Broj rada: R3-08
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-08_126

IZAZOVI REGULACIJE NAPONA U MREŽAMA SA DISTRIBUISANOM PROIZVODNJOM

CHALLENGES OF VOLTAGE REGULATION IN NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION

Duško MILIJEVIĆ, Elektroprenos-Elektroprijenos BiH, Operativno područje Banja Luka*

KRATAK SADRŽAJ

Distributivne elektroenergetske mreže prolaze kroz značajne strukturne i operativne promjene usljed rasta decentralizovane proizvodnje iz obnovljivih izvora energije (OIE), elektrifikacije transporta (električna vozila (EV)) i sistema grijanja i hlađenja, kao i povećane dinamike potrošnje električne energije. Ovi trendovi dovode do čestih naponskih odstupanja i dvosmjernih tokova snage, čime tradicionalni koncept pasivne distributivne mreže postaje neodrživ. Regulacija napona pomoću energetskih transformatora sa regulacionim sklopkama pod opterećenjem (eng. On-Load Tap Changer (OLTC)), uključujući regulacione distributivne transformatore (eng. Voltage Regulated Distribution Transformer (VRDT)), predstavlja jedno od ključnih tehničkih rješenja za održavanje napona u dozvoljenim granicama i povećanje prihvatnog kapaciteta mreže za distributivnu proizvodnju. Međutim, povećana učestalost operacija regulacije napona i promjenljivi režimi rada uvode nove izazove u pogledu pouzdanosti, starenja i održavanja elektroenergetske opreme. Rad analizira ključne izazove regulacije napona u uslovima rasta distribuisanih izvora energije, elektrifikacije transporta i grijanja, promjenljivosti proizvodnje i potrošnje, kao i tehnička rješenja bazirana na distributivnim transformatorima sa regulacijom napona pod opterećenjem u cilju poboljšanja tehničkih performansi i dugoročne održivosti distributivnog sistema.

Ključne reči: OLTC, OIE, prihvatni kapacitet mreže, regulacija napona, VRDT

ABSTRACT

Distribution power networks are undergoing significant structural and operational changes due to the growth of dispersed generation from Renewable Energy Sources (RES), electrification of transport (Electric Vehicles (EV)) and heating and cooling systems, as well as increased dynamics of electricity consumption. These trends lead to frequent voltage deviations and bidirectional power flows, making the traditional concept of a passive distribution network unsustainable. Voltage regulation using power transformers with On-Load Tap Changer (OLTC), including the Voltage Regulated Distribution Transformer (VRDT), represents one of the key technical solutions for maintaining the voltage within the permitted limits and increasing the hosting capacity of the network for distributed generation. However, the increased frequency of voltage regulation operations and variable operating modes introduce new challenges in terms of reliability, aging and maintenance of power equipment. The paper analyzes the key challenges of voltage regulation in conditions of growth of distributed energy sources, electrification of transport and heating, variability of generation and consumption, as

* Duško Milijević dusko.milijevic@elprenos.ba

well as technical solutions based on distribution transformers with on-load voltage regulation in order to improve the technical performance and long-term sustainability of the distribution system.

Keywords: hosting capacity, OLTC, RES, voltage regulation, VRDT

1 UVOD

U prethodnom periodu distributivne elektroenergetske mreže su projektovane kao pasivni sistemi sa jednosmjernim tokom energije od izvora ka potrošačima i relativno stabilnim i u velikoj mjeri predvidljivim opterećenjem, a fokus je bio na stabilnosti i pouzdanosti sistema kao opšteg dobra jedne države. Međutim, ubrzani razvoj decentralizovane proizvodnje iz obnovljivih izvora energije, prvenstveno fotonaponskih sistema (zbog toga što su oni lokacijski veoma često blizu potrošačima za razliku od vjetroparkova), kao i elektrifikacija transporta i sistema grijanja i hlađenja, doveli su do značajnih promjena u načinu rada ovih mreža. Pored toga ulaskom privatnog kapitala u elektroenergetski sektor značajno su se promijenila pravila "igre". Primarni cilj više nije stabilnost i pouzdanost sistema u cjelini već maksimizacija dobiti pojedinaca nauštrb opšteg dobra. Tako da savremene distributivne sisteme karakterišu:

- dvosmjerni tokovi energije,
- visoka varijabilnost proizvodnje i potrošnje,
- nagle promjene opterećenja i distributivne proizvodnje,
- povećani zahtjevi za kvalitetom napajanja.

U takvim uslovima, regulacija napona postaje jedan od ključnih tehničkih izazova. Tradicionalni pristupi zasnovani na regulaciji samo sa viših naponskih nivoa više nisu dovoljni.

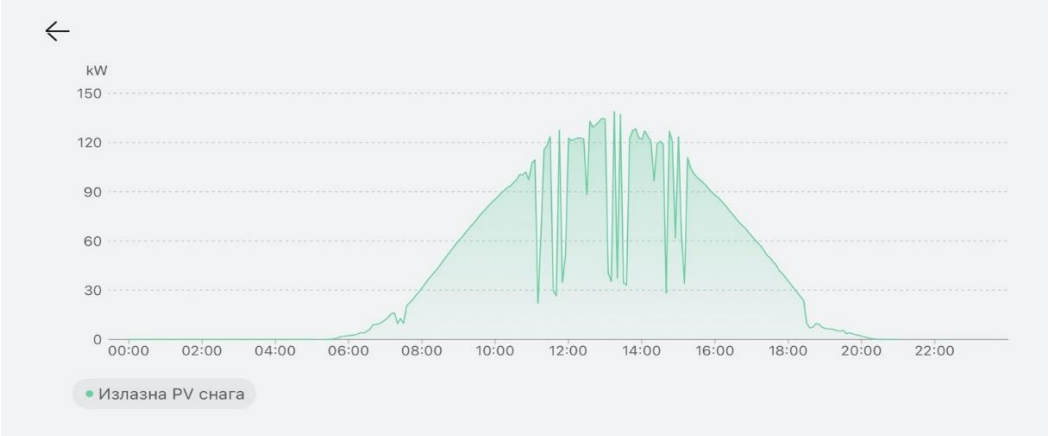
2 IZAZOVI REGULACIJE NAPONA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

