pretpostavlja se da DG sa simetričnim invertorom u čvoru ima 16 A po fazi i da mu je sopstveno opterećenje koje sam pokriva simetrično sa po 8 A po fazi što znači da u NN vod u svom čvoru može da odaje simetrično po fazi 8 A kao što je prikazano u tabeli III.

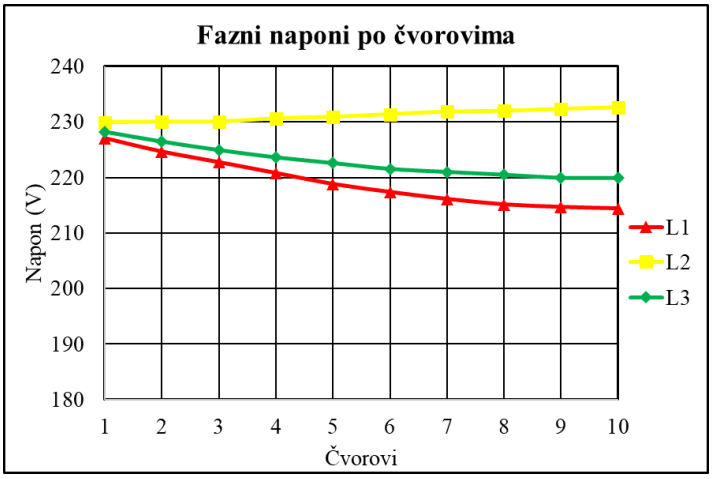
Tabela III – Ulazni podaci o vrednostima struja faza DG u čvorovima i izračunate vrednosti struje neutrale od DG

Provodnik/Čvor	Sabirnica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_{L1} (A)	0	0	0	0	8	0	0	8	0	0	8
I_{L2} (A)	0	0	0	0	8	0	0	8	0	0	8
I_{L3} (A)	0	0	0	0	8	0	0	8	0	0	8
I_N (A)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Na Slikama 6 i 7 su za treći proračun prikazane struje deonica i naponi čvorova.



Slika 6 - Struje uz nesimetriju opterećenja sa simetričnim invertorom DG



Slika 7 - Naponi uz nesimetriju opterećenja sa simetričnim invertorom DG

Ukupni gubici snage u trećem proračunu su 1.049 kW, a postotni 2.023%.

1.2.4 Četvrti proračun sa nesimetričnim opterećenjem po čvorovima sa nesimetričnim invertorom DG sa simetričnim opterećenjem prozjumera i nesimetričnom snagom odatom u čvorove

Četvrti proračun uključuje DG smeštenu u četvrti, sedmi i deseti čvor. Pretpostavlja se da DG sa nesimetričnim invertorom u čvoru ima 16 A po fazi i da mu je sopstveno opterećenje koje sam pokriva simetrično sa po 8 A po fazi što znači da u NN vod u svom čvoru može da odaje simetrično po fazi 8 A, ali da postoji nesimetrični invertor koji ima mogućnost da po fazama daje vrednosti struja veće od 8 A.

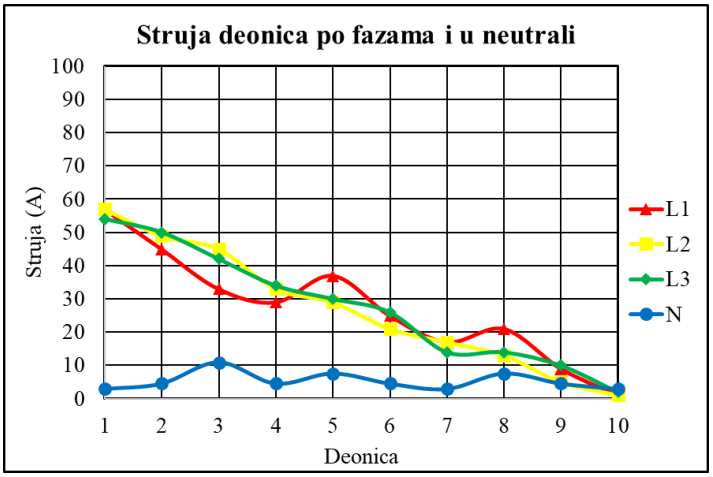
Prilikom izrade proračuna jedna od ideja je bila da se u čvorovima u kojima postoji DG u samom čvoru nesimetrija smanji tako da neismetrični invertor daje veću struju u fazu koja je u čvoru najopterećenija. Tu se postavlja pitanje na koji način invertor može da prepozna koliko su faze opterećene. Za to postoji mogućnost ukoliko nesimetrični invertor ima odgovarajući hardver, softver i komunikaciju sa mernim uređajima potrošača i drugih DG (što uglavnom nije slučaj) ili postavljanjem mernih uređaja i povezivanjem sa invertorom koji bi onda morao da ima veći broj analognih ulaza. Ovo je u osnovi složeno i skupo za izvođenje.

