

Marko Mimica, mag. ing. el. techn. inf.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
mmimica@fsb.hr

Darko Jardas, dipl. ing.
REA Kvarner
Darko.jardas@reakvarner.hr

Iva Širić, dipl. ing.
HEP – ODS d.o.o.
Iva.siric@hep.hr

Izv. prof. dr. sc. Goran Krajačić, dipl. ing.
Fakultet strojarstva i brodogradnje
goran.krajacic@fsb.hr

NAPONSKE PRILIKE U ELEKTROENERGETSKOJ MREŽI OKO OTOKA UNIJE PRILIKOM PRIKLJUČENJA SOLARNE ELEKTRANE I BATERIJSKOG SPREMNIKA

SAŽETAK

Dekarbonizacija elektroenergetskog sustava (EES-a) je postavljena kao jedan od prioriteta Europske unije u nadolazećem razdoblju s ciljem da Europa postane klimatski neutralan kontinent do 2050. godine. Zbog toga dolazi do sve većeg udjela obnovljivih izvora energije (OIE), posebice solarnih i vjetroelektrana, u proizvodnji energije. Zbog svoje varijabilnosti, solarne i vjetroelektrane unose nesigurnosti u (EES) poput većih varijacija u frekvenciji, naponu te samoj kvaliteti električne energije. Rješenje se sve češće nalazi u korištenju napredne tehnologije poput odziva potrošnje i spremnika energije. INSULAE projektom će se ponuditi primjer za uspješnu integraciju solarne elektrane i baterijskog spremnika energije na otoku Unije. U ovom radu je provedena analiza naponskih prilika prilikom priključenja novih objekata na otoku Unije te su promatrane mogućnosti regulacije baterijskog spremnika za poboljšanje uvjeta u srednjenaponskoj mreži.

Ključne riječi: INSULAE, Unije, baterijski spremnik energije, solarne elektrane, proračun tokova snaga, obnovljivi izvori energije.

VOLTAGE CONDITIONS IN POWER SYSTEM SURROUNDING UNIJE ISLAND CONSIDERING INSTALATION ON SOLAR POWER PLANT AND BATTERY

SUMMARY

The decarbonisation of the electricity system is set as one of the priorities of the European Union in the coming period with the objective of making Europe a climate-neutral continent by 2050. As a result, there is a growing share of renewable energy (RES), especially solar and wind power, in energy production. Because of their variability, solar and wind power introduce uncertainties in the power system such as greater variations in frequency, voltage and the quality of electricity itself. Increasingly, the solution is to use advanced technology such as demand response and energy storage. The INSULAE project will provide an example for the successful integration of a solar power plant and a battery storage on the island of Unije. In this paper, the analysis of the voltage conditions at connection of new facilities on the island of Unije and possibilities of regulating the battery storage for improving conditions in the power grid are examined.

Keywords: INSULAE, Unije, battery energy storage, solar power plant, load flow, renewable energy sources

1. UVOD

Energetska tranzicija predstavlja jedan od glavnih prioriteta Europske unije kako bi se do 2050. postigao klimatski neutralan kontinent. Zbog toga dolazi do sve veće integracije varijabilnih OIE u EES što donosi nove izazove u regulaciji. Distribucijski sustav je posebno pod utjecajem ovih promjena jer dolazi do sve više zastupljenosti promjenjivih tokova snaga, pogonskih promjena kao i razmjene informacija, što dosada nije bio slučaj.

