

Vedran Radošević, dipl.ing.el
HEP-ODS d.o.o. – Elektra Zagreb
vedran.radoševic@hep.hr

PRIMJENA DISTRIBUTIVNIH TRANSMOFORMATORA S AUTOMATSKOM REGULACIJOM NAPONA ZBOG UTJECAJA MALIH SUNČANIH ELEKTRANA NA NAPONSKE PRILIKE U NISKONAPONSKOJ ELEKTROENERGETSKOJ MREŽI

SAŽETAK

Do nedavno poprilično skupa tehnologija za proizvodnju električne energije iz sunčeva svjetla postala je relativno dostupna svima zbog raznih poticaja država i razvoja tehnologija koje su pojeftinile samu proizvodnju opreme. Posljednjih godina dolazi do trenda značajnog porasta postavljanja malih sunčanih elektrana na krovove kuća i zgrada te se proizvedena električna energija ili plasira u elektroenergetsku mrežu ili se djelomično koristi za vlastite potrebe, a višak šalje u mrežu. Sunčane elektrane svojim prisustvom izazivaju određene promjene u mreži. Kolike će te promjene biti, zavisi o samoj mreži, ali i o snazi sunčane elektrane.

U ovom članku će biti općenito rečeno nešto o sunčanim elektranama, distribucijskoj mreži te o utjecaju malih sunčanih elektrana na distribucijsku mrežu s naglaskom na promjene napona te na primjenu naprednih transformatora koji pomažu u rješavanju navedene promjene.

Ključne riječi: sunčana elektrana, distribucijska mreža, napon, transformator s automatskom regulacijom napona

APPLICATION OF TRANSFORMERS WITH AUTOMATIC VOLTAGE REGULATION DUE TO THE IMPACT OF SMALL SOLAR POWER PLANTS TO VOLTAGE CONDITIONS IN LOW VOLTAGE POWER NETWORK

SUMMARY

Until recently, a fairly expensive technology for producing electricity from sunlight has become relatively accessible to everyone because of various incentives the state and development of technologies that actual production equipment make cheaper. In recent years, a trend of significant increase in the installation of small solar power plants on the roofs of houses and buildings is present and produced electricity is or marketed in the electrical grid or partially used for their own needs, and the excess is sent to the network. Solar power with his presence caused some changes in the network. How much will these changes be, depending on the network and the power of the solar power plant.

In this article it will be spoken in general about solar power plants, distribution network and the influence of small solar power plants to the distribution network with a focus on changes in the voltage and the use of transformers that help solve these changes.

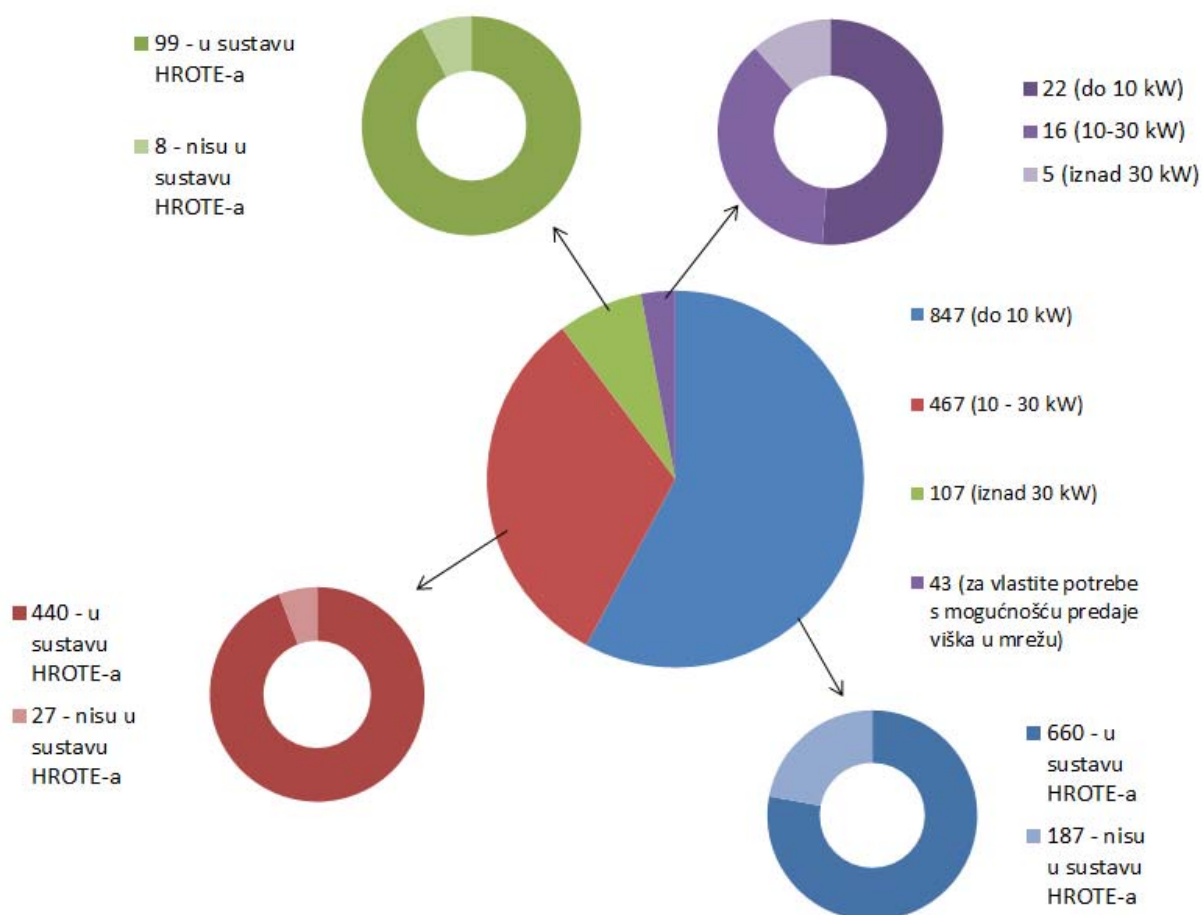
Key words: solar power plant, distribution network, voltage, transformer with automatic voltage regulation