Daljim radom na proračunima se došlo do ideje da bi bilo poželjno da se dobije ujednačavanje napona na NN vodu, tj. po čvorovima pa se pokušalo da se ručnim promenama vrednosti struja po fazama, u čvorovima gde postoji DG, uravnoteže ili ujednače vrednosti faznih napona. Ručnim unosom se to uspelo i pokazalo se kao veoma dobro rešenje. U tabeli IV su dati podešene vrednosti struja DG po fazama za četvrti slučaj.

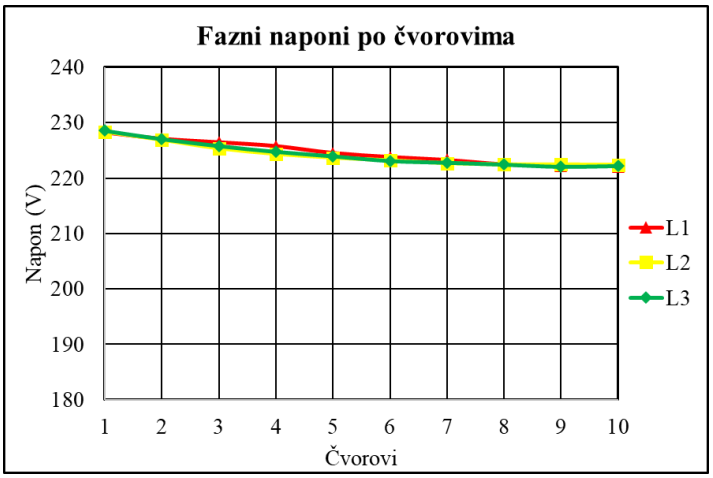
Tabela IV – Ulazni podaci o vrednostima struja faza DG u čvorovima i izračunate vrednosti struje neutrale od DG

Provodnik/Čvor	Sabirnica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_{L1} (A)	0	0	0	0	16	0	0	16	0	0	11
I_{L2} (A)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
I_{L3} (A)	0	0	0	0	8	0	0	8	0	0	10
I_N (A)	0	0	0	0	13.86	0	0	13.86	0	0	7.55

Pored uravnoteženja (ujednačavanja) vrednosti napona dobilo se i na značajnom smanjenju i gubitaka. Na Slikama 8 i 9 su za četvrti proračun prikazane struje deonica i naponi čvorova.



Slika 8 - Struje uz nesimetriju opterećenja sa nesimetričnim invertorom DG



Slika 9 - Naponi uz nesimetriju opterećenja sa nesimetričnim invertorom DG

Ukupni gubici snage u trećem proračunu su 0.805 kW, a postotni 1.547%.

Prema ovom proračunu DG sa nesimetričnim invertorom u fazi L_1 odaje u NN vod u četvrtom i sedmom čvoru 16 A i u desetom čvoru 11 A, u fazi L_2 0 A, 0 A i 3 A i u fazi L_3 8 A, 8 A i 10 A. Uz 8 A po fazi za napajanje prozjumera to je prosečno 16 A po fazi.

Očigledno je došlo do ujednačavanja vrednosti faznih napona sa veoma malim razlikama.