2.1 Uticaj decentralizovane proizvodnje

Proizvodnja iz fotonaponskih sistema uvodi izraženu varijabilnost napona, naročito u niskonaponskim mrežama. Tokom perioda visoke proizvodnje i niske potrošnje (pogotovo kod dugačkih vodova) dolazi do značajnog porasta napona u odnosu na režim kada je velika potrošnja i niska ili nikakva proizvodnja. Takva promjena režima na dnevnom nivou unosi velike fluktuacije napona kod potrošača, a često i predstavlja prvo ograničenje za priključenje novih izvora. Osim toga stohastička pojava oblaka tokom sunčanih dana povremeno će značajno redukovati proizvodnju u zahvaćenom nepredvidljivo ili teško predvidljivo širokom području i periodu vremena. Na slici 1 je prikazana izlazna snaga invertera priključene solarne elektrane od 150 kW. Možemo primjetiti da od oko 6-11 sati proizvodnja raste gotovo pravilno, a da od oko 15.30 sati do zalaska sunca proizvodnja opada skoro idealnom krivom. Takođe se može primjetiti da otprilike od 11-15 sati ima mnogo naglih padova u proizvodnji energije koji su posljedica tipičnog promjenljivo oblačnog vremena odnosno direktna posljedica prolaska oblaka iznad solarne elektrane. U svega nekoliko sekundi proizvodnja opada sa 130 kW na 20-30 kW pa se ponovo vraća na normalnu pogonsku vrijednost. Dok elektrana proizvodi 130 kW kroz vodove teče manja struja iz trafostanice, pad napona na vodovima je manji, lokalni napon je nešto viši. Kada oblak prekrije elektranu i proizvodnja padne na 30 kW potrošači i dalje troše isto, razlika od oko 100 kW mora trenutno doći iz mreže. Struja kroz vodove naglo poraste, poveća se pad napona na vodovima, a lokalni napon opadne. Kada oblak prođe, proces se obrće. Efekat promjene će zavisi od veličine elektrane, gustine i veličine oblaka i parametara mreže. U SN mreži se dešava isto, ali je efekat manji. Ako je elektrana priključena na SN mrežu ili

preko SN/NN trafostanice, smanjuje se ili se mijenja tok aktivne snage kroz SN vod, mijenja se pad napona na tom vodu, mijenja se opterećenje transformatora.

Kod manjih fotonaponskih elektrana uticaj prolaska oblaka uglavnom je lokalnog karaktera i ograničen je na dio niskonaponske mreže na koji su priključene. Međutim, kod većih elektrana ili većeg broja fotonaponskih elektrana koncentrisanih na istom području, brze promjene proizvodnje mogu izazvati značajnije promjene tokova snaga i naponskih prilika, kako u niskonaponskoj, tako i u srednjenaponskoj mreži. Intenzitet i trajanje ovih promjena zavisi od instalisane snage elektrana, njihove prostorne raspodjele, karakteristika oblaka, kao i impedanse i topologije distributivne mreže. Zbog toga je bez modelovanja konkretne mreže i odgovarajućih vremenskih profila proizvodnje teško pouzdano procjeniti veličinu uticaja prolaska oblaka na naponske prilike u distributivnoj mreži.



Slika 1 – Izlazna snaga invertera priključene solarne elektrane od 150 kW

2.2 Elektrifikacija potrošnje i nove vrste potrošača

Druga značajna promjena u distributivnom sistemu su sve veće korištenje električnih vozila (koje nije kod nas zaživjelo u značajnoj mjeri kao u razvijenijim državama, ali će se vrlo vjerovatno povećavati tokom narednih godina prvenstveno kod korisnika koji dominantno koriste automobile na kraćim gradskim i prigradskim relacijama) kao i toplotnih pumpi kao efikasnih, cjenovno povoljnih i korisnički elegantnih sredstava za grijanje i hlađenje. U narednom periodu nas očekuje i sve veće procentualno učešće baterijskih postrojenja u ukupnoj potrošnji. Pri tome odluka o ulasku baterijskog postrojenja u sistem potrošača će biti u rukama privatnog kapitala koje ima za cilj maksimizaciju profita i teško će biti predvidljiva obzirom na postojanje većeg broja međusobno nezavisnih vlasnika sa različitim interesima i nivoom elektroenergetske pismenosti što će se odraziti na donošenje odluka u upravljanju periodima punjenja i pražnjenja baterijskih kapaciteta.

To znači da imamo nove vrste potrošača sa visokom stohastikom kod određenih potrošača, a značajnim vršnim zahtjevima kod drugih jer će u principu svi korisnici tokom ljeta uključivati klima uređaje u slično vrijeme odnosno u zimskom periodu grijanje. Istovremeno uključivanje velikog broja potrošača dovodi do povećanog opterećenja mreže i naponskih padova.

Umjesto stabilnosti i pouzdanosti imamo elemente stohastike i u proizvodnji i u potrošnji. Navedeni trendovi povećavaju neizvjesnost rada distributivnog sistema.

2.3 Ograničenja u planiranju mreže

Pravilnikom o priključenju malih elektrana na mrežu distribucije Republike Srpske [1] najveće dozvoljeno odstupanje (promjena) napona na mjestu priključenja distributivne proizvodnje na mrežu distribucije u stacionarnom režimu iznosi:

- ±5% ako se mjesto priključenja nalazi na srednjenaponskoj (SN) mreži, a +5%, -10% ako se mjesto priključenja nalazi na niskonaponskoj (NN) mreži, kako bi se osigurala usklađenost sa standardima kvaliteta napajanja u najnepovoljnijim uslovima.

Distributivna mrežna pravila Republike Srpske [2] propisuju da je maksimalno dozvoljeno odstupanje napona za NN mrežu u tački napajanja, u normalnim pogonskim uslovima, ±10%.