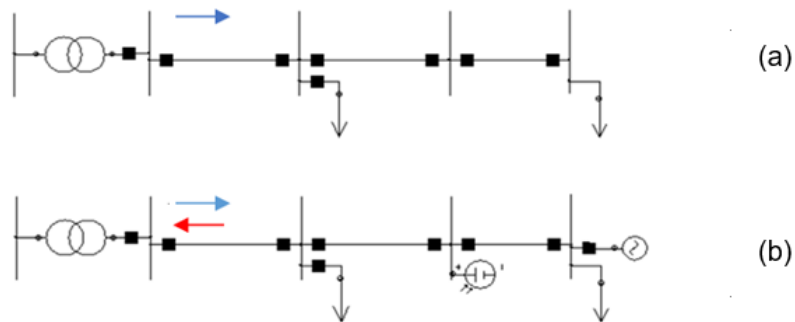
Opisane promjene će zahtijevati od distribucijskog sustava prilagodbu na novonastale uvjete i testiranje novih tehnologija poput odziva potrošnje i spremnika energije koje je potrebno implementirati kako bi se distribuirani izvori uspješno integrirali bez narušavanja uvjeta u mreži. U posljednje vrijeme je sve zastupljeniji pristup geografskim otocima kao živućim laboratorijima. Ideja iza ovog koncepta je da se bilo koja tehnologija implementirana u sustavima na otocima može implementirati i u sustavima na kopnu ponajprije zbog toga što otoci predstavljaju izrazito zahtjevne lokacije s obzirom na njihovu odvojenost od kopna koja sa sobom nosi brojne teškoće. Ovo posebno vrijedi za EES-e na otocima koji su često slabo povezani s ostatkom mreže te imaju nisku inerciju, što povećava osjetljivost sustava na nagle i brze promjene. Nekoliko studija istražuje mogućnost integracije distribuiranih izvora na otocima poput [1]. Primjena informacijsko – komunikacijskih tehnologija i distribuiranih izvora je planirana i na hrvatskim otocima što je pokazano u preglednom radu [2]. Otok Unije je jedan od predvodnika hrvatskih otoka u implementaciji naprednih tehnologija gdje se trenutno provodi projekt „INSULAE – Maximizing the impact of innovative energy approaches in the EU islands“ [3].

Projekt INSULAE teži pronalasku rješenja za uspješnu dekarbonizaciju otoka. Pri tome se nastoji pokazati vrijednost otoka za provođenjem pilot projekata čija se rješenja mogu transferirati na područja na kopnu. Na projektu sudjeluje 27 partnera od čega su hrvatski partneri Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagreb, agencija REA Kvarner, Ericsson Nikola Tesla d.d., Vodovod i odvodnja Cres – Lošinj d.o.o. te udruga WWF Adria, dok je pridruženi partner HEP d.d. Na projektu će se pokazati 7 primjena napredne tehnologije na tri otoka. Na otoku Bornholm će se instalirati istosmjerna (DC) sabirnica na koju će biti spojeni solarna, vjetroelektrana te spremnik energije kako bi se smanjilo gubitke i poboljšalo upravljanje. Na otoku Madeira će se integrirati transportni i elektroenergetski sustav te će istraživati utjecaj V2G (eng. Vehicle-to-grid) tehnologije na upravljanje sustavom. Na otoku Unije u Kvarnerskom zaljevu će se demonstrirati zajedničko upravljanje baterijskim spremnikom i solarnom elektranom te će se demonstrirati integracija vodnog i elektroenergetskog sustava koristeći već postojeće desalinizacijsko postrojenje.

U ovom radu se obrađuje jedan primjenjivi slučaj INSULAE projekta, a to je zajedničko upravljanje solarnom elektranom i baterijskim spremnikom na otoku Unije. U radu je modelirana postojeća srednjenaponska mreža s napojnom transformatorskom stanicom TS 110/35/10 kV Lošinj. Model je proširen s objektima koji će se u narednom periodu izgraditi, a to su solarna elektrana SE Orlec priključne snage 4,140 MW, SE Unije priključne snage 1 MW te baterijskog spremnika (ESS) invertera snage 0,4 MW pri $\cos\phi = 1$. Proračun tokova snaga je modeliran za maksimalno i minimalno opterećenje te je simuliran pogon za jedan dan pri minimalnom opterećenju.

