

Matej Šimunović, mag.ing.el.  
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[matej.simunovic@hep.hr](mailto:matej.simunovic@hep.hr)

Nikola Bogunović, dipl.ing.el.  
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[igor.volavic@hep.hr](mailto:igor.volavic@hep.hr)

Danijel Variola, mag.ing.el.  
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[danijel.variola@hep.hr](mailto:danijel.variola@hep.hr)

Vladimir Srok, dipl.ing.el.  
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[vladimir.srok@hep.hr](mailto:vladimir.srok@hep.hr)

## PROBLEMATIKA PRIKLJUČENJA MALOG DISTRIBUIRANOG IZVORA NA DUGAČKOM NISKONAPONSKOM IZVODU

### SAŽETAK

Usljed postepene transformacije distribucijske mreže iz pasivne u aktivnu, nailazimo na razne izazove. Referat obrađuje problematiku priključenja malog fotonaponskog distribuiranog izvora na dugačkom niskonaponskom izvodu, kada se na navedenom niskonaponskom izvoru nalazi isključivo jedan kupac/proizvođač. Pojava previsokih napona uslijed proizvodnje električne energije fotonaponske elektrane pri normalnim pogonskim uvjetima, uzrokuje ispad distribuiranog izvora. Na primjeru iz prakse prikazano je rješenje navedenog problema, te neke od mogućih varijanti rješenja.

**Ključne riječi:** distribuirana proizvodnja, kvaliteta električne energije, povratni utjecaj fotonaponske elektrane, povišeni napon

## CONNECTION PROBLEM OF A SMALL DISTRIBUTED SOURCE ON A LONG LOW VOLTAGE TERMINAL

### SUMMARY

Due to the distributions network gradual transformation from passive to active, various challenges appear. The paper deals with the grid connection problem of a small photovoltaic distributed source on a long low voltage terminal, when there is only one buyer / manufacturer at the specified terminal. The occurrence of overvoltages due to the production of electricity by a photovoltaic power plant under normal operating conditions causes a failure of the distributed source. A practical example shows a solution to this problem and some of the possible solutions.

**Keywords:** distributed generation, electricity quality, photovoltaic power plant feedback, elevated voltage

## 1. UVOD

Pogonski gledano distribucijska mreža se donedavno mogla promatrati kao radijalna. Jednosmjerni tokovi energije utjecali su na distribucijsku mrežu na način da su izvodi i dionice koje su se nalazile bliže izvora (napojna trafostanica) bile opterećenije od krajeva izvoda, dok su se na krajevima izvoda pojavljivala najveća odstupanja napona.

Pojavom distribuiranih izvora distribucijska mreža se iz pasivne postepeno pretvara u aktivnu mrežu, što predstavlja izazov u odnosu na dosadašnje, konvencionalno planiranje distribucijske mreže.

U velikom broju slučajeva distribuirani izvor korigira naponske prilike duž voda, međutim postoje i negativne strane priključenja takvog distribuiranog izvora.

U nastavku je prikazana problematika vezana uz naponske prilike kod priključenja malog fotonaponskog distribuiranog izvora na dugačkom niskonaponskom izvodu, kada se na navedenom niskonaponskom izvoru nalazi isključivo jedan kupac/proizvođač.

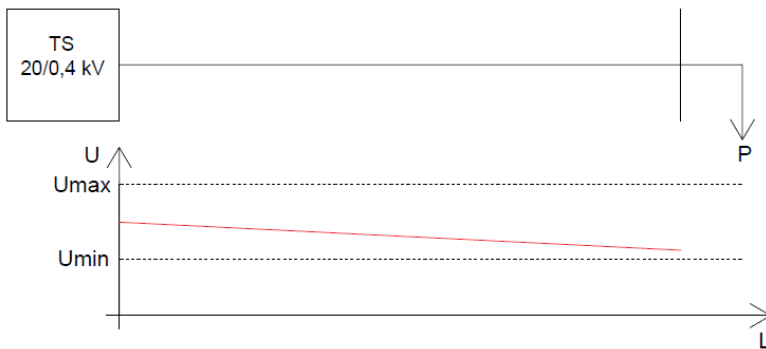
## 2. PRIKLJUČENJE DISTRIBUIRANOG IZVORA NA NISKONAPONSKI IZVOD

Kod tradicionalnih distribucijskih mreža energetici su se susretali s dva ekstrema. Prvi ekstrem je maksimalno opterećenje pri kojem se na kraju voda pojavljuje maksimalan pad napona, dok je drugi ekstrem bilo minimalno opterećenje pri kojem je napon na kraju voda relativno najviši.