3 ULOGA OLTC, INVERTERA I VRDT U REGULACIJI NAPONA

Regulacione sklopke pod opterećenjem omogućavaju promjenu prenosnog odnosa transformatora bez prekida napajanja. U praksi imamo SN vodove koji na svom početku imaju prilično stabilan napon koji obezbjeđuje OLTC regulacija na energetskim transformatorima 110/x kV. Međutim, ti vodovi se vrlo često dalje granaju na odvode sa različitim dužinama i različitim opterećenjem što na kraju tih odvoda rezultuje naponima koji se mogu veoma značajno razlikovati i u pasivnim distributivnim mrežama, a u aktivnim pogotovo.

Sa pojavom aktivne distributivne mreže javlja se potreba za promjenama u eksploataciji transformatora radi održavanja nivoa napona. Tu bi značajnu pomoć mogle da pruže solarne elektrane koje su na mrežu spojene preko invertera koji imaju mogućnost i generisanja i potrošnje reaktivne energije, ali se u praksi to ne primjenjuje. Tako da u stvarnosti zbog promjena u proizvodnji, solarni sistemi sami po sebi izazivaju fluktuacije napona, umjesto da ih stabilizuju.

Pravilnik o priključenju malih elektrana na mrežu distribucije Republike Srpske ne obavezuje proizvođače da učestvuju u regulaciji. Većina solarnih elektrana (SE) je u vlasništvu privatnih investitora i oni nemaju nikakav interes da pružaju uslugu regulacije napona, a imaju negativne efekte proizvodnje ili potrošnje reaktivne energije jer inverter ima ograničen ukupni kapacitet (tj. fiksnu prividnu snagu) što znači da ako ima protoka reaktivne energije kroz inverter ona mu ograničava kapacitet za proizvodnju aktivne energije, a naplaćuje se isključivo za proizvedenu aktivnu energiju. Tako da smanjenje aktivne snage radi plasiranja ili potrošnje reaktivne snage (regulacije napona) donosi direktan finansijski gubitak vlasniku elektrane. Čak i u situacijama kada je inverter predimenzionisan ili u dijelovima dana kada ima manju proizvodnju aktivne energije i ima prostora za određeni protok reaktivne energije vlasnici SE nemaju prirodan interes da to rade besplatno jer proizvodnja ili apsorpcija reaktivne snage ima negativne fizičke posledice po samu opremu u smislu da rad sa reaktivnom snagom direktno utiče na elektroniku invertora. Prolazak reaktivne snage znači da kroz poluprovodnike teče veća ukupna struja. Veća struja znači da se komponente invertora više zagrijavaju jer gubici zavise od kvadrata struje i inverteri proizvode više toplote. Kao posljedica toga, sistem hlađenja radi intenzivnije i ventilatori mogu imati duže vrijeme rada, što dugoročno može povećati njihovo habanje i vjerovatnoću otkaza. U ekstremnim slučajevima, usljed nedovoljnog hlađenja i pregrijavanja komponenti, može doći i do požara. Povišena radna temperatura, u svakom slučaju, ubrzava starenje pojedinih komponenti, uključujući izolacione materijale, elektrolitske kondenzatore i lemljene spojeve što može dovesti do skraćenja očekivanog radnog vijeka invertora.

Savremeni inverteri imaju ugrađenu funkciju automatskog softverskog ograničavanja izlazne snage (engl. *derating*), koja se aktivira pri povišenoj unutrašnjoj temperaturi. Cilj ove funkcije je smanjenje zagrijavanja energetskih komponenti, sprječavanje pregrijavanja unutar kućišta i očuvanje pouzdanosti i radnog vijeka invertora. Tokom veoma toplih ljetnih dana ili pri nepovoljnim uslovima hlađenja, derating može dovesti do privremenog smanjenja izlazne snage elektrane.

Realnost je da većina sistema radi sa fiksnim faktorom snage ($\cos \varphi = 1$), što znači da ne pomažu mreži kada napon varira. Osim toga stariji modeli solarnih invertora projektovani su isključivo za isporuku maksimalne aktivne snage u mrežu i ti uređaji nemaju mogućnost upravljanja reaktivnom snagom, koja je ključna za podizanje ili spuštanje tj. regulaciju napona.

3.1 Distributivni transformatori sa regulacijom pod opterećenjem (VRDT)

U zadnjih desetak godina pojavili su se distributivni transformatori koji imaju regulaciju napona pod opterećenjem (VRDT) što značajno olakšava regulisanje lokalnih naponskih prilika. U principu se VRDT sastoje od aktivnih dijelova (kontrolnog i kontrolisanog elementa) i standardnog transformatora sa regulacijom u beznaponskom stanju i mogu biti realizovani sa regulacijom na SN i na NN strani.

Međutim, mana takvog rješenja je cijena OLTC koja se kod jednog renomiranog proizvođača kreće od 4750 eura po komadu za standardni tip [5] i od 5700 eura po komadu za tip regulacije sa dinamičkim podešenjem [6]. Standardni tip ima fiksni opseg regulacije, a dinamička regulacija ima prilagođavanje podešenja u realnom vremenu na osnovu opterećenja odnosno pada napona koje takvo opterećenje izaziva. Postoji i još jedan tip regulacije (E.ON) čiji algoritam sprječava prekomjernu upotrebu u mrežama sa obnovljivim izvorima. E.ON regulacija optimizuje rad OLTC-a u distributivnim mrežama sa visokim udjelom obnovljivih izvora, smanjujući habanje kroz analizu trendova napona umesto brzih reakcija na fluktuacije.

Maksimalni opseg regulacije je ±15%, a rok isporuke je 3-4 sedmice. Tako širok opseg omogućava preciznu regulaciju napona sa finim podešavanjima, i potpuno automatsku regulaciju napona bez ljudske intervencije. Navedene cijene uključuju i mehaničku preklopku i upravljačku jedinicu i proizvođač navodi da nije potrebno servisiranje tokom čitavog životnog vijeka transformatora što bih prihvatio sa rezervom dok se ne dokaže u praksi. Takođe ovakve jedinice imaju mogućnost podešavanja alarma, mogućnosti snimanja i povezivanja sa SCADA sistemima i pametnim mrežama.