1.2.5 Peti proračun sa nesimetričnim opterećenjem po čvorovima sa simetričnim invertorom DG sa nesimetričnim opterećenjem prozjumera i nesimetričnom snagom odatom u čvorove [4]

Peti proračun uključuje DG smeštenu u četvrti, sedmi i deseti čvor. Pretpostavlja se da DG u čvoru ima 16 A po fazi i da mu je sopstveno opterećenje koje sam pokriva nesimetrično po fazama sa po 8 A u proseku po fazi što znači da u NN vod u svom čvoru može da odaje struju do 16 A. Pretpostavka je da je potrošnja prozjumera u čvorovima gde postoje i koju pokriva

simetrični invertor po fazama nesimetrična i ista kao potrošnja ostalih potrošača po čvorovima prema tabeli II što je prikazano u tabeli V, a preostali deo koji odaje u NN vod u tabeli VI.

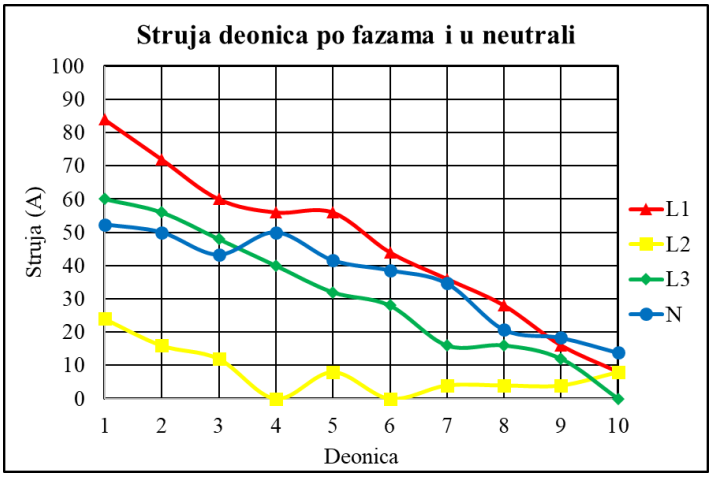
Tabela V – Ulazni podaci o vrednostima struja faza simetričnog invertora DG koju koristi prozjumer po čvorovima

Provodnik/Čvor	Sabirnica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_{L1} (A)	0	0	0	0	8	0	0	12	0	0	12
I_{L2} (A)	0	0	0	0	4	0	0	4	0	0	4
I_{L3} (A)	0	0	0	0	12	0	0	8	0	0	8
I_N (A)	0	0	0	0	6.93	0	0	6.93	0	0	6.93

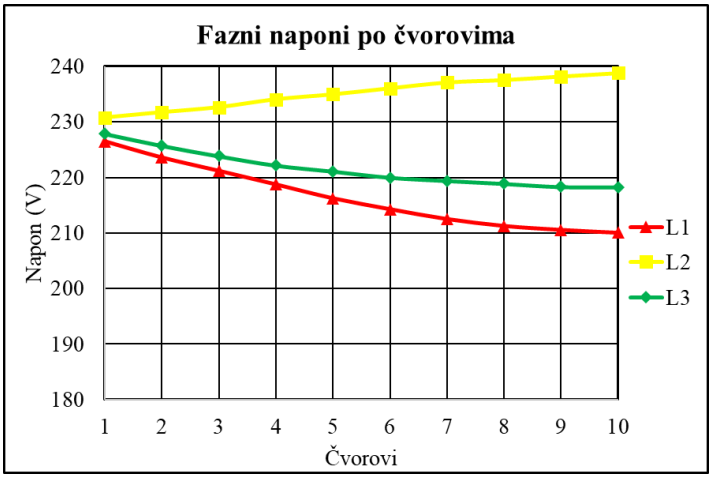
Tabela VI – Ulazni podaci o preostalim vrednostima struja faza simetričnog invertora DG u čvorovima i izračunate vrednosti struje neutrale koju u NN vod odaje DG

Provodnik/Čvor	Sabirnica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_{L1} (A)	0	0	0	0	8	0	0	4	0	0	4
I_{L2} (A)	0	0	0	0	12	0	0	12	0	0	12
I_{L3} (A)	0	0	0	0	4	0	0	8	0	0	8
I_N (A)	0	0	0	0	6.93	0	0	6.93	0	0	6.93

Na Slikama 10 i 11 su za peti proračun prikazane struje deonica i naponi čvorova.



Slika 10 - Struje uz nesimetriju opterećenja sa simetričnim invertorom DG



Slika 11 - Naponi uz nesimetriju opterećenja sa simetričnim invertorom DG

Ukupni gubici snage u petom proračunu su 1.432 kW, a postotni 2.76%.