Priključenjem distribuiranog izvora, distribucijska mreža postaje dinamična, te se pojavljuje slučaj da sama mreža mijenja svoj karakter i do nekoliko puta dnevno ovisno o proizvodnji/potrošnji, a utjecaj proizvodnje distribuiranog izvora ovisi o karakteristikama izvora, poziciji izvora u mreži i snazi izvora.

### 2.1. POTROŠNJA NA KRAJU NISKONAPONSKOG IZVODA

Niskonaponske mreže u ruralnim područjima u velikom broju slučajeva su radijalne. Takav pogon distribucijskih mreža ne pruža kvalitetnu sigurnost, odnosno pouzdanost napajanja, te se javljaju problemi velikih padova napona na kraju izvoda. Padovi napona na kraju izvoda ovise o vrsti i presjeku voda, duljini voda i priključnoj snazi potrošača. Kod priključenja potrošača dolazi do porasta struje od transformatorske stanice do potrošača, što proporcionalno uzrokuje pada napona porastom impedancije vodova i snage.



Slika 1. Primjer naponskih prilika na NN izvodu (bez priključenog distribuiranog izvora)

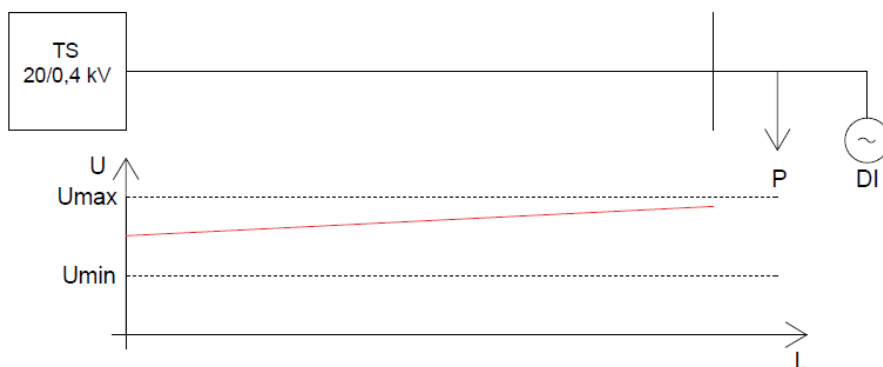
Na niskonaponskom izvodu bez priključenog distribuiranog izvora opterećenje opada s većom udaljenošću od napojne trafostanice, te se priključenjem distribuiranog izvora može očekivati znatna promjena tokova snaga.

Prema normi HRN EN 50160:2008 (HZN 6/2008) koja je u skladu s normom EN 50160 (Europska norma o kvaliteti električne energije), dozvoljeno je odstupanje napona od  $\pm 10\%$  nazivnog napona kroz 95 % vremena desetminutnih mjerenja u roku od sedam dana, a u 5 % preostalog perioda preporučeno je odstupanje od  $+10/-15\%$ .

## 2.1. PROIZVODNJA NA KRAJU NISKONAPONSKOG IZVODA

Kod aktivnih distribucijskih mreža, mreža gubi svoju osnovnu značajku radijalnog pogona i jednosmjernih tokova snaga, te se prilikom planiranja, razvoja i samog vođenja mreže stvara nesigurnost. Priključenjem distribuiranog izvora na kraj niskonaponskog izvoda smanjuju se gubici i reguliraju naponske prilike izvoda, a raspoloživost električne energije se značajno poboljšava.

Negativan utjecaj odnosi se na kvalitetu električne energije na mjestu priključenja, kao što su dugotrajna kolebanja napona (flikeri), viši harmonici ili ometanje rada MTU-a (mrežnog-tonfrekventnog upravljanja).