2. MODELIRANJE EES-a OKO PODRUČJA OTOKA UNIJE I PRORAČUN TOKOVA SNAGA

Tradicionalno je distribucijski sustav organiziran na način da prihvaća snagu iz prijenosne mreže te je dalje distribuirana krajnjim kupcima na siguran način i u skladu s mrežnim pravilima. U tom slučaju je tok radne i jalove snage išao u jednom smjeru, od višeg napona prema nižem. Značajnim priključenjem manjih distribuiranih izvora dolazi do dvosmjernih tokova snaga čime distribucija prestaje biti pasivni posrednik između EES-a i krajnjih kupaca te postaje aktivan sustav gdje su naponi definirani potrošnjom, ali i proizvodnjom. Distribuirani izvori na distribucijskoj mreži mogu biti manji pogoni sa sinkronim generatorom, ali i elektrane spojene na mrežu preko invertera poput solarnih elektrana. Konceptualni prikaz tradicionalnog distribucijskog sustava i distribucijskog sustava s distribuiranom proizvodnjom je dan na slici 1.



Slika 1. Tradicionalni distribucijski sustav (a) i distribucijski sustav s distribuiranom proizvodnjom (b)

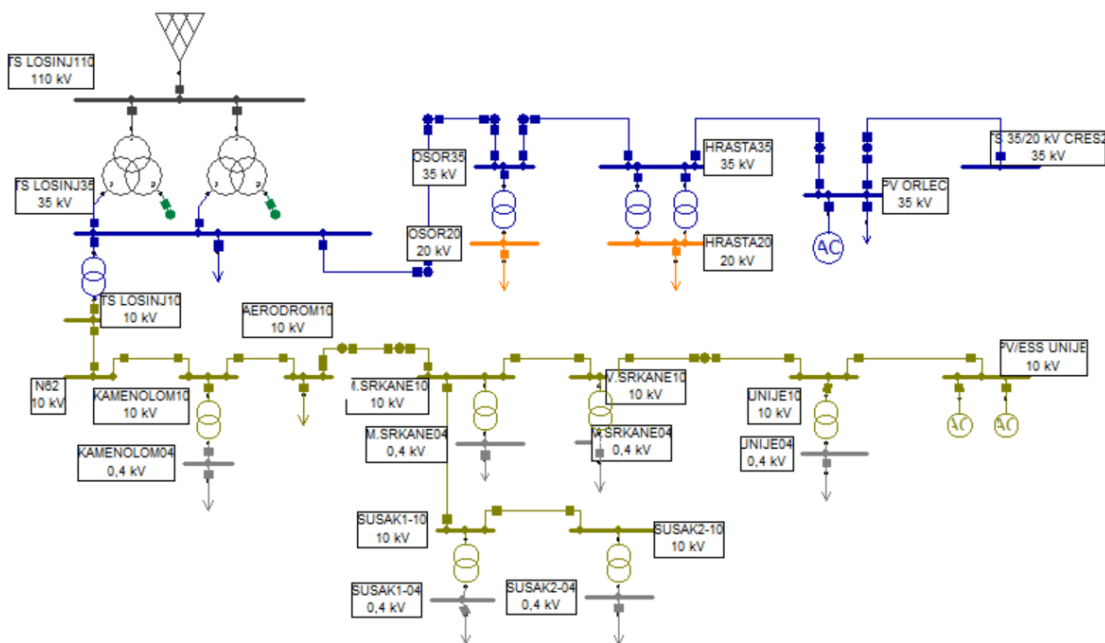
Distribuirana proizvodnja ima brojne utjecaje na tehničke karakteristike sustava poput struje kratkog spoja, kvalitete električne energije i napona. Distribucijski sustav mora isporučiti električnu energiju krajnjim kupcima pri čemu iznos napona ne bi trebao prelaziti granice od 95%-110% nazivne vrijednosti. Pojavom distribuiranih izvora uglavnom ne dolazi do naponskih problema prilikom većeg opterećenja, međutim prilikom manjih opterećenja može doći do pojave previsokih napona kojima se krše propisana mrežna pravila [4]. Dobro je poznato da je promjena iznosa napona približno definirana izrazom (1) [5]:

$$\Delta U = \frac{PR + XQ}{U_n} \quad (1)$$

Gdje je P radna snaga, Q jalova snaga, R radni otpor, X reaktancija, a U_n nazivni napon. Stoga promjena napona može biti regulirana radnom i jalovom snagom ovisno o veličini parametara radnog otpora i reaktancije. Na niskonaponskoj mreži je dominantan utjecaj radnog otpora, dok je na srednjonaponskoj razini omjer X/R tipično nešto veći. Stoga je na srednjonaponskoj mreži moguće pružiti potporu jalovom snagom mreži kako bi napon ostao u propisanim granicama. U ovom radu je istražena upravo mogućnost pružanja potpore mreži jalovom snagom koristeći ESS i upravljivi inverter.