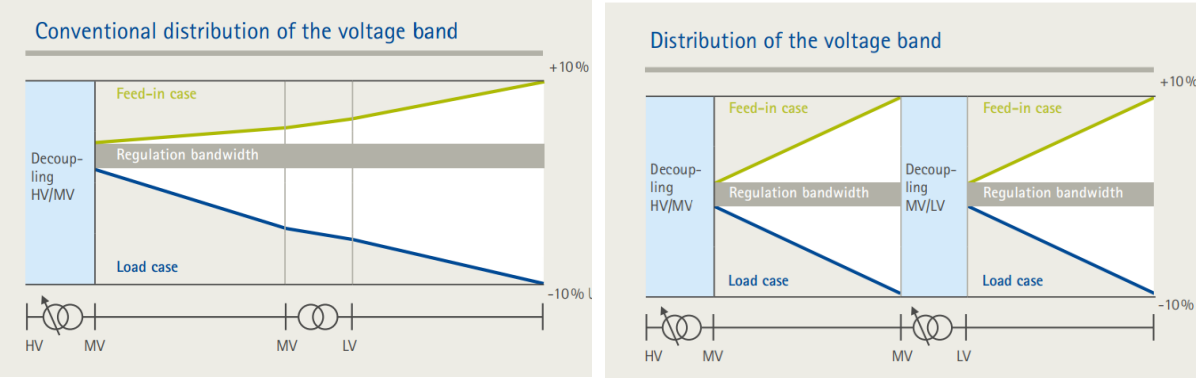
Pri tome treba imati na umu da su navedene cijene samo za OLTC regulaciju distributivnih transformatora tj. samo regulacija bez transformatora. Navedene cijene su bez PDV-a za transformatore naponskog nivoa do 20 kV, snage do 1 MVA, opseg regulacije ±15% i u slučaju nabavke jednog komada. Za veće snage, više naponske nivoe i veće količine drugačije su i cijene, ali se i iz ovih cijena može vidjeti omjer cijene same regulacije prema cijeni samog klasičnog transformatora.

Koliko je autoru poznato kod nas na području Elektrokrajine, koja obuhvata skoro kompletno zapadno područje Republike Srpske, još uvijek nije ugrađen ni jedan takav transformator. Ono što su za ovdašnje distribucije značajna sredstva (po jediničnoj cijeni komada imajući u vidu koliko bi ih bilo potrebno ugraditi) u bogatijim zemljama nisu, tako da se u distributivnim preduzećima u Zapadnoj Evropi već primjenjuju ovakva rješenja. Tamo su zaključili da se upotrebom ovakvih rješenja može povećati prihvatni kapacitet distributivne mreže odnosno

maksimalna količina energije iz obnovljivih izvora (obično solarnih panela) koju distributivna mreža može primiti, a da pri tome napon ostane u dozvoljenim granicama. Povećanje prihvatnog kapaciteta mreže pomoću VRDT je često znatno povoljnije od klasičnog pojačavanja mreže kojim bi se dobio dodatni kapacitet za nove korisnike. U praksi operatora distributivnih sistema, odluka o izboru tehničkog rješenja nije zasnovana isključivo na tehničkim performansama, već i na ukupnim troškovima implementacije i eksploatacije. U tom smislu, regulacioni distributivni transformatori (VRDT) predstavljaju interesantnu alternativu klasičnim pristupima zasnovanim na fizičkom ojačanju mreže što uključuje:

- polaganje novih kablova većeg presjeka,
- izgradnju novih vodova,
- građevinske radove u urbanim i ruralnim sredinama.

Na slici 2 vidimo raspodjelu napona u distributivnoj mreži u slučaju distributivnog voda sa klasičnim distributivnim transformatorom (a) i sa ugrađenim distributivnim transformatorom koji ima regulaciju napona pod opterećenjem (VRDT) (b) [7].



(a) *(b)*

Slika 2 – Raspodjela napona duž voda u slučaju distributivnog voda bez VRDT (a) i sa ugrađenim VRDT (b) [7]

Slika 2(a) prikazuje kako se dozvoljeni opseg varijacije napona dijeli između srednjenaponske (SN) i niskonaponske (NN) mreže. Klasični transformator SN/NN ima fiksni prenosni odnos i ne može da utiče na promjene napona na dnevnom nivou. Kako se udaljavamo od TS 110/x kV, u slučaju kada nema distributivne proizvodnje, napon konstantno opada kroz SN i NN mrežu (plava linija), približavajući se donjoj dozvoljenoj granici (-10%) [2]. Kada lokalne solarne elektrane proizvode električnu energiju (zelena linija), napon raste duž cijele linije i brzo može da probije gornju dozvoljenu granicu (+10%). Kapacitet mreže za prihvat novih potrošača ili proizvodnih kapaciteta je ograničen jer napon brzo dostiže kritične granice.

Slika 2(b) prikazuje kako ugradnja SN/NN transformatora koji posjeduje regulaciju pod opterećenjem uspješno "razdvaja" naponske prilike u SN mreži od prilika u NN mreži. Na slici 2(b) se jasno vidi stepenasti skok odnosno pad na mjestu ugradnje VRDT-a. Bez obzira na to koliki je napon na SN strani (visok zbog proizvodnje ili nizak zbog potrošnje), VRDT automatski mijenja prenosni odnos i na NN strani vraća napon u dozvoljene granice. Time NN mreža dobija sopstveni potencijal za pad ili rast napona, nezavisno od stanja u SN mreži. Možemo zaključiti da se uvođenjem distributivnog transformatora sa regulacijom pod opterećenjem povećava kapacitet distributivne mreže za integraciju solarnih elektrana i novih velikih potrošača. Umjesto skupog i dugotrajnog kopanja i mijenjanja kablova da bi se smanjio pad napona, problem se rješava lokalnom automatizacijom napona na samom transformatoru. Ovakvi zahvati su kapitalno intenzivni, vremenski zahtjevni i operativno složeni, naročito u urbanim zonama. Pored troškova radova, značajan faktor predstavlja i promjenljivost cijena

bakra i aluminijuma na svjetskom tržištu, trošak rekonstrukcije terena i administrativne procedure (dozvole, imovinsko-pravni odnosi).