1. UVOD

Zbog sve većih potreba za električnom energijom te isto tako potrebom za proizvodnjom električne energije iz obnovljivih izvora električne energije odnosno smanjenjem proizvodnje električne energije iz konvencionalnih izvora, svjedoci smo sve većeg broja proizvodnih jedinica priključenih na niskonaponsku elektroenergetsku mrežu koje proizvode električnu energiju iz energije sunca.

Posljednjih godina dogodila se velika ekspanzija što se tiče zahtjeva za priključenjem malih sunčanih elektrana na elektroenergetsku mrežu ponajviše zbog statusa povlaštenog proizvođača kojeg su zainteresirani investitori mogli steći čime su si osigurali poprilično dug vremenski period sa sigurnim otkupom proizvedene električne energije po cijenama puno većim nego što je to na slobodnom tržištu. U posljednje vrijeme javlja se i sve veća želja potencijalnih investitora za smanjenjem računa za potrošnju električne energije što isto tako postaje dodatni poticaj za izgradnjom sunčanih elektrana za vlastite potrebe s mogućnošću predaje viška proizvedene električne energije u mrežu.

Na dan 23.11.2015. g. je na Hrvatsku elektroenergetsku mrežu, točnije distribucijsku, priključeno ukupno [1] 1464 sunčanih elektrana ukupne snage 50,380.00 kW. Od ukupnog broja njih 1199 se nalazi u sustavu poticaja, tj. otkupljivač proizvedene električne energije je HROTE d.o.o., 222 su sklopile ugovor s nekim drugim tržišnim otkupljivačem i predaju svu proizvedenu električnu energiju u mrežu, a preostalih 43 proizvodi električnu energiju za vlastite potrebe s mogućnošću predaje viška u elektroenergetsku mrežu te su isto tako sklopile ugovor o otkupu viška proizvedene električne energije s nekim od tržišnih otkupljivača (slika 1).



Slika 1. Prikaz broja sunčanih elektrana priključenih na distribucijsku mrežu HEP ODS-a

Zbog velikog broja sunčanih elektrana priključenih na elektroenergetsku mrežu te isto tako i zbog velike mogućnosti za povećanjem tog broja u skoroj budućnosti potrebno je obratiti pažnju na utjecaj tih izvora električne energije na elektroenergetsku mrežu, tj. na promjene koje izazivaju u njoj.

2. DISTRIBUCIJSKA MREŽA I DISTRIBUIRANA PROZVODNJA

2.1. Distribucijska mreža

Distribucijska mreža je dio elektroenergetske mreže koji preuzima električnu energiju iz prijenosne mreže u transformatorskim stanicama VN/SN 110/35(30)(20)(10) kV, te služi za distribuciju električne energije do krajnjih potrošača.

Naponske razine koje spadaju u distribucijsku mrežu u Republici Hrvatskoj su: 35 kV, 30 kV, 20 kV, 10 kV i 0.4 kV.

Tablica 1. Prikaz duljina vodova distribucijske mreže u RH u kilometrima [2]

Tip	Naponska razina	35 i 30 kV	20 kV	10 kV		0,4 kV
Nadzemni vod		3334,7	3221,8	17829,4	ZM – goli	19521,7
Kabel		1320,6	3276	10918,2	ZM – izol.	26905,8
Podmorski kabel		132,2	2,6	239,6	Kabel	17464,9
Ukupno (km)		4787,5	6500,4	35487,6		63892,4

2.2. Distribuirana proizvodnja

Distribuirana proizvodnja je do unazad nekoliko godina bila relativno novi pojam koji je stekao popularnost kada su krenuli poticaji za priključenje izvora električne energije iz obnovljivih izvora. U literaturi se može pronaći veliki broj pojmova i definicija vezan uz distribuiranu proizvodnju. Postoje definicije s obzirom na instaliranu snagu jedinica distribuirane proizvodnje, no s obzirom da se te snage priključenja na distribucijsku mrežu razlikuju od zemlje do zemlje, ta definicija nije povoljna baš kao ni definicija vezana uz naponsku razinu [3].