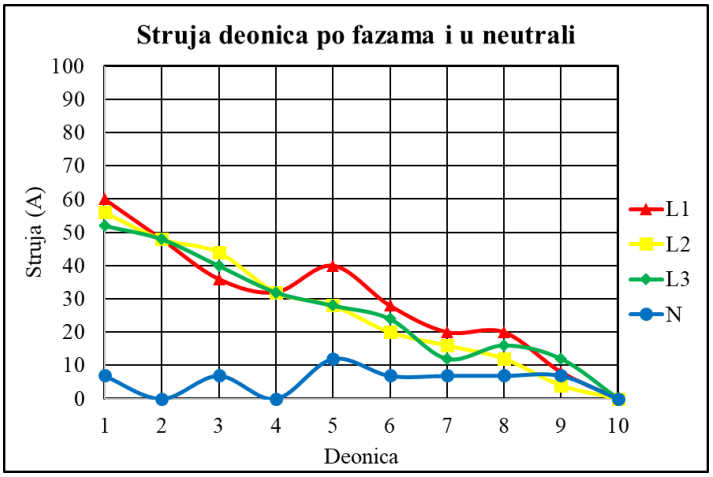
1.2.6 Šesti proračun sa nesimetričnim opterećenjem po čvorovima sa nesimetričnim invertorom DG sa nesimetričnim opterećenjem prozjumera i nesimetričnom snagom odatom u čvorove

Šesti proračun uključuje DG kao u petom proračunu sa nesimetričnim invertorom. Pretpostavlja se da DG u čvoru ima 16 A po fazi i da mu je sopstveno opterećenje koje sam pokriva nesimetrično po fazama sa po 8 A u proseku po fazi što znači da u NN vod u svom čvoru može da odaje struju po fazi do 24 A, ali uz ograničenje ukupne struje sve tri faze od 48 A. Pretpostavka je da je potrošnja prozjumera u čvorovima gde postoje i koju pokriva nesimetrični invertor po fazama nesimetrična i ista kao potrošnja ostalih potrošača po čvorovima prema tabeli II što je prikazano u tabeli V. U tabeli VII su prikazane struje koje nesimetrični invertor odaje u NN vod po fazama.

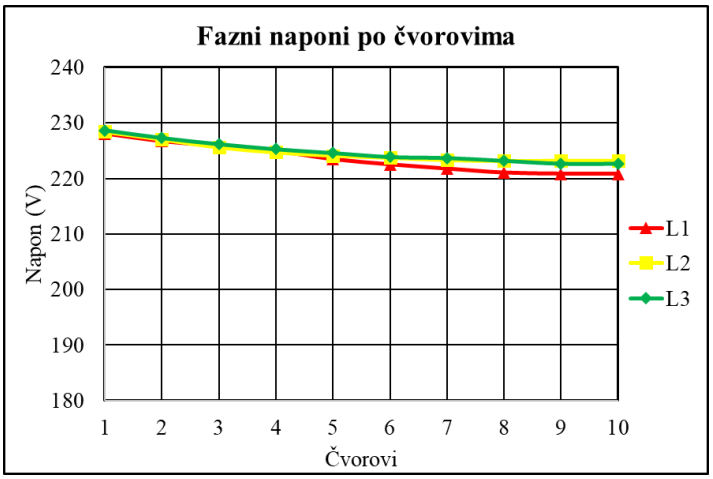
Tabela VII – Ulazni podaci o preostalim vrednostima struja faza nesimetričnog invertora DG u čvorovima i izračunate vrednosti struje neutrale koju u NN vod odaje DG

Provodnik/Čvor	Sabirnica	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I_{L1} (A)	0	0	0	0	16	0	0	12	0	0	12
I_{L2} (A)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
I_{L3} (A)	0	0	0	0	8	0	0	12	0	0	8
I_N (A)	0	0	0	0	13.86	0	0	12	0	0	6.93

Na Slikama 12 i 13 su za šesti proračun prikazane struje deonica i naponi čvorova.