Sa druge strane, primjena VRDT omogućava rješavanje problema napona na postojećoj lokaciji trafostanice, bez izmjena na vodovima i bez dodatnih građevinskih zahvata. Ovakav pristup može rezultovati značajnim uštedama u odnosu na klasičnu rekonstrukciju mreže, zavisno od konfiguracije i dužine vodova. Sa ekonomskog aspekta, primjena VRDT potencijalno omogućava odgađanje investicija u nove TS i SN dalekovode za period od 5 do 10 godina i rasterećenje investicionog budžeta.

Važno je naglasiti da VRDT ne predstavlja univerzalno rješenje za sve probleme mreže i da svaka situacija zahtjeva zasebnu i sveobuhvatnu analizu, ali svakako predstavlja značajnu dodatnu mogućnost. Njegova primjena je najefikasnija u slučajevima kada je mreža:

- naponski ograničena (što je tipično za NN mreže),
- sa značajnom decentralizovanom proizvodnjom,
- bez dominantnog strujnog ograničenja.

Ukratko primjena VRDT omogućava:

- pomjeranje referentnog napona i veći potencijal za integraciju proizvodnje i potrošnje promjenljivog tipa,
- izbjegavanje ili odlaganje provođenja mjera pojačanja mreže.
- povećanje dozvoljenog naponskog opsega i značajno povećanje prihvatnog kapaciteta određenih vodova eliminisanjem naponskog ograničenja. U teoriji, povećanje prihvatnog kapaciteta može iznositi i do 150–180% u odnosu na mreže bez regulacije [8], pod uslovom da je naponsko ograničenje problem, a ne strujno.

U vremenu koje dolazi može doći do potrebe da se i kod nas integracijom OLTC-a u distributivne transformatore naponskog nivoa do 35 kV (VRDT) omogući lokalna regulacija napona u SN i NN mrežama samo je pitanje ko će to finansirati.

4 PRIMJERI IZ PRAKSE

4.1 Uticaj izgradnje SE na lokalne napone i načini rješavanja

Na području distribucije Elektrokrajina, trenutno je instalisano i pušteno u pogon oko 150-160 MVA malih distributivnih pretežno solarnih elektrana, a jedna solarna elektrana je napravljena i na dalekovodu 20 kV Vijačani. Usljed novonastale situacije na tom odvodu je dolazilo do prevelikog porasta napona. U pitanju je TS Kamenolom, transformator je 630 kVA, na 20 kV dalekovodu Vijačani koji polazi iz TS 110/20 kV Ukrina koja je inače slabo opterećena TS sa malim konzumom od oko 1 MW. Okolne distributivne SN TS na dalekovodu Vijačani su male i podopterećene i do izgradnje solarne elektrane Kamenolom je bio jedini siguran i veći potrošač na vodu. Pad napona je bio od 110 kV TS do Kamenoloma, ali zbog solarne elektrane (SE) je sad viši napon na kraju i sredini voda nego u 110 kV TS. Kolege iz distribucije su pratile dijagrame napona na sumarnim brojilima u nekoliko SN TS na vodu i zaključili da je napon povišen. Na ostalim odvodima iz TS 110 kV Ukrina napon je bio uredan. Međutim, kod potrošača Kamenolom javljao se problem, nakon izgradnje solarne elektrane u neposrednoj blizini, jer je reagovala prenaponska zaštita na frekventnim regulatorima drobilice i mlina. Nakon promjene prenosnog odnosa distributivnog transformatora (u beznaponskom stanju) zaključilo se da ni to nije pomoglo i onda je izvršena zamijena transformatora drugom

jedinicom (20/0,4 kV umjesto 20/0,42 kV) kojoj je takođe promjenjen prenosni odnos čime je otklonjen problem.

Takođe je bio problem na području opštine i lokalne distribucije u Mrkonjiću Gradu kad je bilo potrebno spojiti solarnu elektranu snage 1 MW na 10 kV mrežu. Odvod 10 kV na koji je bilo potrebno spojiti SE se napajao iz distributivne rasklopne trafostanice preko transformatora 21/10,5 kV, snage 4 MVA. Iz rasklopne TS su polazili dugački dalekovodi i prenosni odnos transformatora bio je adekvatno podešen tako da potrošači, od kojih su velika većina seoska domaćinstva, imaju zadovoljavajući napon. Međutim, SE na krovu fabrike u Mrkonjić Gradu nalazi se na udaljenosti od 500 m od distributivne rasklopne TS. Promjena prenosnog odnosa, tj. žargonski preštufavanje SN/SN transformatora starog 50 g i još 50-ak drugih još starijih transformatora (SN/NN) duž odvoda na SN mreži nije bila opcija, zbog problema koji se pojavljuju prilikom promjene prenosnog odnosa na transformatorima na kojima nikad nije izvršena promjena, pa je donijeta odluka da se izvrši zamjena transformatora 10/0,42 kV, 1 MVA preko kojeg je priključena SE sa nekim drugim koji ima 400 V ili 380 V na sekundaru čime je riješen problem.

Bilo je još sličnih situacija u kojima je problem rješavan "žongliranjem" transformatora iz rezervi, međutim sa učestalim javljanjem sličnih problema sužava se manevarski prostor za rješavanje problema na ovaj način. Ukoliko bi se solarne elektrane priključivale preko distributivnih transformatora koji imaju regulaciju napona pod opterećenjem to bi značajno olakšalo regulisanje naponskih prilika u distributivnoj mreži i olakšalo probleme koje su distributivna preduzeća imala sa naponima u NN mreži i prije pojave solarnih elektrana. Zbog masovne integracije malih i srednjih solarnih elektrana, opravdano je razmotriti pooštravanje tehničkih uslova priključenja kroz obaveznu primjenu distributivnih transformatora sa regulacijom pod opterećenjem. Investicija u VRDT i priključenje solarne elektrane preko njih neznatno utiče na ukupne troškove projekta. Sa druge strane, ova oprema garantuje stabilnost rada sistema u ljetnom periodu, kada su fluktuacije napona u mreži najizraženije.