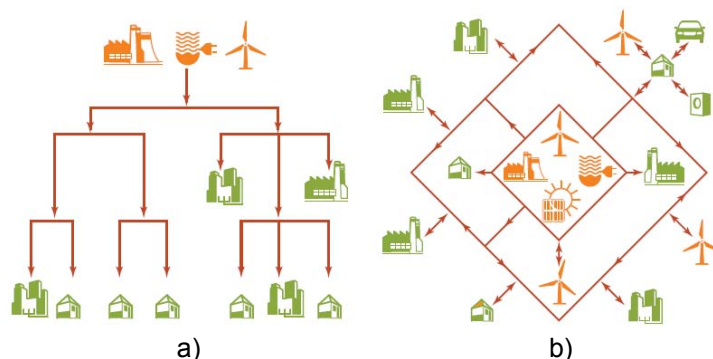
Najprikladnija definicija distribuirane proizvodnje bila bi: „*distribuirana proizvodnja je svaki izvor električne energije koji je priključen izravno na distribucijsku mrežu, ili je s potrošačeve strane.*“

Podjela distribuiranih izvora prema snagama i naponskim razinama distribucijske mreže na koju se priključuju u Republici Hrvatskoj prema Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava je slijedeća [4]:

- elektrane snage do uključujući 100 kW priključuju se na niskonaponski vod;
- elektrane snage do uključujući 500 kW priključuju se na niskonaponske sabirnice TS 10(20)/0,4 kV;
- elektrane snage od 500 kW do uključujući 10 MW priključuju se na SN sabirnice u TS.

3. UTJECAJ MALIH SUNČANIH ELEKTRANA NA PRILIKE U NISKONAPONSKOJ MREŽI

Distribucijska mreža je do pojave distribuirane proizvodnje bila pasivna mreža u kojoj su prilike ovisile samo o karakteristikama potrošača koji su spojeni na nju (slika 2. - a). Priključenjem distribuirane proizvodnje distribucijska mreža iz pasivne prelazi u aktivnu, tj. dolazi do promjena tokova snaga, ali isto tako i do promjene kvalitete električne energije (slika 2. – b).



Slika 2. Prikaz tradicionalne mreže (a) i današnje mreže (b) [5]

3.1. Kvaliteta električne energije

Ljudi su već sredinom prošlog stoljeća shvatili [6] da kvaliteta električne energije utječe na kvalitetu rada (proizvodnje materijalnih i nematerijalnih dobara) i na kvalitetu života. Tijekom posljednjih desetljeća na snazi su bile mnoge norme iz toga područja, ali se pravi obrat dogodio sredinom devedesetih godina prošlog stoljeća kada je međunarodna organizacija CENELEC izradila normu EN 50160 za mjerenje napona na mjestu predaje potrošaču u javnim distribucijskim niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima. Cilj norme bio je natjerati proizvođače i distributere da više pozornosti i truda ulože u održavanje kvalitete električne energije, ako na tržištu žele održati odgovarajuću razinu cijene tog proizvoda.

Norma EN 50160 preuzeta je i harmonizirana od strane Hrvatskog zavoda za norme. Posljednja inačica koja je izašla 2012. godine ima oznaku HRN EN 50160:2012 te joj je naslov Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža. [7]

3.2. Norma HRN EN 50160:2012

Ova norma definira i opisuje bitne značajke razdjelnog napona na mjestu predaje potrošaču u javnim niskonaponskim i srednjonaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uvjetima. Svrha joj je utvrditi i opisati obilježja razdjelnog napona glede:

- frekvencije,
- veličine,
- oblika krivulje,
- simetrije triju napona faznih vodiča.

Navedene se značajke za vrijeme normalnog pogona mijenjaju zbog kolebanja tereta, smetnja iz određenih postrojenja i kvarova, koji su pretežno izazvani vanjskim događajima. Značajke napona izrazito su slučajne naravi, kako glede vremenskog tijeka na nekom promatranom mjestu predaje, tako i u jednom trenutku glede mjesne razdiobe po svim mjestima predaje u nekoj mreži. S obzirom na te ovisnosti valja računati s time da će se navedene razine značajka opskrbnog napona u rijetkim slučajevima prijeći. Pojedine pojave koje utječu na opskrbi napon potpuno su nepredvidive, tako da nije moguće za odgovarajuće značajke navesti čvrste vrijednosti. Vrijednosti koje su za te pojave dane u normi, npr. za propade napona i prekide napona, valja sukladno tome smatrati orijentacijskim vrijednostima.