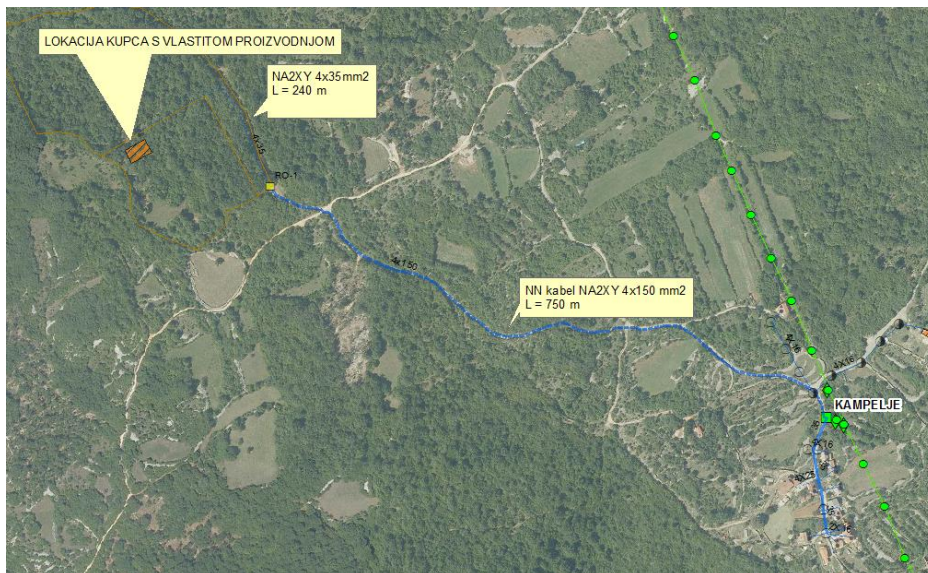
Slika 2. Primjer naponskih prilika na NN izvodu s priključenim distribuiranim izvodom

Za razliku od potrošnje na kraju niskonaponskog izvoda gdje se naponska stanja kreću između dvaju napona u slučaju maksimalnog i minimalnog opterećenja, kod priključenog proizvođača tokovi radne snage su suprotnoga smjera što dovodi do povećanja napona na mjestu priključka. Znatno povećanje napona može naročito se može očekivati na dugim vodovima koji su malo opterećeni.

## 3. PRIMJER DISTRIBUIRANOG IZVORA NA DUGAČKOM NISKONAPONSKOM IZVODU

U naselju Kampelje na otoku Krku koje broji svega desetak stanovnika tijekom godine, nalazi se poljoprivredno imanje koje je kategorije kupac s vlastitom proizvodnjom priključne snage u smjeru potrošnje od 35 kW i u snage u smjeru proizvodnje od 30 kW.

Kupac je priključen na kraju niskonaponskog izvoda ukupne duljine 990 m kojeg čini niskonaponski kabel NA2XY 4x150 mm<sup>2</sup> duljine 750 m te kabel NA2XY 4x35 mm<sup>2</sup> duljine 240 m. U promatranom niskonaponskom izvodu ovo je jedini potrošač električne energije.



Slika 3 . Prikaz NN mreže napajane iz TS 20/0,4 kV Kampilje

Osim promatranog niskonaponskog izvoda, TS 20/0,4 kV Kampilje napaja još dva izvoda na kojima se nalazi ukupno 15 kupaca električne energije. Većina objekata turističke je namjene, te se vršno opterećenje TS 20/0,4 kV Kampilje se očekuje u ljetnim mjesecima, preostali dio godine opterećenje je minimalno.

#### 4. ANALIZA UTJECAJA PRIKLJUČENJA ELEKTRANE

Analiza utjecaja priključenja elektrane na strujno naponske prilike provedena je u programskom alatu Neplan. Model čini napojna TS 110/20 kV Dunat s sredjenaponskim vodnim poljem Donji Kornič u kojem se nalazi promatrana TS 20/0,4 kV Kampilje te je ostatak opterećenja napojne TS 110/20 kV Dunat modelirano sumarno kao preostalo opterećenje.