2.1. EES u okruženju otoka Unije

Otok Unije, zajedno s otocima Suskom, te Malim i Velim Srkanama napajan je iz TS 110/35/10 kV Lošinj snage transformacijom preko TS 35/10 kV Lošinj snage 2,5 MVA. Opskrba krajnjih kupaca na otoku Unije se vrši preko TS 10/0,4 kV smještene na Unijama, koja je 10 kV vodom povezana s Velim Srkanama. Na otoku Unije je planirana instalacija solarne elektrane priključne snage 1 MW te baterijskog spremnika energije 0,4MW/1,6MWh. Solarna elektrana i ESS će biti zajednički priključene na transformator nazivne snage 1,6 MVA koja će biti spojena na postojeću TS na Unijama. Uz nove pogone na otoku Unije, također je planirana solarna elektrana Orlec priključne snage 4,14 MW pri $\cos\phi = 0,94$ na otoku Cresu. Parametri naponskih razina sabirnica, transformatora i vodova su modelirani sukladno dostupnim podacima dostupni u pripadajućem elektrodistribucijskom području. Model opisanog sustava je prikazan na slici 2 [6].



Slika 2. Model analizirane elektroenergetske mreže u okruženju otoka Unije

2.2. Modelirani scenariji

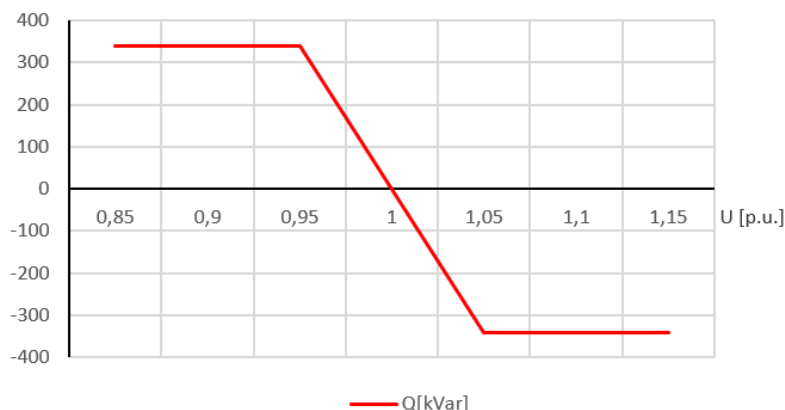
U ovom radu je razmatrano nekoliko scenarija za slučaj minimalnog opterećenja: referentni scenarij (S0), scenarij s PV Unije i Orlec (S1), scenarij s PV Unije i Orlec te ESS 0,4 MW $\cos\varphi = 1$ (S2) i scenarij s PV Unije i Orlec te ESS 0,2 MW pri čemu je $Q=f(U)$ (S3). Također je simuliran i jedan dan minimalnog opterećenja za posljednji slučaj. Za slučaj maksimalnog opterećenja se pokazuje da su svi naponi u svim slučajevima u granicama dozvoljenog pogona definiranim mrežnim pravilima te taj slučaj nije dalje analiziran u radu. Referentnim scenarijem nije predviđena izgradnja solarnih elektrana i baterije već je proveden proračun tokova snaga za postojeće stanje na lokaciji. Usporedbom modela s rezultatima dobivenim u [6] utvrđeno je da najveće odstupanje vrijednosti napona na sabirnicama iznosi 0,46% što sugerira da je model izrađen s dovoljnom preciznošću. U Tablici I je dan pregled analiziranih scenarija.