3.2.1. Obilježja napona prema normi

Obilježja niskog i srednjeg napona prema normi HRN EN 50160:2012 su slijedeća:

- mrežna frekvencija;
- veličina opskrbnog napona;
- polagane promjene napona;
- brze promjene napona;
- jakost treperenja (flicker);
- propadi napona;
- kratki prekidi opskrbnog napona;
- dugi prekidi opskrbnog napona;
- povremeni previsoki naponi između faznih vodiča i zemlje;
- tranzijentni previsoki naponi između faznih vodiča i zemlje;
- nesimetričnost napona;
- napon višeg harmonika;
- napon međuharmonika;
- signalni naponi superponirani opskrbnom naponu.

3.2.2. Veličina i promjene opskrbnog napona

Normirani nazivni napon U_n za niskonaponske javne mreže:

- za trofazne mreže s četiri vodiča: $U_n = 230 \text{ V}$ između faznih vodiča i neutralnog vodiča,
- za trofazne mreže s tri vodiča: $U_n = 230 \text{ V}$ između faznih vodiča.

Propisane granice odstupanja od nazivnog napona u normalnom pogonu za niski napon su do 2010. G. bile od +6% do -10% te $\pm 10\%$ nakon 2010. g. [4] što znači da se napon može kretati između vrijednosti 207 – 253 V.

Jedna od karakteristika napona su i promjene napona koje mogu biti polagane i brze. Kod polaganih promjena vrijednosti napona u 95% slučajeva, desetominutne srednje efektivne vrijednosti opskrbnog napona tjednog intervala, moraju biti u granicama $\pm 10\%$ dok u preostalih 5% slučajeva mogu biti + 10% i – 15% (199,5 do 253 V).

Brze promjene su uglavnom izazvane promjenama tereta u postrojenjima potrošača ili sklapanjima u mreži. Pri normalnim pogonskim uvjetima brza promjena ne prelazi 5% nazivne vrijednosti napona dok u određenim okolnostima ona može doći do 10%.

3.3. Utjecaj sunčanih elektrana na promjene napona u niskonaponskoj elektroenergetkoj mreži

Praksa je pokazala da male sunčane elektrane snage do 10 kW nemaju prevelik utjecaj na promjene napona u niskonaponskoj mreži na mjestu priključka, pogotovo ako je na niskonaponski vod priključena samo jedna elektrana. Isto tako taj utjecaj uvelike ovisi i o prilikama na cijelome niskonaponskom vodu, a ne samo na mjestu priključenja. Ukoliko snaga elektrane iznosi 30 kW, promjene već mogu postati uočljivije, no to isto tako ovisi o ostalim parametrima mreže.

Što će se dogoditi ako na nekom niskonaponskom vodu imamo dvije ili tri elektrane koje proizvode daleko više nego što je potrošnja na istome? Ili ako imamo više sunčanih elektrana spojenih na jednu transformatorsku stanicu na kojoj je u trenutku najveće proizvodnje mala potrošnja?

Kako bi se prikazao utjecaj malih sunčanih elektrana (do 30 kW) na naponske prilike u niskonaponskoj distribucijskoj mreži u programskom alatu NEPLAN (studentska verzija) napravljena je jedna proizvodna mreža (slika 4) s potrošačima i nekoliko sunčanih elektrana priključenih na različitim mjestima u mreži.