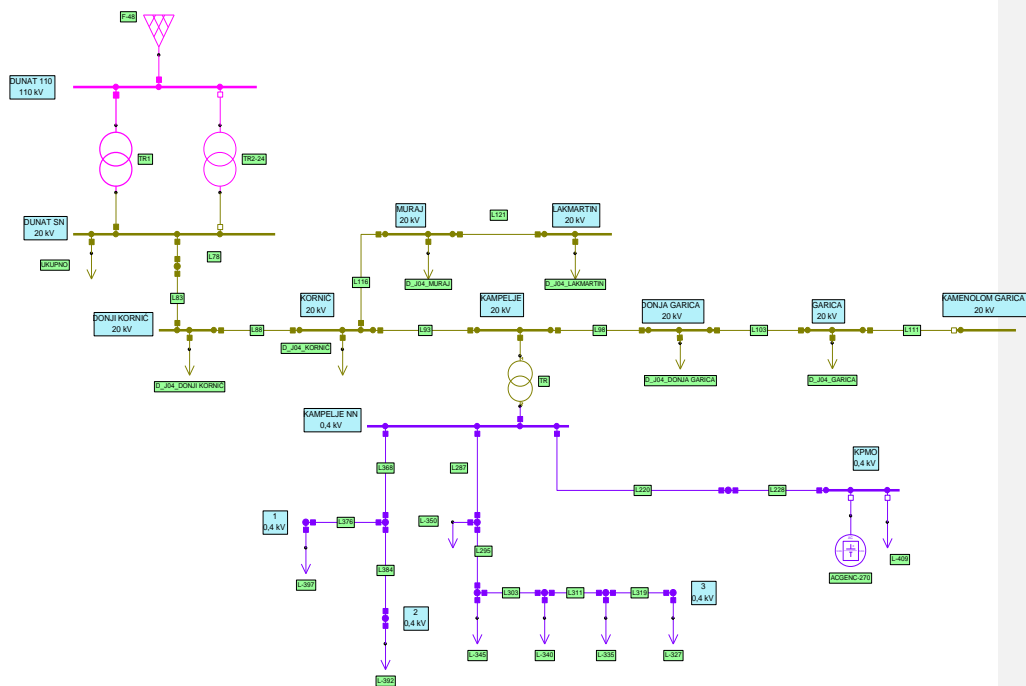
Karakteristično za otok Krk je sezonski karakter potrošnje zbog čega je mreža dimenzionirana za maksimalna opterećenja koja se postižu tijekom ljetnih mjeseci, preostali dio godine mreža je slabo opterećena. Sredjenaponsku mrežu karakteriziraju većinom kabelski vodovi koji predstavljaju kapacitivno opterećenje te uslijed male potrošnje dolazi do porasta napona u napojnim TS 110/x kV na otoku Krku [2].

Radi održavanja napona unutar granica zadanih normom EN 50160 dugih niskonaponskih izvoda, koriste se transformatori prijenosnog omjera 20/0,42 kV sa ručnom regulacijom napona na primarnoj strani u koracima  $\pm 2x2,5$  %. Kod većine transformatora regulacijska preklopka se nalazi u krajnjem položaju odnosno u položaju 1 zbog povišenih napona sredjenaponske mreže u zimskim mjesecima dijelom uzrokovanih kapacitetom kabela sredjenaponske mreže, a dijelom zbog povišenih napona prijenosne mreže.

Zbog navedenih problema u nemogućnosti regulacije napona na transformatorima 20/0,42 kV postoji opasnost od dodatnog povišenja napona u niskonaponskim mrežama uslijed priključenja distribuirane proizvodnje. U nastavku rada analizirat će se priključenje distribuiranog izvora na jedan niskonaponski izvod opisane mreže.

Commented [DV1]: Treba staviti broj literature (citat)

Analiza mreže je provedena za dva kritična scenarija. U prvom scenariju za uvjet maksimalnog opterećenja potrošača analiziraju se naponske prilike na kraju dugačkog NN izvoda dok je drugi scenarij analiza napona na kraju istog NN izvoda za uvjet minimalnog opterećenja i distribuirane proizvodnje na kraju istoga.