4.2 Uticaj decentralizovane proizvodnje na tok snage kroz energetski transformator i na naponske prilike na sabirnicama

U tabeli I prikazani su tokovi snage kroz energetski tranformator 110/21/36,75 kV, YNyn0d5, 20/20/14 MVA i naponi na 110, 35 i 20 kV sabirnicama u TS sa distributivnom proizvodnjom i na 35 i na 20 kV koji su zabilježeni na SCADA sistemu na dan 4.4.2026. g. Instalisana snaga distributivne proizvodnje je oko 9 MVA na 35 kV strani, a na 20 kV strani između 6-7 MVA. Maksimalna potrošnja je oko 1 MVA na 35 kV strani, a na 20 kV strani oko 4,5 MVA. Regulaciona sklopka prati napon na 20 kV sabirnicama. U našem SCADA sistemu je usvojena nomenklatura da pozitivan predznak (+) označava da snaga ulazi u energetski transformator, a (-) da izlazi iz njega te u tom smislu +P na 110 kV strani znači da snaga ide na potrošačima, a -P da je dominantna distributivna proizvodnja. Dok na SN nivou predznak (-) označava potrošnju, a (+) da dominira distributivna proizvodnja. Problem nastaje kada je automatski regulator napona (ARN) prati samo jedan napon (20 kV u ovom slučaju), dok druga strana (35 kV) trpi indirektne posljedice regulacije.

Vrijeme	U_110kV (kV)	P_110kV (MW)	Q_110kV (MVAr)	U_35kV (kV)	P_35kV (MW)	Q_35kV (MVAr)	U_20kV (kV)	P_20kV (MW)	Q_20kV (MVAr)
00:00	118,86	3,71	-1,9	36,35	-1,07	0,88	20,52	-2,56	1,1
01:00	119,67	3,24	-2,04	36,32	-0,98	0,9	20,5	-2,19	1,21
02:00	120,35	2,79	-2,16	36,16	-0,91	0,9	20,41	-1,81	1,32
03:00	120,86	2,6	-2,2	36,32	-0,85	0,9	20,51	-1,69	1,33
04:00	120,79	2,59	-2,2	36,32	-0,81	0,91	20,51	-1,73	1,33
05:00	120,54	2,57	-2,21	36,25	-0,81	0,9	20,47	-1,7	1,34
06:00	120,66	2,79	-2,16	36,28	-0,88	0,89	20,48	-1,86	1,31
07:00	120,01	3,25	-1,96	36,07	-0,85	0,9	20,35	-2,33	1,13
08:00	118,79	2,5	-1,95	35,69	-0,38	0,92	20,15	-2,07	1,05
09:00	118,28	**-0,32**	-1,86	35,84	**1,28**	0,97	20,24	-0,95	0,9
10:00	117,66	**-3,63**	-1,52	35,82	**3,35**	0,97	20,24	**0,25**	0,66
11:00	118,37	**-6,18**	-1,21	36,36	**4,79**	0,87	20,54	**1,31**	0,63
12:00	118,61	**-7,57**	-0,82	36,44	**5,93**	0,81	20,58	**1,55**	0,44
13:00	119,18	**-8,62**	-0,78	36,36	**6,55**	0,78	20,54	**1,95**	0,56
14:00	119,95	**-8,81**	-0,67	36,35	**6,7**	0,75	20,51	**2**	0,5
15:00	120,29	**-8,15**	-0,8	36,47	**6,3**	0,76	20,58	**1,76**	0,54
16:00	120,49	**-7,2**	-1,19	36,37	**5,55**	0,85	20,54	**1,57**	0,72
17:00	120,21	**-5,32**	-1,57	36,08	**4,28**	0,92	20,46	**1**	0,87
18:00	119,75	**-1,77**	-1,99	36,03	**2,2**	0,97	20,42	-0,41	1,05
19:00	118,92	2	-2,01	35,75	-0,07	0,92	20,26	-1,88	1,14
20:00	118,14	3,9	-1,87	35,84	-1,12	0,86	20,32	-2,68	1,11
21:00	117,5	4,28	-1,8	35,73	-1,29	0,87	20,26	-2,9	1,06
22:00	118,05	4,07	-1,84	35,9	-1,23	0,87	20,36	-2,76	1,07
23:00	118,48	3,87	-1,88	36,06	-1,14	0,88	20,44	-2,64	1,09

Tabela I: Tokovi snage i naponi na sabirnicama u TS sa distributivnom proizvodnjom i na 35 i na 20 kV

Vidimo iz tabele I da poslije 9 sati ujutro aktivna snaga počinje teći u kontra smjeru od onog što je dosad bilo uobičajeno tj. da distributivna proizvodnja prevaziđe potrošnju i počne isporučivati aktivnu snagu u 110 kV mrežu i da to traje do otprilike 19 sati naveče. Regulator napona (ARN) uspješno drži 20 kV stranu stabilnom (20,15-20,58 kV), a regulaciona sklopka je u položaju 4 (prema procjenama na osnovu napona 110 kV i 20 kV). Primjetno je da napon na 35 kV sabirnicama raste do 36,47 kV, a pošto dominira distributivna proizvodnja napon duž 35 kV odvoda je veći. Međutim u tabeli I su prikazane usrednjene satne vrijednosti. Tabel II i II prikazuju usrednjene 15-minutne maksimalne vrijednosti SN napona zabilježene na SKADA sistemu u određenom periodu.