3.3.1. Proračun utjecaja sunčanih elektrana na naponske prilike u realnoj niskonaponskoj distribucijskoj mreži

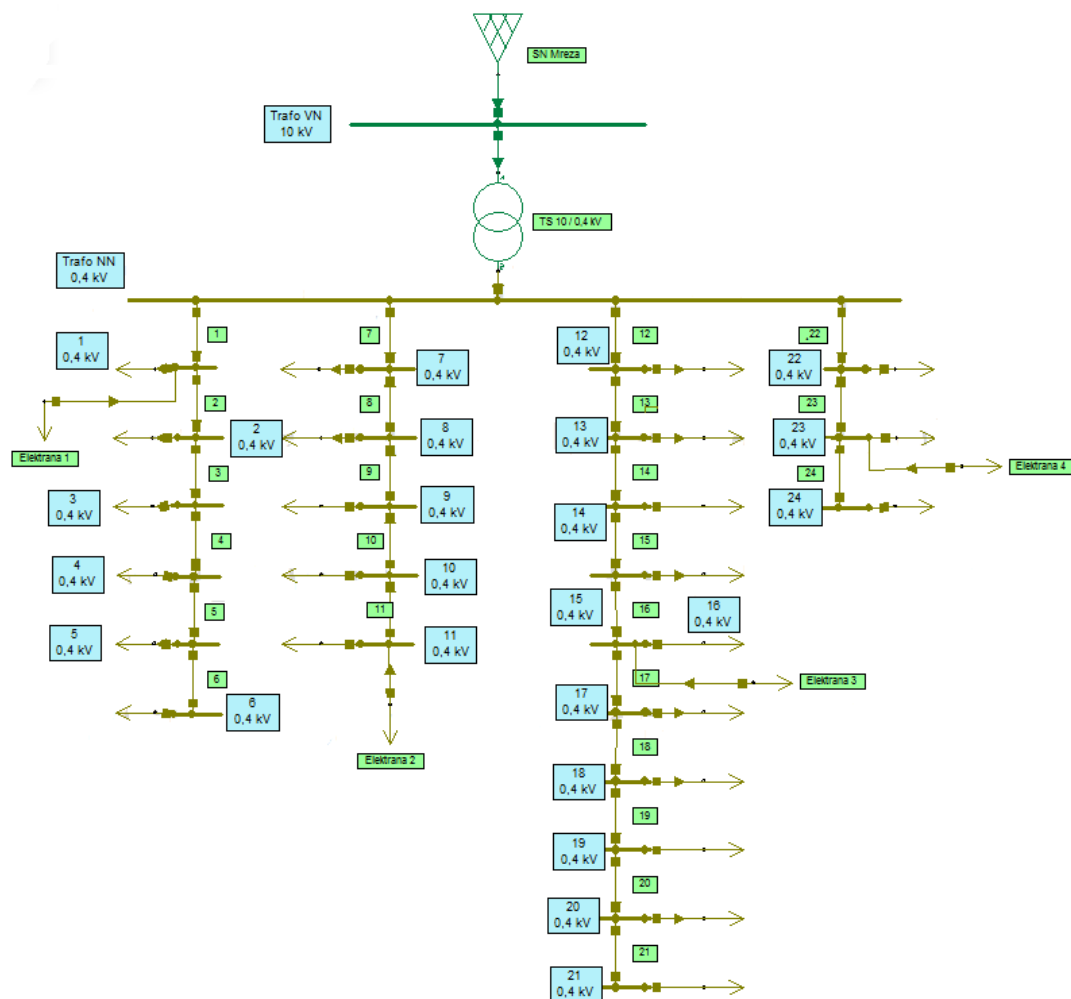
Kako bi se prikazao utjecaj sunčanih elektrana na promjene napona u niskonaponskoj distribucijskoj mreži, uzet je segment niskonaponske distribucijske mreže te je na njemu izvršen proračun. Mreža (slika 4) se sastoji od transformatora snage 250 kVA te četiri strujna kruga, različitih dužina, na koja su priključena 24 potrošača neravnomjerno raspoređena po strujnim krugovima. Potrošači nisu priključeni simetrično kako bi se stvorile što realnije prilike u mreži. Na svaki strujni krug spojena je po jedna sunčana elektrana slijedeće snage:

Tablica 2. Snage i pozicije priključenih sunčanih elektrana

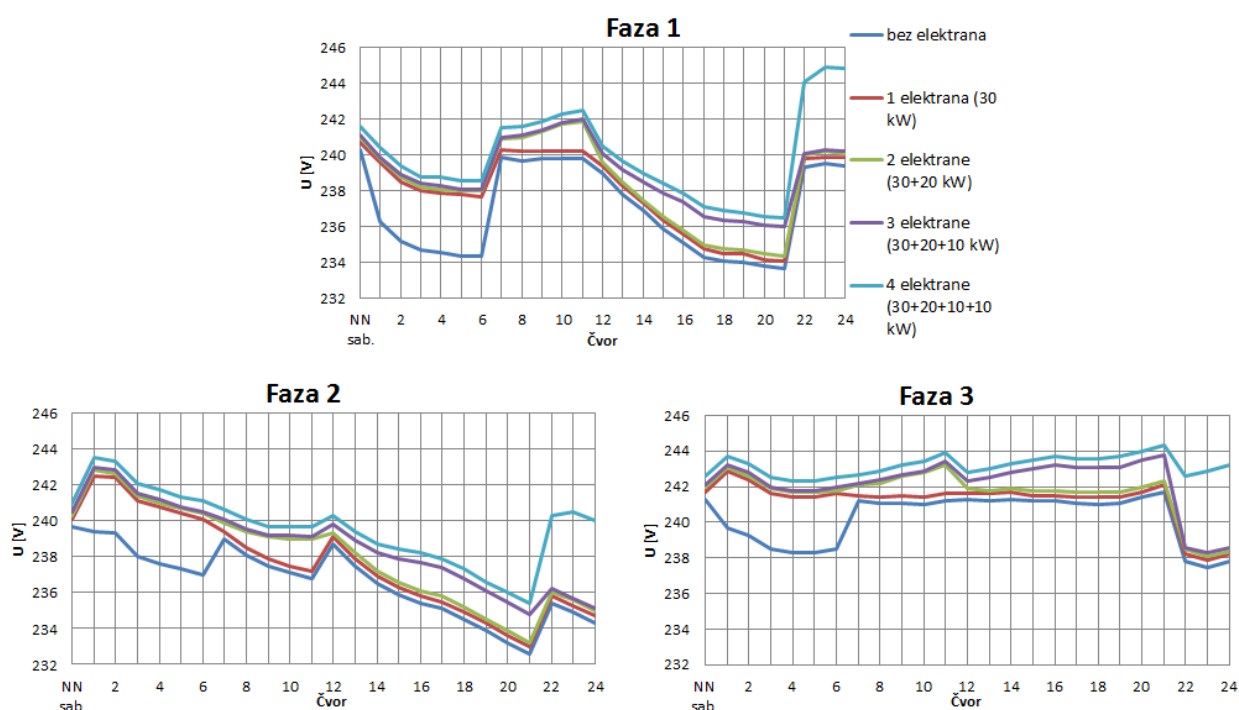
Br. sunčanih elektrana	Snaga [kW]	Položaj u mreži
1	30	Strujni krug 1, čvor 1
2	10	Strujni krug 2, čvor 11
3	10	Strujni krug 3, čvor 16
4	20	Strujni krug 4, čvor 23