Slika 12 - Struje uz nesimetriju opterećenja sa nesimetričnim invertorom DG



Slika 13 - Naponi uz nesimetriju opterećenja sa nesimetričnim invertorom DG

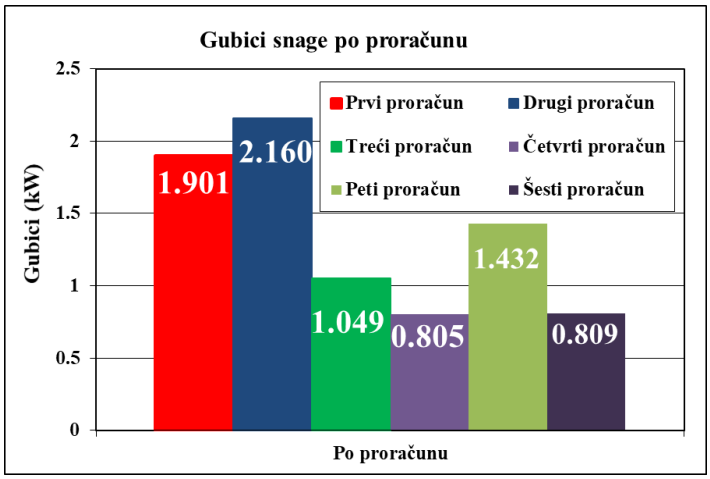
Ukupni gubici snage u petom proračunu su 0.809 kW, a postotni 1.556%.

2 USLOVI I OSNOVE ALGORITMA ZA NESIMETRIČNI INVERTOR

Uslovi i osnove algoritma za softver su jednostavni. Uslov je da na mestu priključenja na trofaznom invertoru postoje fazni naponi što je uvek slučaj. Odgovarajućim algoritmom se u iterativnom postupku menjaju struje (snage) koje se ubacuju u faze, podrazumevajući da se u fazu sa najmanjim naponom treba ubaciti veća struja (snaga) do ograničenja nesimetričnog invertora. U nekoliko koraka, uvažavajući da bi i drugi nesimetrični invertori na NN vodu radili isto, može se doći do zadovoljavajućih vrednosti, tj. maksimalno mogućeg simetriranja u čvoru. Podrazumeva se da je taj postupak stalan zbog stalnih promena struja i napona na NN vodu. Dodatni manji problem mogu izazavati nesimetrije faktora snage po fazama, ali se i to može ugraditi u alogritam za softver sa odavanjem reaktivne energije u NN vod u cilju poboljšanja faktora snage, a time uravnoteženja napona i smanjenja gubitaka.

3 RAZMATRANJE REZULTATA

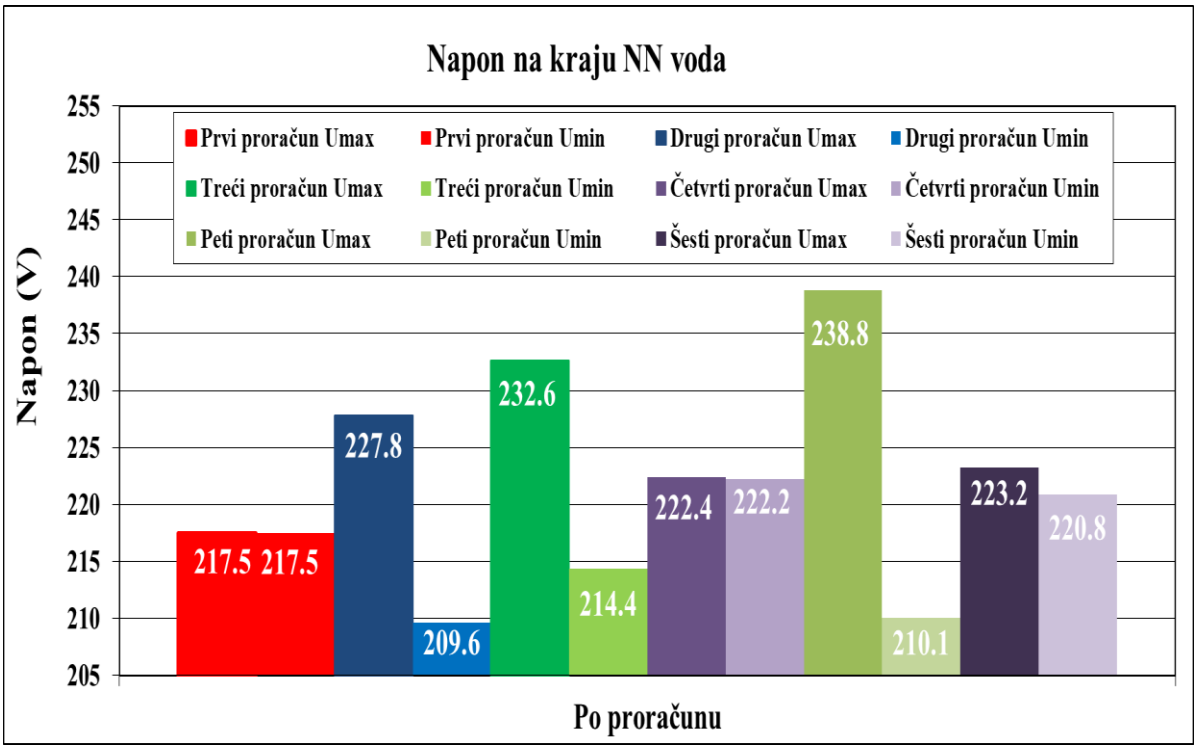
Na Slici 14 je dat grafički prikaz gubitaka snage za svih šest proračuna za simetrično opterećenje bez DG u prvom proračunu, odabrano nesimetrično opterećenje bez DG u drugom proračunu i za ostala četiri proračuna uticaj simetričnog i nesimetričnog invertora za odabrano nesimetrično opterećenje u odabranim čvorovima NN voda.