Slika 3. Model mreže u NEPLAN-u

### 3.1. ANALIZA NAPONSKIH PRILIKA ZA MAKSIMALNO OPTEREĆENJE

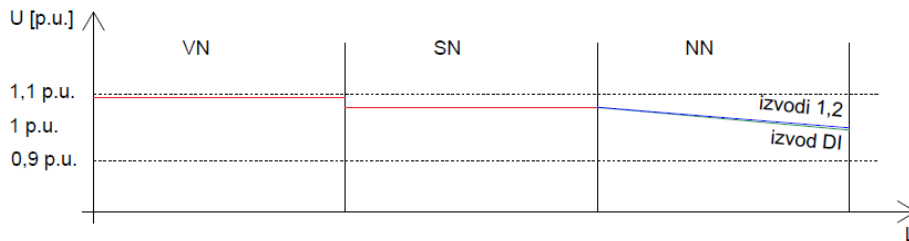
U ovom scenariju uzeto je 40% instalirane snage pojedinog kućanstva za model tereta što približno odgovara maksimalnom zabilježenom opterećenju predmetne TS 20/0,42 kV Kampelje. Na kraju NN izvoda dugačkog 753 m nalazi se kupac s vlastitom proizvodnjom koji je predmet našeg razmatranja. Zakupljena snaga u smjeru potrošnje je iznosa 35 kW dok je u smjeru proizvodnje 30 kW.

Svi potrošači NN mreže imaju fiksirano opterećenje od 40% instalirane snage, a promatranom kupcu ćemo opterećenje postepeno povećavati do zakupljenog u koracima po 5 kW. Promatrana su ukupno 3 NN izvoda u kojima svi potrošači moraju imati napona unutar dozvoljenih granica ( $\pm 10\% U_N$ ).

Tablica I. Promjena napona na karakterističnim mjestima NN izvoda za uvjet maksimalnog opterećenja

		Maksimalno opterećenje bez proizvodnje							
Kupac s vlastitom proizvodnjom	Potrošnja [kW]	0	5	10	15	20	25	30	35
	Proizvodnja [kW]	-							
U <sub>TS_NN</sub>	V	412,039	411,356	410,65	409,919	409,16	408,372	407,549	406,69
U <sub>kupac s vlastitom proizvodnjom</sub>	V	412,039	406,618	401,041	395,295	389,364	383,228	376,866	370,25
U <sub>izvod 1</sub>	V	406,725	406,033	405,317	404,576	403,807	403,008	402,175	401,304
U <sub>izvod 2</sub>	V	402,357	401,657	400,933	400,184	399,406	398,598	397,755	396,874

Iz prikazane tablice vidimo da se naponi u svim čvorištima niskonaponske mreže nalaze unutar dozvoljenih odstupanja. Analiza je provedena za položaj regulacijske preklopke transformatora 1.



Slika 4. Profil napona uz maksimalno opterećenje u per-unit metodi

### 3.2. ANALIZA NAPONSKIH PRILIKA ZA MINIMALNO OPTEREĆENJE

U ovom scenariju opterećenje TS 20/0,4 kV Kampelje iznosi 7 kW zbog karakteristike potrošnje vikend naselja. U dugačkom NN izvodu povećavat ćemo proizvodnju radne snage sa  $\cos\phi = 1$  od 0 do 30 kW u koracima po 5 kW.

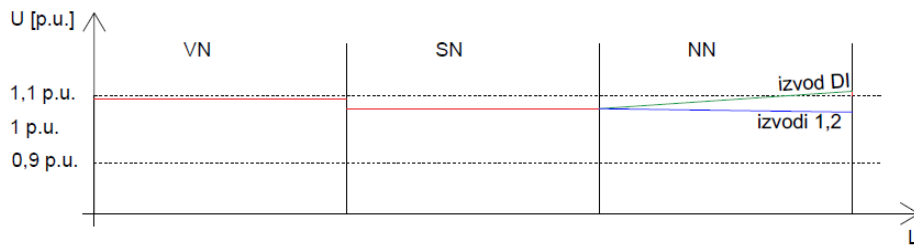
Promatrana su ukupno 3 NN izvoda u kojima svi potrošači moraju imati napona unutar dozvoljenih granica ( $\pm 10\% U_N$ ).