Proračun je proveden na način da su sunčane elektrane priključivane jedna po jedna na mrežu te je promatran njihov utjecaj na promjene vrijednosti napona u pojedinim čvorištima po fazama što je i prikazano na slici 5.

Iz dobivenih se grafova (slika 5) vidi da je vrijednost napona bila unutar dozvoljenih granica prije nego što su elektrane bile priključene na niskonaponsku mrežu. Priključenjem jedne po jedne sunčane elektrane vrijednosti napona su se mijenjale, rasle su ovisno o ukupnim snagama priključenih elektrana ali su i dalje bile unutar dozvoljenih granica. Isto tako vrijednosti napona su mogle biti i veće od dozvoljenih granica što bi narušilo kvalitetu električne energije definiranu normom.



Slika 4. Prikaz NN distribucijske mreže s četiri priključene sunčane elektrane snage 10-30 kW



Slika 5. Promjena napona po čvorovima

4. REGULACIJSKI DISTRIBUTIVNI TRANSFORMATOR

Prilike u mreži s distribuiranim izvorima električne energije uvelike su promijenile način funkcioniranja same mreže te su postavile određene izazove u rješavanju tih prilika. Jedan od načina s kojim bi se riješio dio novonastalih prilika je primjena distributivnih transformatora s automatskom regulacijom napona.

Transformatori s automatskom regulacijom uobičajeni su na višim naponskim nivoima, dok na niskom naponu, zbog samih karakteristika mreže, nisu bili potrebni. Pojavom distribuiranih izvora javlja se potreba za njihovom primjenom. Može se reći da su distribuirani izvori električne energije „postavili“ nekoliko zahtjeva postojećim klasičnim distributivnim transformatorima koji zahtijevaju određene promjene na njima, a rezultat će biti nove karakteristike i nove funkcije.

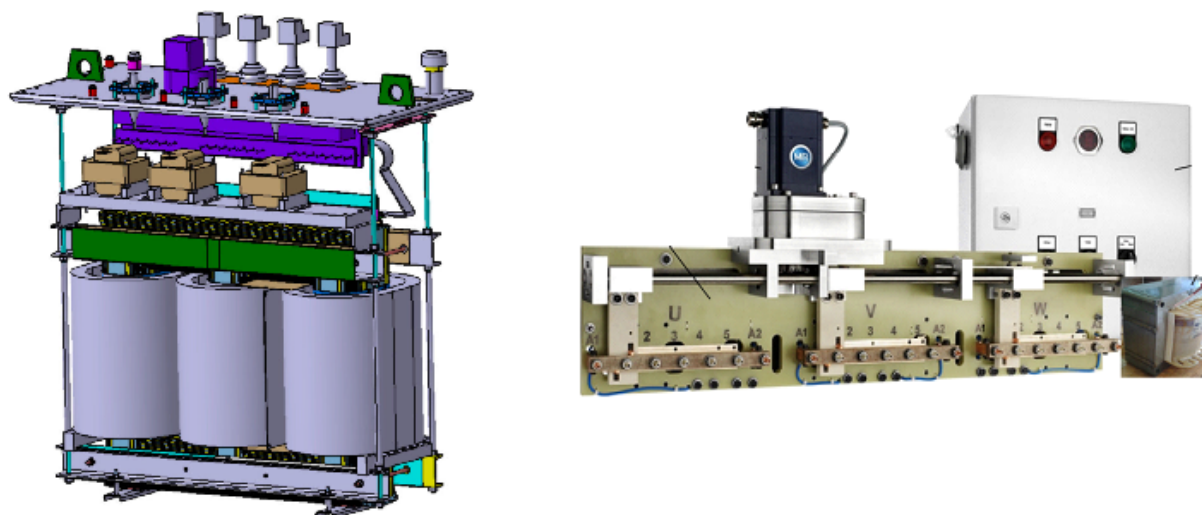
4.1. Distributivni transformator s automatskom regulacijom

Današnji klasični distributivni transformator prijenosnog omjera 10(20)/0,4 kV nema mogućnost promjene prijenosnog omjera pod opterećenjem te takvi transformatori održavaju napon niskonaponske distribucijske mreže ručnom regulacijom napona pomoću nekoliko položaja regulacije kojih u pravilu ima pet. Ta ručna regulacija odvija se pomoću preklopke koja je ugrađena na višenaponski namot [9].