Slika 14 – Gubici snage po proračunima

Gubici snage bez prisustva DG su, prema odabranoj nesimetriji opterećenja, očekivano veći u prisustvu nesimetrije (drugi proračun) nego kod simetrije (prvi proračun). Gubici snage bez DG (prvi i drugi proračun) su značajno veći nego u prisustvu DG koja odaje snagu u NN vod (preostali proračuni). Značajno veći gubici u prisustvu DG su u slučaju kad DG sa simetričnim invertorima odaje snagu nesimetrično po fazama u NN vod (peti proračun) u odnosu kad DG sa simetričnim invertorima odaje snagu simetrično po fazama u NN vod (treći proračun). Četvrti i šesti proračun pokazuju da korišćenje nesimetričnih invertora još više smanjuje gubitke snage u odnosu na simetrične invertore. Razlika gubitaka u četvrtom proračunu kada prozjumer simetrično koristi snagu i šestom proračunu kada prozjumer koristi snagu kao i potrošači u čvorovima je mala. Očekivano je da se prilikom odavanja snage DG u NN vod dobiju manji gubici snage zbog smanjenih struja po deonicama NN voda. Smanjenje gubitaka snage se događa samo u razdobljima kada DG isporučuje snagu u NN vod, a to je uglavnom vreme dovoljne osvetljenosti i postojanja viška snage koju DG može isporučiti u čvorove NN voda.

Na Slici 15 su dati rasponi maksimalnog i minimalnog napona na fazama. Izuzev prvog proračuna gde su opterećenja sve tri faze podjednaka, najopterećenija faza u proračunima sa simetričnim invertorima je faza L1, a najmanje opterećena faza L2 tako da je maksimalni napon na kraju NN voda u fazi L2, a minimalni u fazi L1. Kod nesimetričnih invertora su opterećenja po fazama ujednačenija i najopterećenija faza može biti bilo koja.



Slika 15 – Maksimalni i minimalni napon faza na kraju voda po proračunima

Kod drugog i trećeg proračuna razlike između vrednosti maksimalnog i minimalnog napona su približno jednake, ali se vidi da u trećem proračunu uticaj simetrične DG značajno poveća minimalnu vrednost napona koja je u drugom proračunu blizu granice od -10%. U petom proračunu sa simetričnim invertorima DG i nesimetričnim odavanjem snage DG u čvorove NN voda minimalni napon na kraju najviše opterećene faze je takođe blizu granice od -10%, ali je razlika faznih napona značajno veća u odnosu na treći proračun. Nesimetrični invertori ujednačavaju opterećenje duž NN voda i time uravnotežuju vrednosti napona što se može videti za četvrti i šesti proračun.