Tablica I. Pregled analiziranih scenarija

Scenarij	Scenarij S0	Scenarij S1	Scenarij S2	Scenarij S3
Opterećenje	minimalno	minimalno	minimalno	minimalno
PV Unije ($\cos\varphi = 1$)	0	1 MW	1 MW	1 MW
PV Orlec ($\cos\varphi = 0,94$)	0	4,14 MW	4,14 MW	4,14 MW
ESS	0	0	0,4 MW ($\cos\varphi = 0$)	0,2 MW ($Q=f(U)$)

Za slučaj minimalnog opterećenja prema podacima [7] i [8], za koji su računati svi scenariji, automatski regulator u TS Lošinj ne može regulirati napon na sabirnici 35 kV zbog čega je u modelu na sabirnice 110 kV u TS Lošinj potrebno postaviti najviši mjereni napon koji iznosi 126,2 kV (1,147 p.u.) [7], dok se regulacijska preklopka u TS 110/35/10 kV Lošinj postavlja u krajnji položaj. Transformatorske stanice TS Osor i TS Hrasta imaju nazivne prijenosne omjere 35/21 kV dok transformator u TS 35/10 kV Lošinj ima nazivni prijenosni omjer 35/10,5 kV. Regulacijska preklopka u TS Osor, Hrasta i Lošinj 35/10 kV je postavljena u položaj 1/5 čime se postiže snižavanje napona na sekundaru za 5%. Ostali transformatori su modelirani s neutralnom položajem regulacijske preklopke i nazivnim prijenosnim omjerom 10/0,4 kV.

Za scenarij S3 predviđena je mogućnost ESS-a da pruža uslugu regulacije napona pružanjem reaktivne potpore koja je ovisna o naponu na priključnoj sabirnici $Q=f(U)$. Karakteristika $Q=f(U)$ je prikazana na slici 3.