Datum	Vrijeme	U_35kV (kV)
4.5.2026.	10:15	36,64
16.5.2026.	16:00	36,64
19.6.2026.	00:00	36,61
1.6.2026.	16:45	35,61
6.6.2026.	15:30	36,61

Datum	Vrijeme	U_20kV (kV)
26.6.2026.	16:00	20,81
26.6.2026.	15:45	20,8
6.6.2026.	15:30	20,79
5.6.2026.	11:00	20,79
5.5.2026.	01:00	20,78

Tabela II i III: Maksimalne 15-minutne vrijednosti na 35 i na 20 kV sabirnicama

Možemo da primjetimo da su 15-minutne vrijednosti napona možda i bitnije jer satne vrijednosti mogu da sakriju kratkotrajne naponske vrhove. Ovi podaci su relevantni jer zaštite invertora i OLTC regulator reaguju na trenutni ili kratkotrajni porast napona, a ne na satni prosjek, i upravo u tim kratkotrajnim maksimumima može doći do isključenja jedne ili više elektrana. Najveći izmjereni napon na 35 kV sabirnicama iznosi 36,64 kV što odgovara približno 104,7 % Un, a na 20 kV sabirnicama 20,81 kV odnosno 104,1 % Un. Dakle, oba napona nalaze se vrlo blizu gornje dozvoljene radne granice. Iako izmjereni napon nije dostigao najveći dozvoljeni pogonski napon (SI = 38 kV) starijeg transformatora u TS vrijednost od 36,64 kV predstavlja približno 96 % tog napona. Dugotrajan rad pri tako visokim pogonskim naponima povećava električno naprezanje izolacionog sistema i može ubrzati procese njegovog starenja, posebno kod starije opreme. Takođe treba imati u vidu da su ovo naponi na sabirnicama transformatorske stanice 110/x kV. Na izvodima gdje se nalaze solarne elektrane situacija je drugačija. Elektrane proizvode aktivnu snagu i kroz vodove teče struja prema TS znači u obrnutom smjeru u odnosu na uobičajeni tok. Zbog pada napona na impedansi voda dolazi do tzv. naponskog porasta, pa je napon na mjestu priključenja elektrane veći nego na sabirnicama TS. Problemi sa naponom uvijek prvo javljaju kod krajnjih proizvođača, dok su naponi u TS još uvijek formalno unutar dozvoljenih granica.

Posebno zanimljiv podatak je od 6.6.2026. u 15.30 sati kada je U35 = 36,61 kV, a U20 = 20,79 kV. Oba napona su praktično istovremeno dostigla gotovo maksimalne vrijednosti. Nije poznat položaj regulacione preklopke u tom momentu.

Međutim nije teško zamisliti scenario u kojem potrošnja na 20 kV strani naglo raste, a proizvodnja na 35 kV strani je na maksimumu (avgust mjesec, velike temperature, visoki naponi u mreži, uključeni sistemi za klimatizaciju). U slučaju ispada 20 kV dalekovoda sa velikim udjelom distributivne proizvodnje, a malo potrošnje ili lokalnog nailaska oblaka koji će smanjiti proizvodnju SE samo na 20 kV strani ARN "vidi" pad napona na 20 kV sabirnicama i pomjera regulacionu sklopku da povećava napon na 20 kV strani. Time napon na 35 kV strani dodatno raste. Ovo je direktan primjer gdje ispravna odluka ARN-a za jedan namotaj može imati neželjene posljedice po drugi naponski nivo. U transformatorskim stanicama kao što je ova hitna mjera bi bilo uvođenje logičke blokade koja ARN-u onemogućava komandu za povećavanje napona, ukoliko napon na 35 kV strani pređe kritičnu granicu. Ovo je pasivna zaštita koja sprečava havarijski rast napona. Međutim daleko bolja opcija bi bila potpuna promjena algoritma regulacije tako da uređaj istovremeno prati oba SN napona. ARN bi u ovom režimu automatski žrtvovao idealan napon na 20 kV strani (dopuštajući blagi pad) kako bi aktivno spustio napon na 35 kV strani i spasio rad solarnih elektrana. Međutim ovo zahtjeva nabavku novije generacije uređaja za automatsku regulaciju napona tzv. dualna regulacija napona u odnosu na onu kojom sada raspolažemo i trenutno na području OP Banja Luka ne postoji aktivirana automatska regulacija napona koja uvažava dva naponska nivoa.

Takođe se ne koristi, ali postoji i regulacija po opterećenju (LDC). U takvim sistemima, pad napona je proporcionalan struji, pa LDC efikasno kompenzuje gubitke do najudaljenijeg potrošača.

Iako bi u ovom konkretnom slučaju bila štetna, regulacija po opterećenju može i dalje da ima smisla kod određenih situacija u pogonu jer svaka transformatorska stanica postaje slučaj za sebe u smislu raznolikosti priključenih proizvodnih kapaciteta, naponskih nivoa i nivoa potrošnje tako da se dosadašnja praksa primjenjivanja istih rješenja za upravljanje lokalnim naponskim prilikama na svim energetskim transformatorima može pokazati pogrešnom. Kod tronamotajnih transformatora sa mješovitim ulogama SN mreže (proizvodnja/potrošnja), LDC

treba trajno deaktivirati u slučajevima kao što je ovaj, ali možda će se vremenom javiti potreba za ovakvim tipom regulacije u nekoj drugoj konstelaciji SN mreže, proizvodnje i potrošnje.

5 ULOGA BATERIJSKIH SISTEMA U STABILIZACIJI NAPONA

U narednom periodu možemo očekivati povećanje baterijskih kapaciteta obzirom na pojavu negativnih cijena za proizvodnju iz solarnih elektrana u određenim vremenskim periodima tokom dana. Baterijski sistemi mogu da rješavaju dva ključna problema solarnih elektrana: fluktuacije proizvedene aktivne snage (kada preko solarne elektrane pređe gust oblak, snaga elektrane može pasti sa 100% na 10% u roku od samo nekoliko sekundi**)** i vremenski nesklad između maksimalne proizvodnje i maksimalne potrošnje.

Možemo reći da se njihova uloga u stabilizaciji napona djeli na direktnu i indirektnu:

- Peglanje vršnog napona: Kada solarna elektrana proizvodi maksimum energije, doći će do porasta napona u lokalnoj mreži. Ukoliko je priključena baterija ona će povući dio energije (radi akumulacije i kasnijeg korištenja) i tako prirodno spustiti napon i spriječiti podizanje napona preko dozvoljene granice.
- Podrška pri naglom padu: Kada iznenada naiđe gust oblak, proizvodnja solarne elektrane pada za nekoliko sekundi. To izaziva trenutni lokalni pad napona u mreži. Baterijski sistem može da reaguje vrlo brzo i da ubacuje energiju u mrežu, sprječavajući pad napona i treperenje osvjetljenja (fliker).

Kao što smo rekli u uvodu, nekada su svi učesnici u EES-u više manje imali isti cilj (pouzdanost i stabilnost sistema), ali sada imamo sukob interesa. Sa jedne strane imamo interes maksimizacije dobiti za privatnog vlasnika SE bez obzira na sistem, a sa druge strane i dalje imamo državne ili djelimično državne firme koje se bore da održe stabilnost sistema. Privatni vlasnik solarne elektrane nema nikakav ekonomski interes da "troši" ograničene cikluse svoje skupe baterije na rješavanje iznenadnih propada proizvodnje i besplatno peglanje napona.

Primarna strategija privatnih investitora je napuniti jeftino (kad sve SE imaju proizvodnju), a prodavati što skuplje u periodima vršne potrošnje kada je cijena energije najviša. Baterije imaju ograničen vijek trajanja, ograničen broj punjenja i svako bespotrebno (sa pozicije vlasnika SE) punjenje i pražnjenje skraćuje njihov radni vijek i donosi čist finansijski gubitak vlasniku, osim ako operater sistema to eksplicitno ne plaća kroz pomoćne usluge.

U modernim solarnim sistemima najčešće se koriste LFP (Litijum-gvožđe-fosfat) baterije. One su standard jer su bezbjednije i dugotrajnije od klasičnih litijum-jonskih baterija. Teoretski tipične LFP baterije pružaju između 4000 i 6000 ciklusa prije nego što njihov kapacitet padne na 80% početne vrijednosti (što se smatra krajem primarnog radnog vijeka). U uslovima gdje se obično napravi 250 do 300 ciklusa godišnje, ove baterije traju oko 12 do 15 godina, kada bi sve išlo kako je planirano. Ali obično ne ide sve po planu.

6 ZAKLJUČAK

Savremene distributivne mreže suočavaju se sa značajnim izazovima u regulaciji napona usljed rasta decentralizovane proizvodnje i dinamične potrošnje. Tradicionalni koncept pasivne distributivne mreže i regulacije napona sa viših naponskih nivoa postaje sve manje efikasan u uslovima dvosmjernih tokova snage i izraženih dnevnih promjena režima rada. Takođe, koncept regulacije napona zasnovan na praćenju stanja samo na jednom sekundarnom namotaju

tronamotajnog transformatora, kao i koncept priključenja solarnih elektrana preko distributivnih transformatora sa prenosnim odnosom koji se mijenja u beznaponskom stanju, postaju sve manje održivi u uslovima visoke integracije solarnih elektrana.

U radu su analizirani tehnički problemi koji nastaju usljed porasta udjela solarnih elektrana u distributivnim mrežama, uključujući porast napona, ograničenja prihvatnog kapaciteta mreže, povećanu složenost rada automatskih regulatora napona i uticaj distributivne proizvodnje na eksploataciju elektroenergetske opreme. Posebno su razmatrani praktični primjeri iz pogona distributivne mreže Elektrokrajine, koji potvrđuju da postojeća mrežna infrastruktura sve češće zahtijeva nova tehnička rješenja za održavanje dozvoljenih naponskih prilika.

Distributivni transformatori sa regulacijom napona pod opterećenjem (VRDT) predstavljaju jedno od perspektivnih rješenja za povećanje prihvatnog kapaciteta mreže i smanjenje potrebe za klasičnim pojačanjem mreže. Njihova primjena omogućava lokalnu regulaciju napona, povećava fleksibilnost rada distributivnog sistema i može odložiti značajne investicije u rekonstrukciju mreže. Međutim, ekonomska opravdanost njihove primjene zavisi od konkretne konfiguracije mreže, nivoa distribuisane proizvodnje i lokalnih pogonskih uslova.

U narednom periodu može se očekivati sve veća potreba za primjenom naprednih algoritama regulacije napona, koordinisanim upravljanjem više naponskih nivoa, kao i integracijom baterijskih sistema i pametnih mrežnih funkcija. Zbog toga će planiranje i eksploatacija distributivnih mreža zahtijevati znatno fleksibilniji i dinamičniji pristup u odnosu na tradicionalne metode projektovanja i upravljanja.

Kao jedno od mogućih rješenja, nameće se potreba prelaska na aktivnu, dualnu regulaciju koja obuhvata mjerenja sa svih SN namotaja transformatora. U konkretnom slučaju koji je razmatran implementacija blokadne logike po naponu 35 kV i algoritama koji daju prioritet naponskoj strani transformatora koja je više opterećena potrošnjom, predstavljaju nužne tehničke korake, ali nije trajno rješenje. U uslovima gdje profit privatnih investitora zavisi od neprekidnog rada postrojenja, a stabilnost sistema od precizne regulacije, modernizacija automatike ARN više nije opcija, već preduslov za dalji razvoj distributivnog sistema. Pri tome treba imati u vidu da primjenjeno rješenje iz jedne transformatorske stanice možda neće vrijediti u drugoj, zbog čega svaku transformatorsku stanicu treba posmatrati kao zaseban pogonski i regulacijski slučaj.

LITERATURA

[1] Pravilnik o priključenju malih elektrana na mrežu distribucije Republike Srpske
[2] Distributivna mrežna pravila RS – Mješoviti holding Elektroprivreda Republike Srpske
[3] https://www.nichicon.com/en-us/design-support/lifetime-calculator/
[4] General Descriptions of Aluminum Electrolytic Capacitors – Nichicon
[5] https://shop.reinhausen.com/ecotap-vpd-3-standard,
[6] https://shop.reinhausen.com/ecotap-vpd-3-ds,
[7] ECOTAP VPD – The compact class for distribution transformer, www.reinhausen.com
[8] On the potential of voltage control to increase the hosting capacity of distribution networks - Doctoral thesis, TU Graz, 2019 - Dipl. Ing. Benoît Bletterie