Ovde prikazani rezultati proračuna se odnose na pretpostavljeni NN vod u vreme maksimalne snage DG za pretpostavljenu nesimetriju opterećenja potrošača na NN vodu.

Prozjumeri sa fotonaponskim panelima bez baterijskih skladišta imaju uticaj samo u razdobljima kada postoji proizvodnja. NN vodovi mogu biti različitih dužina, opterećenosti i nesimetrije opterećenja što se odražava na gubitke, veličinu i nesimetriju napona.

U razdobljima niže proizvodnje kad je osunčanost manja zbog doba dana, loših vremenskih uslova ili godišnjeg doba uticaj DG na promene napona i gubitke snage će biti manji.

Zavisno od podešenja automatske regulacije napona na transformatorima 110/x kV, besteretnih menjača na trnasformatorima srednji napon/srednji napon (npr. 35/20 kV i 35/10 kV), besteretnih menjača na transformatorima srednji napon/niski napon (npr. 20/0.4 kV i 10/0.4 kV) i veličine opterećenja moguće je da početni fazni naponi naponi na NN vodu budu i veći i manji od pretpostavljenih 230 V.

Opterećenja i nesimetrija na početku NN voda mogu biti veći ili manji tako da zbog pada napona na transformatoru vrednosti početnih faznih napona na NN vodu mogu biti nesimetrični tako da kod većih opterećenja minimalne vrednosti faznih napona na kraju NN voda budu niže,

a razlike minimalnih i maksimalnih vrednosti napona veće. Prethodno navedeno može biti uzrok da se u nekim razdobljima dobiju previsoki ili preniski naponi na NN vodu.

Nesimetrični invertori su skuplji od simetričnih zbog dva osnovna razloga. Prvi je da moraju po fazi imati veću propusnu moć (struju – snagu). Drugi je da moraju imati odgovarajući softver (algoritam) kojim bi prozjumer maksimalno koristio proizvedenu snagu, a preostali deo isporučio u distributivnu mrežu.

4 ZAKLJUČAK

Prema prikazanim proračunima DG sa simetričnim invertorima ima značajan uticaj na smanjenje gubitaka u NN vodovima sa nesimetrijom opterećenja, a DG sa neismetričnimm invertorima još značajniji.

Postoji značajan uticaj DG sa simetričnim invertorima na nesimetriju napona koji, zavisno od uslova opterećenja, može biti pozitivan i negativan. Pozitivan da se vrednosti napona poboljšavaju, a negativan da se mogu pojaviti značajnije razlike u vrednostima između faznih napona, tj. povećati nesimetrija.

DG sa nesimetričnim invertorima na nesimetriju napona značajno uravnotežuje vrednosti napona po fazama.

Prilikom priključenja prozjumera neophodno bi bilo usloviti ugradnju nesimetričnog invertora sa softverom koji bi raspodelio snagu koja prozjumeru preostaje i koju prozjumer ubacuje u NN vod na način da uravnotežuje opterećenje po fazama uravnoteženjem vrednosti napona po fazama preko pristupačnih podataka o vrednostima faznih napona i međusobnih faznih pomeraja napona na mestu priključenja. Uz uslovljavanje korišćenja nesimetričnih invertora zbog veće cene prozjumeri bi se na neki način trebali podstaći uz obostrani dobitak.

LITERATURA

[1] S. Spremić, D. Obradović, „Razmatranje gubitaka u niskonaponskim vodovima sa prikazom rezultata proračuna“, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, 2022., strane 68-73
[2] R. Ćirić., L.F. Ochoa, A.P. Feltrin, H. Nouri, „Analiza kvarova u četverožičnim distributivnim mrežama”, Elektrodistribucija: bilten o distribuciji električne energije, No. 1, 2006., strane 34-42
[3] S. Spremić, D. Obradović, „Razmatranje gubitaka u niskonaponskim vodovima sa prikazom rezultata proračuna“, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, 2022., strane 68-73
[4] S. Spremić, A. Antonić, „Uticaj solarnih panela na gubitke u niskonaponskoj mreži“, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 3, 2023., strane 56-59
[5] S. Spremić, A. Antonić, „Uticaj distribuirane proizvodnje uzduž nesimetrično opterećenog niskonaponskog voda“, Energetika 2026, Zlatibor, 2026, Rad 1.2.7, 5 strana