Slika 3. Upravljačka karakteristika $Q = f(U)$ baterije

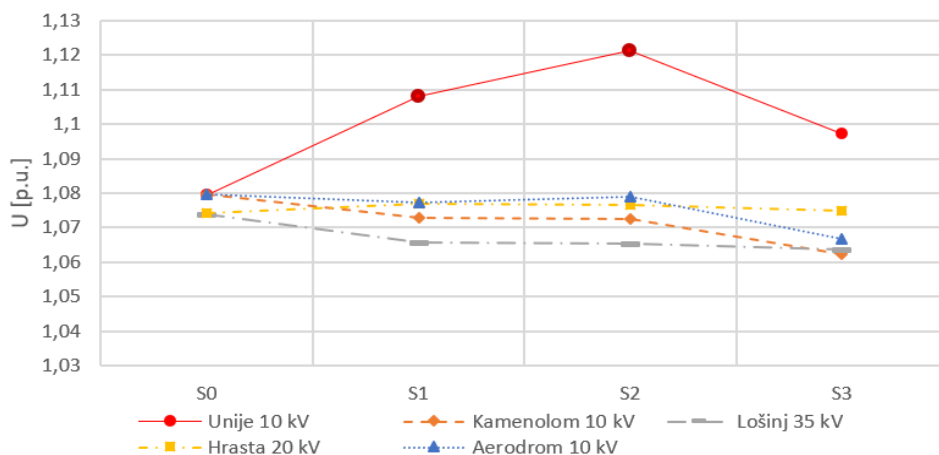
3. REZULTATI

3.1. Analiza naponskih prilika za četiri scenarija pri minimalnom opterećenju

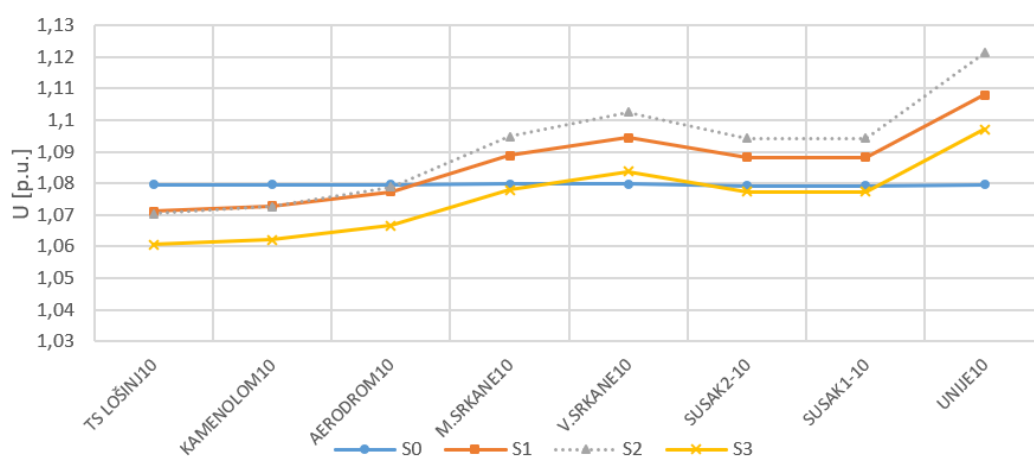
Proračunom se pokazuje da dva scenarija S0 i S3 zadovoljavaju mrežne uvjete, dok kod scenarija S1 i S2 dolazi do kršenja naponskih granica propisanih mrežnim pravilima. Za scenarij S1 dolazi do kršenja propisanih naponskih granica na mjestu priključka PV Unije te na srednjem i niskom naponu Unije, a za scenarij S2 dodatno dolazi do kršenja naponskih granica na srednjem i niskom naponu Vele Srkane. U nijednom scenariju ne dolazi do prekoračenja termičke granice vodova i kabela. U Tablici II je dan pregled odabranih sabirnica i pripadajućih naponskih razina, kao i promjena od referentnog scenarija, dok su na slikama 4 i 5 vizualno prikazani iznos napona za svaki od scenarija za odabrane sabirnice te iznos napona uzduž 10 kV grane modela.

Tablica II. Naponi čvorova za svaki od scenarija te promjena u odnosu na referentni scenarij

Čvorište	S0 U[p.u.]	S1 U[p.u.]	Promjena S1/S0 [%]	S2 U[p.u.]	Promjena S2/S0 [%]	S3 U[p.u.]	Promjena S3/S0 [%]
TS Lošinj 35	1,074	1,066	-0,76	1,066	-0,78	1,064	-0,95
Kamenolom10	1,080	1,073	-0,64	1,073	-0,65	1,062	-1,62
M.Srkane10	1,080	1,089	0,84	1,095	1,39	1,078	-0,17
V.Srkane10	1,080	1,095	1,36	1,103	2,11	1,084	0,36
Susak2-10	1,079	1,088	0,83	1,094	1,39	1,077	-0,17
Unije10	1,080	1,108	2,63	1,121	3,86	1,097	1,63
Hrasta35	1,074	1,077	0,24	1,077	0,23	1,075	0,06

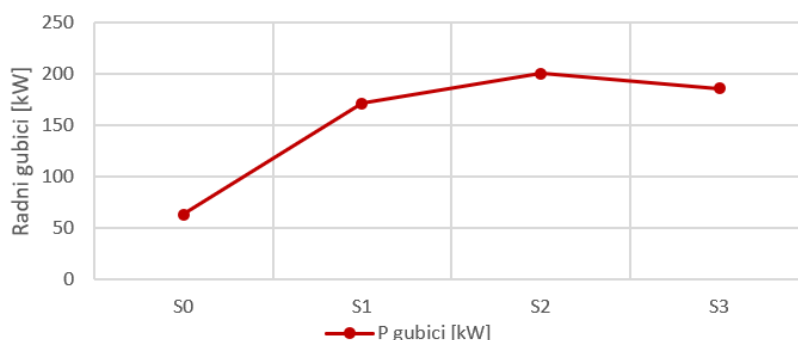


Slika 4. Iznos napona za četiri scenarija



Slika 5. Iznos napona uzduž 10 kV grane modela za minimalno opterećenje

Gubici radne snage u mreži su prikazani na slici 6. Vidljivo je da priključenjem dvije solarne elektrane dolazi do značajnog povećanja gubitaka u odnosu na referentni scenarij S0. Priključenjem ESS-a u režimu rada scenarija S3 dolazi do dodatnog povećanja gubitaka, dok prilikom priključenja ESS-a u režimu rada S4 dolazi do manjeg povećanja gubitaka gdje oni iznose 186 kW odnosno 3,1% potrošnje.