Tablica II. Promjena napona na karakterističnim mjestima NN izvoda za uvjet minimalnog opterećenja uz proizvodnju

		Minimalno opterećenje sa proizvodnjom							
Kupac s vlastitom proizvodnjom	Potrošnja [kW]	-							
	Proizvodnja [kW]	0	5	10	15	20	25	30	
U <sub>TS_NN</sub>	V	424,614	424,63	424,632	424,621	424,598	424,564	424,518	
U <sub>kupac s vlastitom proizvodnjom</sub>	V	424,614	428,816	432,923	436,94	440,873	444,726	448,504	
U <sub>izvod 1</sub>	V	423,626	423,642	423,644	423,633	423,61	423,575	423,529	
U <sub>izvod 2</sub>	V	423,668	423,684	423,686	436,94	423,652	423,617	423,572	

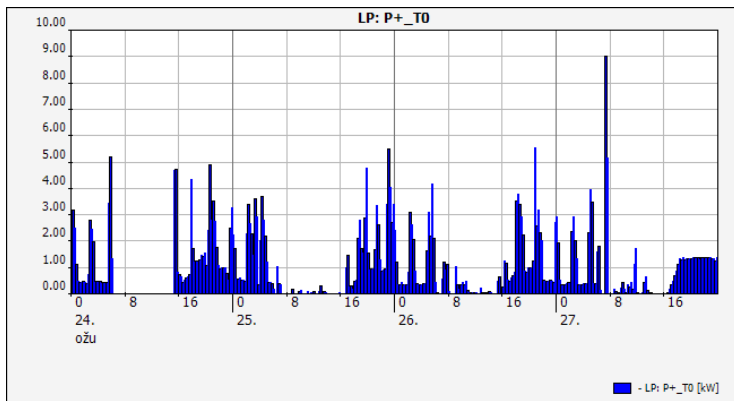
Prilikom minimalnog opterećenja, na sekundaru transformatora 20/0,42 kV napon iznosi 106,15%  $U_N$ . Priključenjem distribuirane proizvodnje napon na mjestu priključenja prilikom 20 kW proizvodnje

prelazi dopuštena odstupanja. Zbog regulacijske preklopke s kojom se više ne može spustiti napon jer se nalazi u krajnjem položaju, svako daljnje povećanje proizvodnje dodatno će narušavati odstupanje napona.

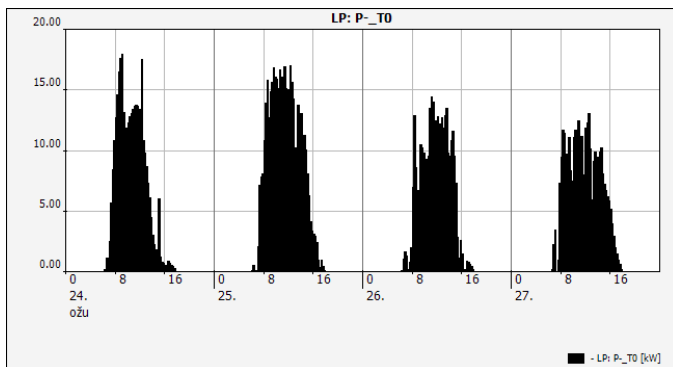


Slika 5. Profil napona s priključenim distribuiranim izvorom (per-unit vrijednost napona)

Commented [DV2]: Per-unit Vrijednost napona



Slika 6. Prikaz kretanja potrošnje na mjernom mjestu kupca s vlastitom proizvodnjom



Slika 7. Prikaz kretanja proizvodnje na mjernom mjestu kupca s vlastitom proizvodnjom

#### 4. TEHNIČKO RJEŠENJE PRIKLJUČENJA ELEKTRANE

Zbog karaktera potrošača koji proizvodi daleko više električne energije od njegovih potreba, višak električne energije odnosno snage se isporučuje u niskonaponski izvod.

Investitor je, sukladno elektroenergetskoj suglasnosti dostavio elaborat utjecaja elektrane i operativni plan i program ispitivanja postrojenja u pokusnom radu, koji su prikazali spremnost elektrane za trajni pogon. Međutim, u konkretnom slučaju pojava previsokog napona na čvoru priključenja elektrane uzrokovala je prorađu nadnaponske zaštite elektrane koja osigurava uvjete paralelnog rada.