Glavna funkcija distributivnog transformatora s automatskom regulacijom koja ga ujedno i razlikuje od klasičnog distributivnog transformatora je u mogućnosti dinamičkog prilagođavanja napona distribucijske mreže, tj. pružanju cjelokupne funkcionalnosti potrebne za samostalnu regulaciju napona niskonaponske mreže pod opterećenjem, i održavanju istoga u granicama propisanim normom EN 50160.

4.1.1. Usporedba klasičnog distributivnog transformatora i transformatora s automatskom regulacijom

Prilikom izrade transformatora s automatskom regulacijom napona nastojalo se ne povećati tlocrtna dimenzije tradicionalnih transformatora, već se samo mijenjala visina na način da se na klasični transformator ugradila regulacijska sklopka (slika 6).



Slika 6. Prikaz regulacijskog transformatora i regulacijske sklopke

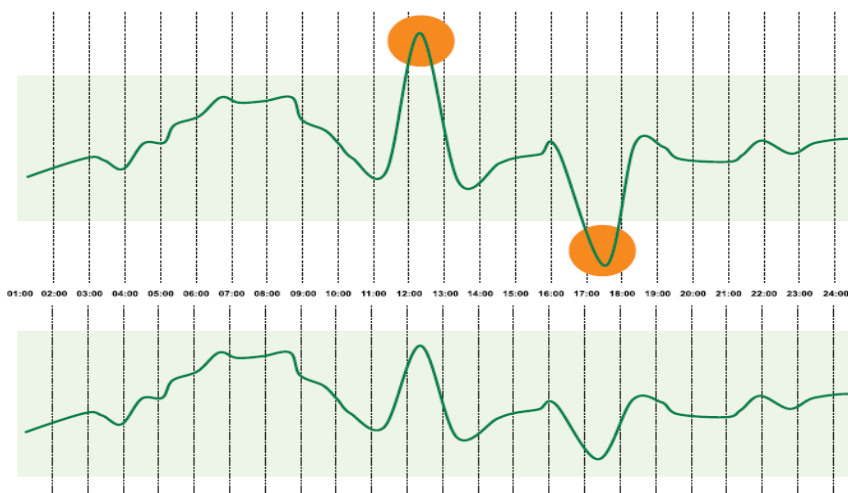
Podatci o usporedbi klasičnog distributivnog transformatora naspram transformatora s automatskom regulacijom dani su u tablici 3.

Tablica 3. Usporedba nazivnih podataka transformatora (Končar) [9]

Elementi	Klasični distributivni transformator	Transformator s automatskom regulacijom
Nazivna snaga	630 kVA	630 kVA
Prijenosni omjer	20 kV \pm 2x2,5% / 0,4 kV	20 kV \pm 4x2,5% / 0,4 kV
Promjena prienosnog omjera	U bez naponskom stanju	Pod naponom
Dimenzije (DxŠxV)	1355 x 900 x 1400 mm	1355 x 900 x 1710 mm
Masa ulja	350 kg	555 kg
Ukupna masa	2050 kg	2450 kg

Za razliku od klasičnog distributivnog transformatora, regulacijski distributivni transformator može imati opseg regulacije i do $\pm 10\%$ nazivnog napona. Iz tablice 3. je vidljivo da je regulacija transformatora s automatskom regulacijom izvedena u 9 položaja, 4 položaja iznad i 4 ispod nazivnog napona. Uz ovakvu izvedbu moguće su i druge izvedbe ovisno o zahtjevima mreže poput +6/-2 ili +5/-3.

U raznim literaturama se spominje različiti broj mogućih manipulacija koje transformator s automatskom regulacijom može odraditi. Uglavnom se radi o redu veličine 500 000 do 800 000 manipulacija u životnom vijeku transformatora.



Slika 5. Prikaz regulacije napona pomoću transformatora s automatskom regulacijom [5]

4.1.2. Prednosti i nedostaci transformatora s automatskom regulacijom

Kvaliteta električne energije je također bitna kao regulirana veličina što je vrlo važno iz razloga što je HEP ODS d.o.o. regulirani subjekt u Republici Hrvatskoj. Kako je već ranije spomenuto, električna energija je proizvod, roba koja mora imati određenu kvalitetu, definiranu Mrežnim pravilima elektroenergetskog sustava i Općim uvjetima za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom, kako bi mogla postići što bolju cijenu na tržištu. Veća kvaliteta električne energije rezultat je sigurne i pouzdane opskrbe krajnjih kupaca. [4,10]

Postojeća distribucijska mreža nije projektirana s ciljem priključenja distribuiranih izvora električne energije. Sunčane elektrane, budući da im proizvodnja ovisi isključivo o vremenskim uvjetima, tj. osunčanosti, mogu biti nepredvidljive te izazvati zamjetne oscilacije napona u mreži.

