

ZAGOTAVLJANJE KAKOVOSTI NAPETOSTI V NIZKONAPETOSTNIH OMREŽJIH Z VELIKO RAZPRŠENE PROIZVODNJE

ANŽE VILMAN^{1*}, MARJAN JERELE¹

¹Elektro Gorenjska, d.d., Ulica Mirka Vadnova 3a, Kranj

*E-pošta: anze.vilman@elektro-gorenjska.si

Povzetek: V distribucijska omrežja (DO) je v zadnjem obdobju priključeno vedno večje število razpršenih virov (RV). Trendi nakazujejo na pospešeno gradnjo RV tudi v prihodnjem obdobju. Večina RV je priključenih v nizkonapetostna omrežja (NNO), katerim se v preteklosti ni posvečalo velike pozornosti. Osnovna funkcija NNO je bila dobava kvalitetne električne energije končnim porabnikom. Problem so predstavljale predvsem prenizke napetosti, ki so bile posledica povečevanja obremenitev. Danes se zaradi priključevanja novih RV v NNO pojavlja tudi problem previsokih napetosti. Priključeni RV povzročajo spremenjene smeri pretokov moči in s tem nove obratovalne razmere. Sistemski operaterji DO se posledično soočajo z izzivi vzdrževanja napetosti znotraj meja, ki še omogočajo varno, zanesljivo in kakovostno napajanje odjemalcev.

Elektro Gorenjska d.d. je v začetku leta 2017 zaključila evropski projekt INCREASE (INcreasing the penetration of Renewable Energy sources in the distribution grid by developing control strategies and using Ancillary SErVICES). V okviru projekta so bile razvite in testirane različne strategije nadzora napetosti in vzdrževanja napetosti znotraj meja v NNO. Vgrajen je bil prvi regulacijski distribucijski transformator (TR) SN/NN v Sloveniji in preizkušeni so bili različni regulacijski algoritmi. Na podlagi pozitivnih izkušenj in doseženih ciljev je bil izbran tudi najbolj ustrezen algoritem za vsakdanje delovanje regulacijskega distribucijskega TR.

Ključne besede: nizkonapetostno omrežje, razpršeni viri, napetostne razmere, regulacijski distribucijski transformator, regulacijski algoritmi.

VOLTAGE QUALITY PROVISION IN LOW VOLTAGE NETWORKS WITH HIGH PENETRATION OF RENEWABLE PRODUCTION

Abstract: Distribution system operators (DSO) are facing severe challenges of keeping the voltage levels within operational limits due to the rapid emergence of distributed energy resources (DER) on different distribution network voltage levels. Low voltage (LV) networks were traditionally operated as autonomous entities with no much insight or control, but high penetration of renewables in most cases introduce serious voltage quality problems. DSOs have come under the high pressures of voltage quality provision, which grow even bigger with additional DER installations.

Article describes the Elektro Gorenjska, d.d. role in EU FP7 project titled "INcreasing the penetration of Renewable Energy sources in the distribution grid by developing control strategies and using Ancillary SErVICES" (INCREASE). During the project, different set of voltage control strategies were deployed and tested in order to be compared and evaluated for later day to day operations. To enable the demonstration of different voltage control strategies, first distribution transformer with on load tap changer in Slovenia was installed. Article summarises different demonstration cases outcomes and evaluates the benefits of each one.

Keywords: low voltage network, distributed energy resources, voltage levels, distribution transformer with on load tap changer, regulation algorithm.

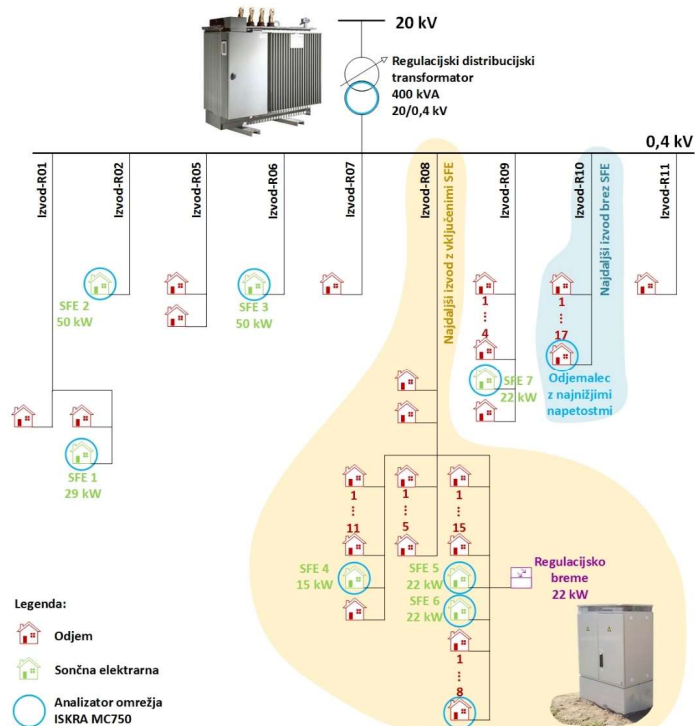
Osnovni cilj projekta INCREASE je bil razvoj konceptov vodenja in regulacije napetosti, ki bodo omogočili dodatno priključevanje RV v DO, je predstavljal osnovni cilj projekta INCREASE. Novi koncepti so bili preizkušeni v štirih različnih demonstracijskih poligonih v nizkonapetostnih DO in sicer v Belgijiskem, na nizozemskem, avstrijskem in slovenskem.

Slovenski poligon EG ĐO je predstavljalo NNO Suha z večjim številom instaliranih lko RV, na področju Elektro Gorenjska. Izbrano NNO je sestavljeno iz izvodov z veliko RV na eni strani in dolgih izvodov brez RV na drugi strani. Posledično se nam dnevno pojavljajo visoke napetosti na izvodih z RV in nizke napetosti na ostalih izvodih. Glavni namen projekta je bilo zagotavljanje ustreznih napetostnih razmer v celotnem NNO. Za preizkus novih konceptov vodenja in regulacije napetosti so bile uporabljene različne tehnologije. Vgrajen je bil prvi regulacijski distribucijski TR v Sloveniji, moči 400 kVA. Za vodenje demonstracijskega poligona je bil razvit nadzorni sistem proizvajalca Sipronika, ki deluje na platformi UniFusion. Uporabljen je bil obstoječ sistem obratovalnih meritev in lastna komunikacijska infrastruktura WiMAX.

V okviru projekta razviti koncepti so bili preizkušeni in ovrednoteni, najboljša rešitev pa se uporablja za vsakdanje obratovanje regulacijskega distribucijskega TR.

2 DEMONSTRACIJSKI POLIGON

Severozahodno od Kranja leži vas Suha pri Predosljah. Lega in orientiranost objektov v vasi izpolnjujeta idealne pogoje za postavitev sončnih elektrarn (SFE). V času visokih spodbud za RV, predvsem SFE se je sedem lastnikov odločilo za postavitev SFE, katerih skupna inštalirana moč znaša 210 kW. Vas se napaja preko nove kabelske transformatorske postaje (TP) v kateri je vgrajen regulacijski distribucijski TR moči 400 kVA. Povprečna konična poraba v vasi je 150 kW in se pojavlja v času večerne konic. Časovno ne sovpada s konično proizvodnjo SFE, zato se obrtni pretoki moči dogajajo vsak sončen dan. Porabniki se iz TP napajajo preko devetih NN izvodov (slika 1).



Slika 1: Enopolna shema NNO napajane preko TP Suha.

Oblikovano: Navaden, Levo

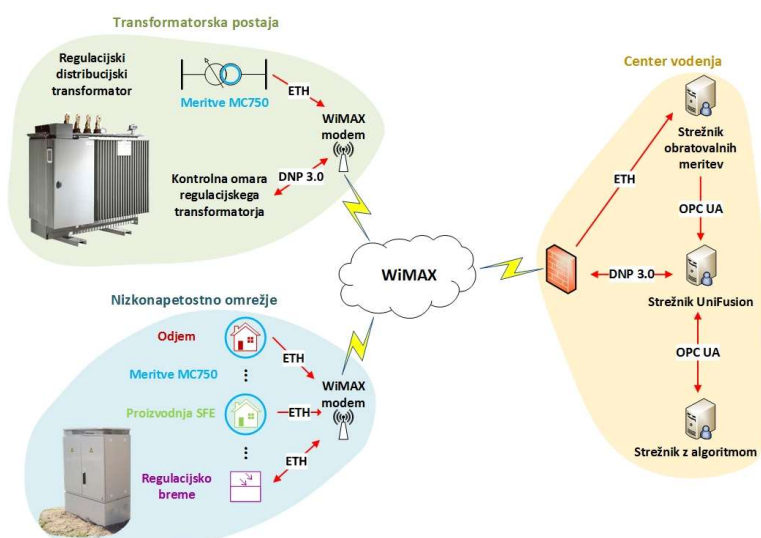
Izvodi se med seboj razlikujejo, saj so nekateri samo proizvodni, drugi samo porabniški, tretji proizvodno-porabniški. Posledično se pojavljajo visoke napetosti na proizvodnih in proizvodno-porabniških izvodih v času delovanja SFE in nizke napetosti na koncih porabniških izvodov v času večerne konice. Napetosti yp NNO napajanjem preko TP Suha so pred vgradnjo regulacijskega distribucijskega TR nihale med 200 V in 253 V.

Slika 2 prikazuje shemo komunikacij, ki temelji na lastni komunikacijski infrastrukturi WiMAX. Za potrebe predhodnih analiz in kasneje vhodnih podatkov regulacijskega algoritma so bili na desetih lokacijah z najbolj neugodnimi napetostnimi razmerami vgrajeni analizatorji omrežja Iskra MC750 (modri krogi na sliki 1). Meritve vseh parametrov se z 1 minutnim intervalom preko priključenih WiMAX modemov prenašajo v podatkovno bazo strežnika obratovalnih meritev.

Za nadzor in vodenje TP ter regulacijskega distribucijskega TR je uporabljena SCADA na osnovi platforme UniFusion. Le ta poleg osnovnih SCADA funkcionalnosti zagotavlja tudi povezave med bazo obratovalnih meritev in strežnikom, na katerem se izvaja regulacijski algoritem. V ta namen se s pomočjo protokola OPC UA zajemajo trenutne izmerjene vrednosti napetosti, ki se jih posreduje strežniku z regulacijskim algoritmom.

Regulacijski algoritem na podlagi pridobljenih meritev in glede na želeno (nastavljeno) najvišjo in najnižjo vrednost napetosti omrežja ovrednoti ustreznost trenutnega stanja celega NNO in v primeru odstopanj predlaga spremembo stopnje regulacijskega distribucijskega TR. Na omenjeni način regulacijski sistem zagotavlja, da se najnižja in najvišja zelena vrednost napetosti NNO nahajata znotraj nastavljenega napetostnega okna.

Za prenos podatkov in izvajanje funkcij daljinskega nadzora in vodenja je uporabljeno omrežje WiMAX.



Slika 2: Komunikacijska shema.

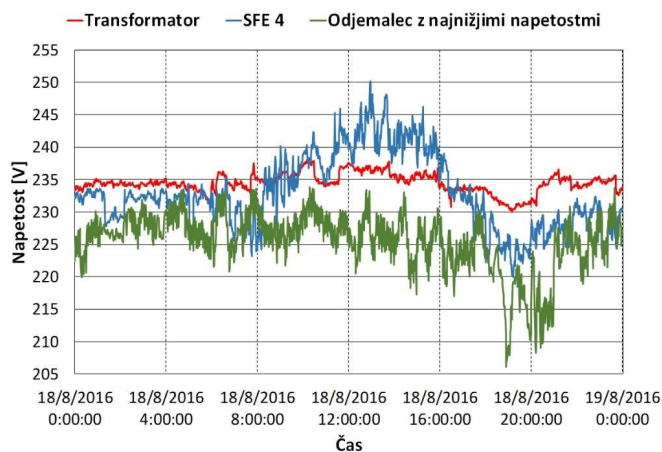
3 REŠITVE RAZVITE V OVIRU PROJEKTA INCREASE

Cilj projekta je bilo zagotavljanje ustreznih napetostnih razmer v celotnem NNO napajanjem preko TP z vgrajenim regulacijskim distribucijskim TR. Za doseganje cilja je bilo znotraj projekta razvitih nekaj posebnih rešitev. Za dobro primerjavo med rešitvami je potrebno poznati tako razmere v normalnem obratovalnem stanju, kot tudi vsako uporabljeno rešitev.

3.1 Normalno obratovalno stanje

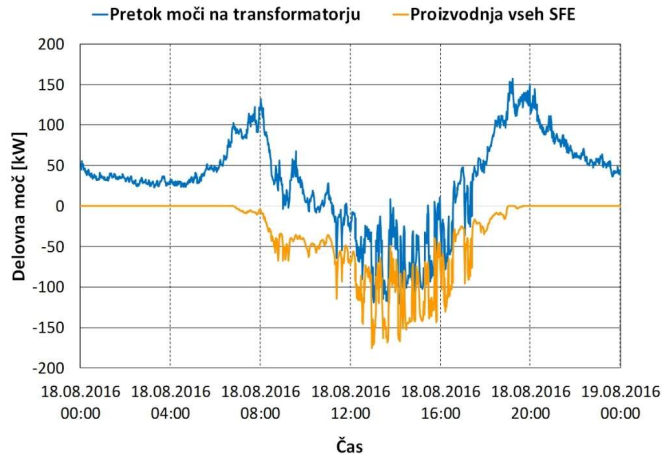
Normalno obratovalno stanje predstavlja razmere v NNO pred vgradnjo regulacijskega distribucijskega TR. TP Suha napaja izvode z priključenimi RV na eni strani in dolge izvode brez RV na drugi strani. Na dnevnem nivoju se pojavljajo visoke napetosti na izvodih z priključenimi RV in nizke napetosti na koncu dolgih izvodov brez

priključenih RV (slika 3). Slika jasno prikazuje napetostno razliko med izvodom z priključenimi RV in najdaljšim porabniškim izvodom, ki v času proizvodnje SFE znaša tudi 15 V. Prikazane napetostne razmere predstavljajo obratovalski izziv, ki je bil rešen z uporabo daljinske regulacije TR.



Slika 3: Dnevni napetostni profil maksimalne in minimalne napetosti v NNO demonstracijskega poligona.

Slika 4 prikazuje dnevni pretok moči na TR in proizvodnjo vseh SFE na tipičen sončen dan. Spremenjena smer pretoka moči se pojavi v času velike proizvodnje SFE, ki se ne ujema z jutranjo in večerno konico porabe.



Slika 4: Dnevni pretok moči na TR (jutranja in večerna konica) in proizvodnja vseh SFE.

3.2 Lokalna regulacija TR

Za regulacijo napetosti v NNO je bil vgrajen novi regulacijski distribucijski TR (20 kV/0,4 kV), moči 400 kVA z 9 odcepi velikosti 1,5 %. TR ima vgrajen tovarniški regulacijski algoritem, ki deluje na napetostih izmerjenih lokalno na NN strani TR. Za preizkus lokalne regulacije TR so bili nastavljeni parametri $U_{set}=235$ V, širina pasu ± 1 % in čas zakasnitve 1 minuta. Opravljene meritve dokazujejo, da lokalna regulacija TR močno izboljša napetostne razmere na NN strani TR, kjer ves čas ohranja napetosti znotraj nastavljenega pasu. Lokalna regulacija

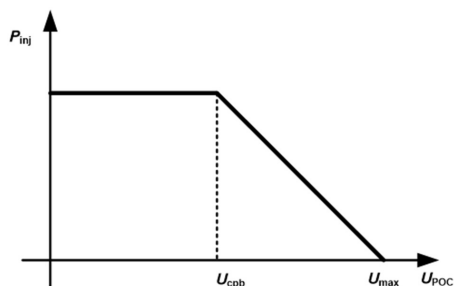
TR pa ne izboljša napetostnih razmer na koncih NN izvodov (orisanih-predstavljenih na sliki 3) saj jih meritve na NN strani TR ne zaznajo.

3.3 Daljinska regulacija TR

Daljinska regulacija TR deluje na osnovi algoritma, ki je bil razvit znotraj projekta in je nameščen na posebnem strežniku v centru vodenja. Algoritem ves čas spremlja fazne napetosti 10 merilnih točk v NNO, kjer so pričakovane mejne vrednosti napetosti (modri krogi na sliki 1). Merjene napetosti se primerjajo z nastavljenimi vrednostmi algoritma in po upoštevanju zakasnitvi algoritem predlaga optimalni odcep TR, kateri nam vzdržuje napetosti po celotnem NNO znotraj nastavljenih meja. Nove nastavitve odcepa TR se izvajajo daljinsko iz centra vodenja preko omrežja WiMAX. Za preizkus daljinske regulacije TR so bili nastavljeni parametri $U_{min}=226$ V, $U_{max}=238$ V in čas zakasnitve 1 minuta. Daljinska regulacija TR nam močno izboljša napetostne razmere po celotnem NNO.

3.4 Lokalna regulacija razsmernika SFE

V času delovanja SFE se na mestu njene priključitve v NNO pojavljajo veliki porasti napetosti. V primeru porasta napetosti preko nastavljene meje prenapetostna zaščita izklopi SFE iz NNO in z izklopom povzroči izpad proizvodnje. Lokalna regulacija razsmernika SFE je uporabljena za zmanjšanje oddane delovne moči SFE v primeru, ko se napetosti v NNO približajo meji prenapetostne zaščite (slika 5). Ko napetosti naraščajo proti meji (U_{max}), lokalna regulacija SFE linearno zmanjša oddano delovno moč (P_{inj}) in s tem prepreči avtomatski izklop SFE zaradi zaščite. Zmanjševanje oddane delovne moči se začne v točki U_{cpb} . Originalni plan za izvedbo lokalne regulacije razsmernika SFE je bila inštalacija novega razsmernika z vgrajeno regulacijo. Zaradi nesimetrije moči po fazah obstoječe SFE zamenjava razsmernika ni bila možna, zato je bila preizkušena druga rešitev. Vgrajeno je bilo trifazno breme moči 22 kW, s katerim je bil dosežen enak učinek kot z zamenjavo razsmernika.



Slika 5: Krivulja zniževanja oddane delovne moči v odvisnosti od napetosti.

4 PRIMERJAVA REŠITEV

Razvite rešitve opisane v prejšnjem poglavju so bile razdeljene na štiri različne scenarije. Za vsak scenarij so bile opravljene meritve napetostnih razmer, ki so za lažjo predstavbo statistično obdelane in predstavljene z grafikoni kvartilov. Preizkušeni in ovrednoteni so bili naslednji scenariji:

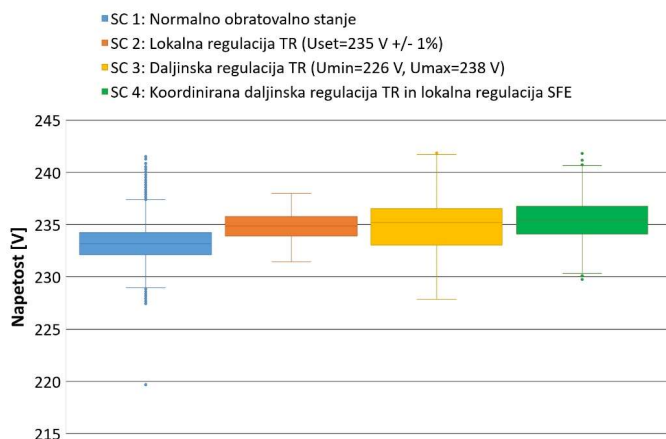
- Scenarij 1: normalno obratovalno stanje (brez regulacije).
- Scenarij 2: lokalna regulacija TR (vgrajen tovarniški regulator).
- Scenarij 3: daljinska regulacija TR (uporaba regulacijskega algoritma razvitega znotraj projekta).
- Scenarij 4: koordinirana daljinska regulacija TR in lokalna regulacija razsmernika SFE.

V nadaljevanju so predstavljene meritve za vsak scenarij v treh najzanimivejših točkah NNO TP Suha:

- Transformatorska postaja.
- SFE 5 – lokacija kjer se pojavljajo najvišje napetosti in kjer je priključeno trifazno breme.
- Lokacija kjer se pojavljajo najnižje napetosti.

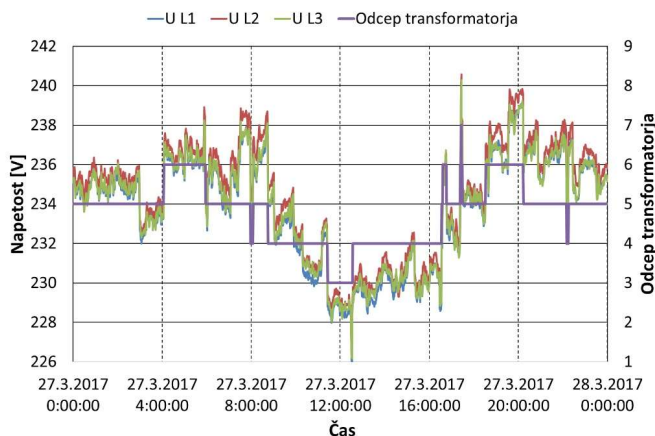
4.1 Transformatorska postaja

V TP se napetostne razmere najbolj izboljšajo ob uporabi lokalne regulacije TR (scenarij 2). Regulacijski distribucijski TR vzdržuje napetosti na NN stani TR v nastavljenih mejah $U_{set}=235\text{ V} \pm 1\%$. Scenarija 3 in 4 sta usmerjena k izboljšanju napetostnih razmer po celotnem NNO, zato je v teh dveh scenarijih nihanje napetost v TP večje (slika 6).



Slika 6: Napetosti na NN strani TR.

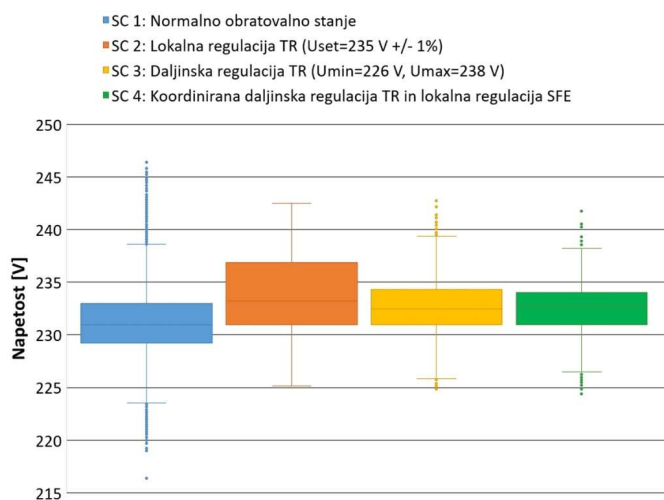
Slika 7 prikazuje delovanje regulacijskega distribucijskega TR na tipičen sončen dan. Vključena je bila daljinska regulacija TR. Za zagotavljanje napetosti znotraj nastavljenih meja je bilo tekom dneva izvedenih 18 sprememb odcepa TR. Uporabljeni so bili odcepi od 3 do 7.



Slika 7: Napetosti na NN strani TR in uporabljeni odcepi TR.

4.2 SFE 5 – lokacija kjer se pojavljajo najvišje napetosti in kjer je priključeno trifazno breme

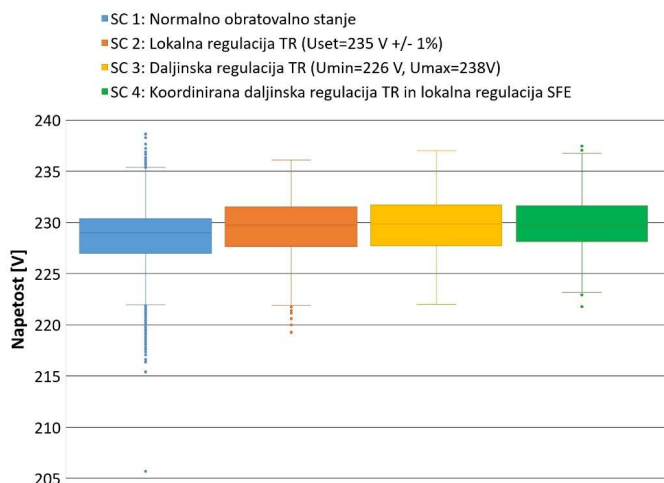
Na lokaciji, kjer je v NNO priključena SFE 5 se pojavljajo najvišje napetosti. Napetostne razmere se najbolj izboljšajo ob uporabi daljinske regulacije TR (scenarij 3) in ob uporabi koordinirane daljinske regulacije TR in lokalne regulacije razsmernika SFE (scenarij 4). Opravljene meritve potrjujejo teorijo opisano v tretjem poglavju, da lokalna regulacija TR (scenarij 2) ne popravi visokih napetostnih razmer na lokacijah ki so precej oddaljene od TP (slika 8).



Slika 8: SFE 5 - lokacija kjer se pojavljajo najvišje napetosti.

4.3 Lokacija, kjer se pojavljajo najnižje napetosti

Na najdaljšem NN izvodu brez priključenih RV se pojavljajo najnižje napetosti (slika 9).



Slika 9: Odjemalec z najnižjimi napetostmi.

Napetostne razmere se zopet najbolj izboljšajo ob uporabi daljinske regulacije TR (scenarij 3). Veliko izboljšanje najnižjih napetosti je opazno že ob uporabi lokalne regulacije TR (scenarij 2), kar potrjuje teorijo, da ima lokalna regulacija TR vedno pozitiven učinek na NN izvodih brez priključenih RV.

5 IZKUŠNJE IZ PROJEKTA

Za preizkus novih konceptov vodenja in regulacije napetosti so bile razvite in uporabljene različne tehnologije. V sistem so bili vključeni novi aktivni elementi omrežja, ki jih je potrebno stalno nadzorovati in sprti odpravljati nepričakovane nevspečnosti.

5.1 Regulacijski distribucijski transformator

Na regulacijskem distribucijskem TR se je po 10 mesecih obratovanja pojavila napaka. V normalnem obratovanju je kratek stik znotraj regulacijskega dela TR poškodoval tri kontaktorje in odvodnike prenapetosti. Regulacijski del TR je ločen od energetskega dela TR, zato je TR deloval dalje brez prekinitve. Regulator TR v primerih napake avtomatsko prestavi na srednji odcep in na njem obratuje dalje. Odjemalci napake niso občutili. Napaka je bila odpravljena s strani dobavitelja.

5.2 Sistem obratovalnih meritev

Občasno so se pojavile napake pri prenosu podatkov iz analizatorjev omrežja Iskra MC750. Nekaj merilnikov je imelo težave z delovanjem ethernet priključka, zato so bili zamenjani. V primeru napake pri prenosu podatkov iz analizatorjev omrežja ali izpada komunikacije med centrom vodenja in kontrolno omaro regulacijskega distribucijskega TR, se avtomatsko izključi daljinska regulacija TR in vključi lokalna regulacija TR.

5.3 Razvoj sistema daljinskega vodenja na platformi UniFusion

Sistem daljinskega vodenja je bil v takem obsegu posebej za namen projekta razvit v podjetju Sipronika. Sistem se je nadgrajeval skozi celoten projekt in danes zagotavlja zanesljivo vodenje vseh vključenih elementov.

6 ZAKLJUČKI

Zagotavljanje ustreznih napetostnih razmer v NNO kjer se pojavljajo tako prenizke, kot previsoke napetosti ni enostavno. Eno izmed rešitev za izboljšanje razmer predstavlja vgradnja regulacijskega distribucijskega TR. Glede na opravljene analize in meritve pa samo vgradnja distribucijskega regulacijskega TR ni dovolj. Potreben je dodaten razvoj in integracija algoritma, ki nadzoruje napetosti po celotnem NNO. Uporaba daljinske regulacije TR opisane v članku močno izboljša napetostne razmere po celotnem NNO. Na izvodih z priključenimi SFE se napetostne razmere dodatno lahko izboljša z uporabo lokalne regulacije razsmernika SFE. Opozoriti pa je potrebno, da je regulacijski distribucijski TR aktivni element v omrežju, katerega delovanje je potrebno dnevno spremljati.

Glede na pozitivne izkušnje in izboljšanje napetostnih razmer ob uporabi daljinske regulacije TR, se razviti algoritem uporablja za vsakdanje delovanje regulacijskega distribucijskega TR. Vgrajen regulacijski distribucijski TR znotraj projekta INCREASE predstavlja prvi vgrajen TR s tako tehnologijo v Sloveniji.

REFERENCE

- [1] Anže Vilman, Marjan Jerele, 2015, Koordinirana regulacija napetosti v NN omrežju z uporabo OLTC 20 kV/0,4 kV regulacijskega transformatorja, *CIGRE-CIREД Portorož, Slovenija*.
- [2] D. Bozalakov, T.L. Vandoorn, B. Meersman, L. Vandeveldel, 2014, Overview of increasing the penetration of renewable energy sources in the distribution grid by developing control strategies and using ancillary services, *Benelux IEEE YRS 2014 Conference in Ghent, Belgium*.
- [3] Vasiliki Klonari, Jean-Francois Toubeau, Zacharie De Grève, Tine Vandoorn UGent, Bart Meersman UGent, Jacques Lobry and François Vallée, 2015, Probabilistic assessment of P/V droop control of PV inverters, *CIREД conference in Lyon, France*.
- [4] <http://www.project-increase.eu/>