Od mogućih rješenja navedenog problema razmatrana su dva, povećanje presjeka priključnog niskonaponskog kabela, odnosno polaganje dodatnog kabela, te zamjena energetskeg transformatora. Povećanje presjeka niskonaponskog kabela ili polaganje dodatnog niskonaponskog kabela zahtijevalo bi izradu projektne dokumentacije i značajnija financijska ulaganja. Iz navedenog razloga, odlučeno je da će se u trafostanici Kampelje zamijeniti postojeći energetski transformator prijenosnog omjera 20/0,42 kV, s transformatorom prijenosnog omjera 20/0,4 kV. Na taj način će se povećati prijenosni omjer i pokušati sniziti napon u slučajevima kritične proizvodnje.

**Commented [DV3]:** Nismo povećali opseg regulacije (ostao je isti +2x2,5%) povećali smo prijenosni omjer

##### 4.1. NAPONSKE PRILIKE S ENERGETSKIM TRANSFORMATOROM 20/0,4 kV

U nastavku je prikazana analiza naponskih prilika u niskonaponskoj mreži napajanoj iz TS Kampelje s novim energetskim transformatorom prijenosnog omjera 20/0,4 kV. Zamjenom transformatora s većim prijenosnim omjerom postignuto je smanjenje napona u niskonaponskoj mreži, te je potrebno izvršiti kontrolu pri maksimalnom opterećenju mreže kada se očekuju maksimalna odstupanja napona.

Tablica III. Promjena napona na karakterističnim mjestima NN izvoda za uvjet maksimalnog opterećenja

		Maksimalno opterećenje bez proizvodnje							
Kupac s vlastitom proizvodnjom	Potrošnja [kW]	0	5	10	15	20	25	30	35
	Proizvodnja [kW]	-							
U <sub>TS_NN</sub>	V	402,306	401,674	401,021	400,345	399,642	398,912	398,15	397,353
U <sub>kupac s vlastitom proizvodnjom</sub>	V	402,306	396,819	391,169	385,343	379,322	373,085	366,607	360
U <sub>izvod 1</sub>	V	396,859	396,219	395,556	394,87	394,158	393,418	395,266	391,836
U <sub>izvod 2</sub>	V	392,378	391,73	391,06	390,366	389,645	388,896	388,114	387,295

Analizom je utvrđeno da su kretanja napona uz maksimalno opterećenje bez priključenog distribuiranog izvora unutar dozvoljenih granica. Najveće odstupanje od nazivnog napona dobiveno je u izvodu na kojem se nalazi kupac s vlastitom proizvodnjom. U stvarnosti se takvo odstupanje napona teško može očekivati budući da u dosadašnjim mjerenjima nije zabilježena ni približna potrošnja u odnosu na zakupljenu snagu (Slika 6.).

Tablica IV. Promjena napona na karakterističnim mjestima NN izvoda za uvjet minimalnog opterećenja uz proizvodnju iz DI

		Minimalno opterećenje sa proizvodnjom							
Kupac s vlastitom proizvodnjom	Potrošnja [kW]	-							
	Proizvodnja [kW]	0	5	10	15	20	25	30	
U <sub>TS_NN</sub>	V	414,293	414,308	414,31	414,301	414,279	414,247	414,205	
U <sub>kupac s vlastitom proizvodnjom</sub>	V	414,293	418,596	422,8	426,909	430,929	434,866	438,724	
U <sub>izvod 1</sub>	V	413,28	413,295	413,297	413,288	413,266	413,234	413,192	
U <sub>izvod 2</sub>	V	413,324	413,339	413,341	413,331	413,31	413,277	413,235	

Za uvjet minimalnog opterećenja analizom je utvrđeno da i u slučaju maksimalne proizvodnje iz distribuiranog izvora naponske prilike ostaju unutar granica propisanih normom EN 50160 i mrežnim



pravilima. Novopredviđeni energetski transformator uz prijenosni omjer 20/0,4 kV ima mogućnost promjene položaja regulacijske preklopke u 5 položaja odnosno regulacije napona na sekundaru u opsegu  $\pm 2 \times 2,5 \%$ .