Upravo primjena transformatora s automatskom regulacijom na područjima gdje se nalazi puno distribuiranih izvora električne energije omogućuje opskrbu kupaca zadovoljavajućom kvalitetom električne energije. Na područjima gdje se planira gradnja sunčanih elektrana, a prilike u mreži to ne dopuštaju te je za stvaranje uvjeta u mreži potrebno snostiti visoke troškove, zamjena klasičnog transformatora transformatorom s automatskom regulacijom bi omogućila potencijalnim investitorima realizaciju njihovih projekata.

Transformator s automatskom regulacijom napona može biti jeftinija alternativa skupim rješenjima pojačanja mreže kao što je izgradnja nove transformatorske stanice zajedno sa srednjenaponskom i niskonaponskom mrežom, a radi prevladavanja problema kolebanja napona i povećanja kapaciteta mreže kako bi se stvorili uvjeti u mreži za priključenje distribuirane proizvodnje.

Isto tako jedan od razloga njihove primjene je i smanjenje prekida opskrbom električnom energijom. Budući da je kod klasičnih transformatora moguća manipulacija jedino u bez naponskom stanju, ovdje to nije slučaj. Kod ovih transformatora moguća je manipulacija pod teretom bez da korisnici mreže osjete ikakav nestanak napona. Na ovaj način smanjuju se i troškovi nastali potrebom za ručnom regulacijom te isto tako smanjuje se, ili još bolje reći eliminira, vjerojatnost nezadovoljstva korisnika mreže zbog prekida opskrbe električnom energijom.

Jedina stvar koja ne ide u prilog transformatoru s automatskom regulacijom napona je razlika u cijeni naspram klasičnog transformatora. Transformatori s automatskom regulacijom napona su otprilike dvostruko skuplji od klasičnih transformatora. No u konačnici možda ni to ne bi predstavljalo preveliki problem kada bi se napravila detaljna analiza isplativosti zamjene klasičnih transformatora transformatorima s automatskom regulacijom na područjima gdje se za time pokaže potreba.

5. ZAKLJUČAK

U referatu je prikazan utjecaj obnovljivih izvora električne energije, tj. sunčanih elektrana na promjene napona u niskonaponskoj elektroenergetskoj mreži. Sunčane elektrane i proizvedena električna energija iz njih će u budućnosti igrati sve veću ulogu u funkcioniranju elektroenergetskog sustava i u kvaliteti električne energije koja se isporučuje krajnjim korisnicima.

Primjena distribuiranih transformatora s automatskom regulacijom napona može uvelike pridonijeti poboljšanju funkcioniranja distribucijskog dijela elektroenergetskog sustava omogućivši svojom primjenom priključenje sve većeg broja sunčanih elektrana te prihvati proizvedene električne energije iz njih. Isto tako imati će zamjetan doprinos kvaliteti električne energije koja se isporučuje krajnjim kupcima te može imati veliki udio u ekonomskim uštedama vezanima uz stvaranje uvjeta u mreži za priključenje novih distribuiranih izvora električne energije kako HEP ODS-u tako i korisniku mreže.

6. LITERATURA

- [1] Priključenje elektrana na EEM HEP ODS-a, Studeni 2015, HEP ODS, Sektor za tehničke poslove
- [2] HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o., Godišnje izvješće 2012. g.
- [3] Priključenje distribuirane proizvodnje na mrežu, članak dostupan na stranici: <http://www.gradimo.hr/clanak/prikljucenje-distribuirane-proizvodnje-na-mrezu/36972>
- [4] Mrežna pravila elektroenergetskog sustava, Narodne novine br. 36/06
- [5] https://library.e.abb.com/public/c4fccc05930845de8a59a10286eb710c/Smart-R-Trafo_v3_clean.pdf
- [6] <http://www.energija.co.rs/uploads/pdf/Kvalitet%20električne%20energije%20-%20prirucnik.pdf>
- [7] Podatak dostupan na stranici: <http://31.45.242.218/HZN/Todb.nsf/wFrameset2?OpenFrameSet&Frame=Down&Src=%2FHZN%2FTodb.nsf%2F66011c0bda2bd4dfc1256cf300764c2d%2Fd341eec1d6537fcc125798200341a77%3FOpenDocument%26AutoFramed>
- [8] Europska norma HRN EN 50160:2012; Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža
- [9] Sanela Carević, Branimir Ćučić, Mario Bakarić, Martina Mikulić, „Regulacijski distributivni transformator“, HO CIRED, Trogir/Seget donji, svibanj 2014
- [10] Opći uvjeti za korištenje mreže i opskrbu električnom energijom, Narodne novine br. 85/2015