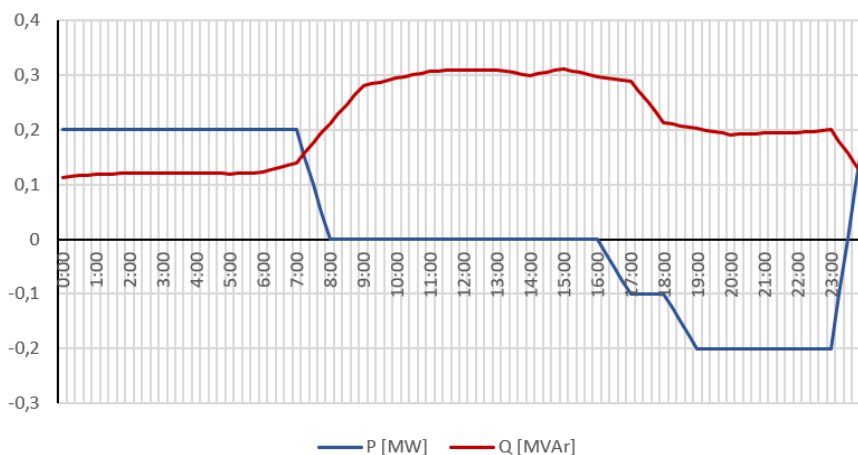


Slika 6. Radni gubici u distribucijskoj mreži za različite scenarije

3.2. Analiza prilika u mreži za jedan dan minimalnog opterećenja za scenarij S3

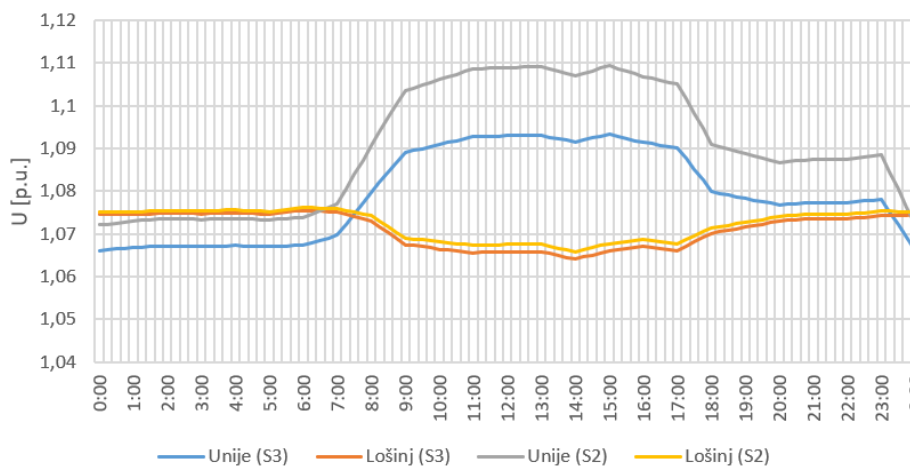
Kako bi se bolje istražila dinamika rada ESS-a, promatran je jedan dan minimalnog opterećenja s 15-minutnom rezolucijom. Pri tome je pretpostavljeno da je maksimalna snaga punjenja i pražnjenja 200 kW te da u svakom trenutku ESS može pružiti reaktivnu potporu mreži prema karakteristici prikazanoj na slici 3. S obzirom da su solarna elektrana i baterija spojeni „iza brojila“ zbog čega djeluju kao jedan objekt, odnosno solarna elektrana s baterijskim spremnikom, te da je namjera maksimizacija profita takve

elektrane, pretpostavljeno je da se ESS prazni u večernjim satima kada prestaje proizvodnja iz solarne elektrane, a kada su cijene na tržištu električne energije najveće. ESS se puni preko noći pri niskim cijenama električne energije dok se cjelokupna proizvodnja solarne elektrane isporučuje u mrežu također zbog ekonomskih razloga. Alternativno, ukoliko je ukupna snaga solarne elektrane veća od dozvoljene priključne snage, moguće je koristiti višak proizvodnje solarne elektrane za punjenje ESS-a. Slika 7 prikazuje rad baterije s opisanom karakteristikom reaktivne potpore za jedan dan minimalnog opterećenja.



Slika 7. Radna i jalova snaga ESS-a za jedan dan minimalnog opterećenja

Iz slike 7 je vidljivo da baterija konstantno pruža potporu jalovom snagom mreži, što je i očekivano s obzirom na visoke napone koji prevladavaju u mreži za vrijeme minimalnog opterećenja. Slika 8 prikazuje ponašanje na sabirnicama Unije10 i TS Lošinj35 za slučaj S2 (bez regulacije jalove snage) i S3 (sa regulacijom jalove snage).



Slika 8. Napon na Unije10 i TS Lošinj35 za scenarije S2 i S3 tijekom jednog dana

Utjecaj ESS-a je vidljiv u smanjenu iznosa napona na sabirnicama Unije10 i TS Lošinj35 u svakom trenutku promatranog vremenskog intervala. Također, naglašen je lokalni utjecaj ESS-a s obzirom da je smanjenje napona na Unije10 izraženije od smanjenja iznosa napona na TS Lošinj35.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je modeliran EES u okruženju otoka Unije sa svrhom ispitivanja različitih scenarija za integraciju distribuiranih izvora energije. Modelirana su ukupno četiri scenarija od kojih dva scenarija uključuju integraciju baterijskog spremnika. U jednom scenariju je implementirana karakteristika upravljanja jalovom snagom ESS-a. Rezultati pokazuju da integracijom distribuiranih izvora bez mogućnosti regulacije

dolazi do prekoračenja naponskih granica propisanih mrežnim pravilima. Integracijom ESS-a s mogućnosti regulacije jalove snage u svrhu održavanja naponskih vrijednosti u propisanim vrijednostima dolazi do smanjenja gubitaka u mreži i snižavanja vrijednosti napona na sabirnicama. Dodatno je analiziran rad EES-a s regulacijom jalove snage za jedan dan minimalnog opterećenja gdje su promatrani naponi na sabirnicama na Unijama i Lošinju te gdje je do izražaja dolazi lokalni utjecaj EES-a.

U ovom radu je obrađen tek jedan način integracije distribuiranih izvora, a da su pritom očuvane propisane naponske granice. Projektom INSULAE se na Unijama, ali i ostalim otocima, planira testiranje čitavog niza drugih mogućnosti poput V2G tehnologije, korištenje istosmjerne mreže te integracija različitih sustava poput vodnog i elektroenergetskog sustava.

5. LITERATURA

- [1] H. Dorotić, B. Doračić, V. Dobravec, T. Pukšec, G. Krajačić, N. Duić " Integration of transport and energy sectors in island communities with 100% intermittent renewable energy sources", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 99, 109-124, January 2019.
- [2] M. Mimica, G. Krajačić, D. Medved, D. Jardas "Digitalization and smart islands in the Kvarner archipelago", 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics MIPRO 2019, Opatija, 2019.
- [3] <http://insulae-h2020.eu/> [Pristupljeno: 5 – Veljače – 2020]
- [4] HEP ODS – Mrežna pravila distribucijskog sustava, NN 74/2018, 2018.
- [5] M.A. Mahmud, M.J. Hossain, H.R. Pota, Analysis of Voltage Rise Effect on Distribution Network with Distributed Generation, Proceedings of the 18th World Congress The International Federation of Automatic Control Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011.
- [6] T. Cerovečki, M. Cvitanović, F. Damjanović, R. Ivković, J. Majcen, I. Širić, Elaborat optimalnog tehničkog priključenja građevine na distribucijsku elektroenergetsku mrežu – SE Unije, Zagreb, 2019.
- [7] HEP ODS – Elektroprimorje Rijeka, Mjerni podaci s TS Lošinj, 2018.
- [8] HEP ODS – Elektroprimorje Rijeka, Mjerni podaci s TS Kamenolom, 2018.