Postavljanjem regulacijske preklopke u krajnji položaj odnosno položaj broj 1, prijenosni omjer je najveći odnosno na sekundaru se za vrijeme maksimalnih opterećenja javlja nedozvoljeno odstupanje napona. Napon u tom slučaju je ispod dopuštene granice od  $-10\% U_n$ .

Kada je regulacijska preklopka u položaju broj 3, odnosno u srednjem položaju (20/0,4 kV) pri minimalnom opterećenju i maksimalnoj proizvodnji iz distribuiranog izvora dolazi do porasta napona iznad  $+10\% U_n$ .

Kao optimalni položaj regulacijske preklopke odabran je položaj 2 ( $+2,5\%$ ) čime su zadovoljena oba uvjeta. Maksimalna potrošnja bez proizvodnje iz DI te minimalno opterećenje sa proizvodnjom uz ovakav položaj regulacijske preklopke zadovoljavaju normom propisana odstupanja. Prethodna analiza izvršena je uz položaj regulacijske preklopke 2 te su rezultati prikazani tablicama III. i IV.

## 5. ZAKLJUČAK

Zbog pretežito kableske mreže i malog opterećenja u većem dijelu godine javljaju se povišeni naponi u prijenosnoj i sredjenaponskoj mreži. Svi distributivni transformatori prijenosnog omjera su 20/0,42 kV kako bi se i kod dugačkih niskonaponskih izvoda napon za vrijeme maksimalnih opterećenja našao unutar dozvoljenih granica. Za vrijeme minimalnih opterećenja, regulacijska preklopka u većini distributivnih transformatora nalazi se u krajnjem položaju kako bi se napon na sekundaru našao unutar dozvoljenih granica.

Električna energija promatrana kao roba određene kvalitete, zahtijeva obavezu pridržavanja normi i propisa vezanih za njenu kvalitetu.

Kod problematike povišenog napona prilikom priključenja distributivnih izvora neka od mogućih rješenja su povećanje presjeka priključnog kabela (odnosno dodatni kabel u paraleli), ugradnja kompenzacijskih uređaja, izgradnja nove trafostanice, korištenje proširene regulacije transformatora i slično. U navedenom slučaju zamjena transformatora, kako bi se proširila mogućnost regulacije, tehnno-ekonomski i vremenski se pokazala kao najidealnija opcija.

Kao jedna od opcija rješenja problema nameće se ugradnja distributivnih transformatora novije generacije s automatskom regulacijom  $20kV \pm 4 \times 2,5\% / 0,4kV$ . Takvi energetski transformatori bi samo parcijalno riješili probleme povišenih napona.

Uzrok problema nalazi se u povišenim naponima u visokonaponskoj i sredjenaponskoj mreži, uzrokovanih prekomjernom reaktivnom jalovom snagom, negativnog predznaka uslijed malih opterećenja. Moguće rješenje je ugradnja kompenzacijskih prigušnica u napojnoj TS 110/X kV ili po pojedinim vodnim poljima. Na taj način korigiraju se naponske prilike u sredjenaponskoj mreži, što na distributivnim energetskim transformatorima 20/0,42 kV ostavlja mogućnost promjene položaja regulacijske preklopke koje zbog ovakvog karaktera mreže, kod priključenja navedene elektrane nije bilo.

## 8. LITERATURA

- [1] "Regulacijski distributivni transformator", HO – CIRED 4. (10.) savjetovanje Trogir/Seget Donji, 11. - 14. svibnja 2014.; Sanela Carević, Mario Bakarić, Branimir Čučić, Martina Mikulić; Končar D&ST.
- [2] Utjecaj kapacitivnih struja kabela na naponske prilike, gubitke i sklopnu opremu SN mreže otoka Krka " HO-CIRED 6.(12.) savjetovanje Šibenik 2020; Danijel Variola, Arsen Jurasić, Igor Volarić; HEP ODS d.o.o.
- [3] Končar D&St katalog Distributivni transformatori 50-8000 kVA
- [4] R. Goić: "Distribucija električne energije", <http://marjan.fesb.hr/~rgoic/dm/skriptaDM.pdf>

Commented [DV4]: