



UTICAJ OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE NA ELEKTRODISTRIBUTIVNU MREŽU THE IMPACT OF RENEWABLE ENERGY SOURCES ON THE ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK

Nikola Sarkić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U radu se razmatraju procedure i propisi priključenja obnovljivih izvora energije (OIE) na distributivnu mrežu (DM). Prikazani su rezultati proračuna tokova snaga, kratkih spojeva, tranzijentne stabilnosti i kriterijuma za priključenje novog OIE na DM uz korišćenje softverskih alata PSS Sincal i ETAP.

Ključne reči: tokovi snaga, kratki spojevi, tranzijentna stabilnost, Hosting capacity, distributivna mreža, male solarne elektrane (MSE), male hidroelektrane (MHE), PSS Sincal, ETAP.

Abstract The paper discusses the procedures and regulations for connecting renewable energy sources (RES) to the distribution network (DM). The results of calculating power flows, short circuits, transient stability, and criteria for connecting the new OIE to DM using PSS Sincal and ETAP software tools are presented.

Keywords: power flows, short circuits, transient stability, Hosting capacity, distribution network, small solar power plants, small hydropower plants, PSS Sincal, ETAP.

1. UVOD

Na distributivnu mrežu (DM) se priključuje sve veći broj obnovljivih izvora za proizvodnju električne energije (energije). I pored svojih velikih prednosti, priključenje velikog broja ovih postrojenja može predstavljati problem po rad DM i operatora koji njome upravlja [1,2]. Samo neki od problema su zagušenje u mreži, problemi regulacije napona [13], povratak energije u prenosnu mrežu [14], itd.

1.1. Obnovljivi izvori energije

Neobnovljivi izvori energije negativno utiču na životnu sredinu. Pritom, rezerve goriva potrebne za njihov rad su na izmaku [3]. Sa druge strane obnovljivi izvori energije (OIE), koji ne samo da za proizvodnju energije koriste praktično neograničene resurse prirodne izvore već svojom proizvodnjom ne narušavaju životnu sredinu. U skladu sa tim, OIE imaju sve veći udeo u proizvodnji ukupne svetske energije. Pet osnovnih tipova OIE su elektrane koje koriste energiju sunca, vetra, biomase, vode i geotermalnu energiju [4,5]. Postrojenja za proizvodnju energije iz OIE nazivaju se distribuirani energetske resursi (eng. Distributed energy resources – DER) [6,7]. Proizvodnja i

skladištenje električne energije koju obavljaju različiti mali uređaji povezani na mrežu predstavlja "Distribuiranu proizvodnju".

2. POSTAVKA PROBLEMA

U ovom delu dati su osnovni tehnički podaci o DM, podaci o elektrani i kriterijumi za priključenje elektrane [8].

2.1. Osnovni tehnički podaci o distributivnoj mreži

Nazivni naponi DM (U_n) na koju može da se priključi elektrana su: $U_n = 0,4$ kV (1 kV), 10 kV, 20 kV i 35 kV. Snage kratkih spojeva zavise od nazivnog napona DM. Tipične vrednosti maksimalnih dozvoljenih struja (snaga) trofaznih kratkih spojeva:

- mreža 0.4 kV: 26 kA (18MVA) u kablovskoj mreži i 16 kA (11 MVA) u nadzemnoj mreži;
- mreža 10 kV: 14.5 kA (250 MVA)
- mreža 20 kV: 14.5 kA (500MVA)
- mreža 35 kV: 12 kA (750MVA)

Tipične vrednosti kapacitivne struje zemljospoja u izolovanim SN mrežama, zavisno od nazivnog napona DM, iznose 20, 15 i 10 A za mreže 10, 20 i 35 kV, respektivno.

Uzemljenje neutralne tačke DM izvodi se prema važećim tehničkim propisima, u zavisnosti od nazivnog napona neutralna tačka DM 0.4 i 1 kV su direktno uzemljenja, a neutralne tačke DM 10, 20 i 35 kV su izolovana, ili uzemljene preko niskoomske impedanse [8].

2.2. Osnovni tehnički podaci o elektrani

Elektrane se, u zavisnosti od vrste primarnog izvora energije i primenjene tehnologije proizvodnje energije, dele na [8]: hidroelektrane; vetroelektrane; solarne elektrane; kogenerativna postrojenja sa istovremenom proizvodnjom električne i toplotne energije; elektrane na biomasu, biogas, otpatke, gorivne ćelije, itd; i elektrane na konvencionalna goriva (ugalj, nafta, gas).

U odnosu na funkcionalne zahteve, proizvodne jedinice koje se priključuju na DM dele se na [8]:

- Tip A – proizvodna jedinica čija je nazivna snaga veća od 0,8 kW, a manja od 500 kW;
- Tip B – proizvodna jedinica čija je nazivna snaga veća od 500 kW, a manja od 10 MW;
- Tip C – proizvodna jedinica čija je nazivna snaga veća od 10 MW, a manja od 20 MW.

2.3. Osnovni kriterijumi za priključenje elektrane

Na DM može da se priključi elektrana koja ispunjava

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji je mentor dr Goran Švenda, red. prof.

sledeće kriterijume za priključenje [8]:

- dozvoljenog strujnog opterećenja elemenata DM;
- dozvoljene promene napona u stacionarnom režimu;
- dozvoljene promene napona u prelaznom režimu (kriterijum dozvoljene snage generatora);
- dozvoljenih flikera (vetroelektrane, hidroelektrane i solarne elektrane);
- dozvoljenih struja i napona viših harmonika (elektrane priključene preko invertora/pretvarača);
- snage kratkog spoja (elektrane snage veće od 1 MVA);
- nesimetrije napona.

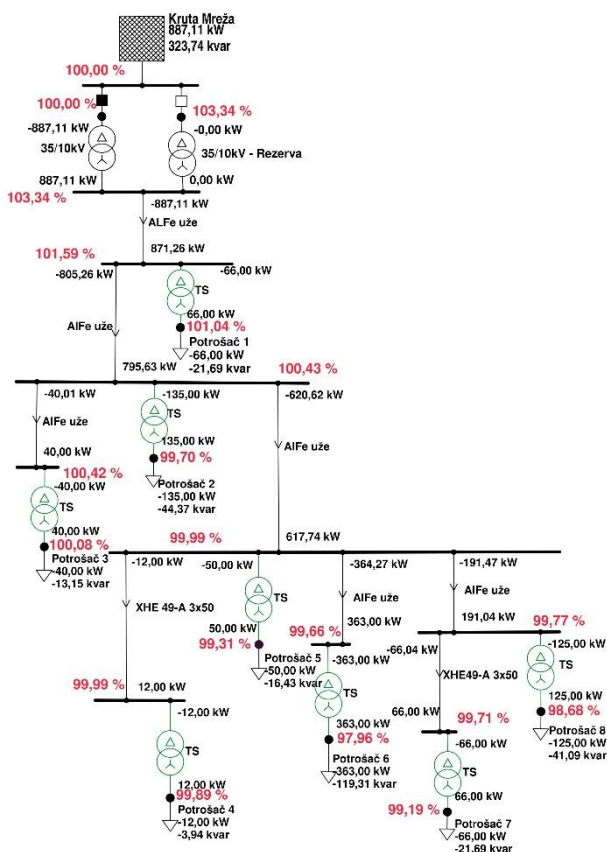
3. SOFTVERSKI ALATI

Za potrebe ovog rada, analiza uticaja OIE na rad DM, korišćeni su softverski alati ETAP i PSS Sincal. Generalno, ovi alati se koriste za modelovanje, simulaciju i analizu distributivnih i prenosnih elektroenergetskih mreža. Samo neke od njihovih mogućnosti su proračuni kratkih spojeva i tokova snaga, procenu kvaliteta napajanja, harmonijske analize, analize pokretanja motora, analize procene opasnosti luka kratkog spoja (ArcFlash), analiza tranzijentne stabilnosti i proračun podešenja i koordinacije zaštite [9,10].

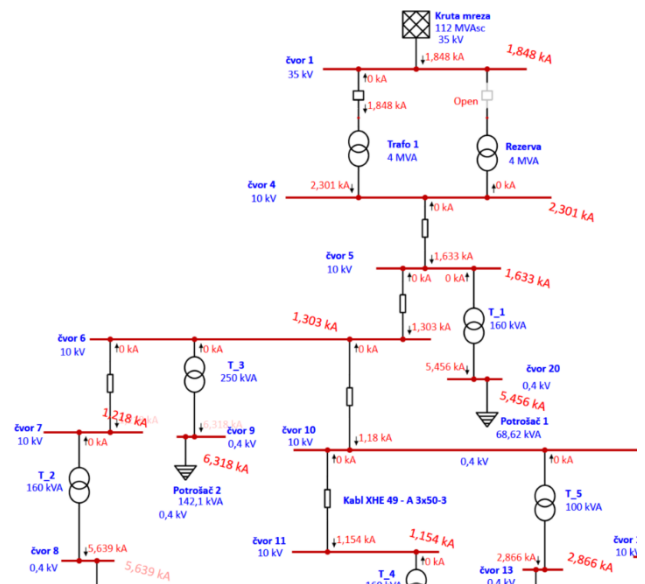
4. VERIFIKACIJA

Na primeru distributivne Test mreže sa 20 čvorova, slici 4.1, razmatrani su proračuni kriterijuma koji su potrebnih za priključenje OIE na DM. Razmatrana su tri režima:

- osnovni režim Test mreže bez OIE, slika 4.1;
- režim Test mreže sa priključenom MHE i
- režim Test mreže sa priključenom MSE.



Slika 4.1 – PSS Sincal: Osnovnom režimu (bez OIE)



Slika 4.2 – ETAP: Vrednosti struje 3pks na sabirnicama (Deo test mreža bez OIE)

Na osnovu prikazanih rezultata (PSS Sincal) može se uočiti da pre dodavanja OIE u Test mreži nema problema sa naponskim prilikama, i da je aktivna snaga na početku izvoda 887,11 kW, a reaktivna 323,74 kVAr, slika 4.1.

Smatra se da je trolpolni kratak spoj referentni za stabilnost sistema (ako je stabilnost zadovoljena pri ovom kvaru biće i za sve ostale tipove kvara). Vrednosti struja maksimalnog trolpolnog kratkog spoja na sabirnicama prikazane su na slici 4.2. Može se uočiti da za Test mreže bez OIE nema kritično velikih struja kratkog spoja, odnosno da su po Tehničkoj preporuci sve vrednosti kratkog spoja u dozvoljenim granicama, manje od 14,5 kA.

4.1. Priključenje Male Hidroelektrane MHE SSuEE

U čvoru br. 11 priključena je Mala Hidroelektrana: instalirana snaga 470 kVA; maksimalna aktivna snaga: 450 kW; naponski nivo priključenja 10 kV i faktor snage: 0,95.

Project: MHE SSuEE Connection rule: VDE-AR-N
Title: Used guideline: 4110
Date:

Network Data: Generating Plant	
Network Element	MHE SSuEE
Connection point	
Max. apparent connection power	470,0 kVA
Max. active connection power	450,0 kW
Power factor	0,95
Rated current	27,14 A
Number of generator units	1
Highest active connection power of generator unit	450,0 kW
Converter manufacturer	Siemens
Converter model	Line commutated
Converter type	Typo A
Network Data: Considered Subnetwork	
0 generating plants in the subnetwork	
Subnetwork nodes	
Subnetwork elements	
AlFe uže, 35/10kV, 35/10kV - Rezerva,...	

Results

Last calculation: 2024-02-05 12:10:08, Input data: 2024-02-05 12:10:08

Criteria	State
Short Circuit Power	OK
Equipment limits	Not passed
Slow voltage change	Not passed
Fast voltage change	Not passed
Flicker	OK
Harmonics	OK

Slika 4.3 – Rezultat priključenja MHE SSuEE

Na slici 4.3 su prikazani rezultati kriterijuma priključenja MHE na Test mrežu. Može se uočiti da postoje problemi sa opremom, brzim i sporim promenama napona. Ostali kriterijumi ne predstavljaju probleme pri priključenju MHE. Na slici 4.4 prikazane su vrednosti rezultata kriterijuma kod kojih su uočeni problemi. Vrednosti brzih i sporih promena napona su 3.38% (dozvoljena granica za spore promene je 3%, a za brze promene je 2%).

Equipment Limits

Type	Name	Value	Limit	Remark
Continuous current load				
Max. continuous current load - Transformer	TS	97,1 %	< 100,0 %	OK
Max. continuous current load - Line	AlFe uže	14,57 %	< 100,0 %	OK
Max. continuous current load - Cable	XHE 49-A 3x50	15,4 %	< 100,0 %	OK
Continuous current short circuit (MAX)				
Max. short circuit utilization	---	NO RESULT---	< 100,0 %	Not performed
Max. clearing time cable/line	AlFe uže	0,1 s	> 0,5 s	Not passed

Voltage change

Type	Name	Value	Limit	Remark
Slow voltage change				
Connection point	čvor 11	3,38 %	< 3,0 %	Not passed
Connection point max. ΔV	čvor 11	3,38 %	< 3,0 %	Not passed
Fast voltage change				
Voltage change at the connection point (connect)	čvor 11	3,38 %	< 2,0 %	Not passed
Voltage change at the connection point (disconnect)	čvor 11	3,38 %	< 2,0 %	Not passed

Slika 4.4 – Vrednosti rezultata proračuna kriterijuma MHE SSuEE

Na slici 4.5 su prikazani rezultati kriterijuma za priključenje MHE na Test mrežu nakon što je na deonici 4–5 promenjen presek i tip provodnika. Zadovoljen je i kriterijum dimenzionisanja opreme nakon promene vrednosti referentne struje kratkog spoja (1s) [kA].

Results

Last calculation: 2024-02-05 18:28:36, Input data: 2024-02-05 18:28:35

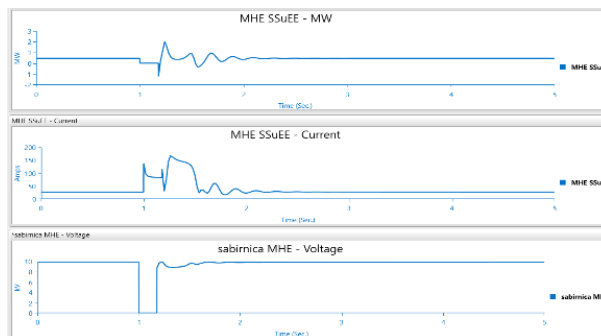
Criteria	State
Short Circuit Power	OK
Equipment limits	OK
Slow voltage change	OK
Fast voltage change	OK
Flicker	OK
Harmonics	OK

Slika 4.5 – Rezultati proračuna priključenja MHE SSuEE, nakon promene deonice 4–5

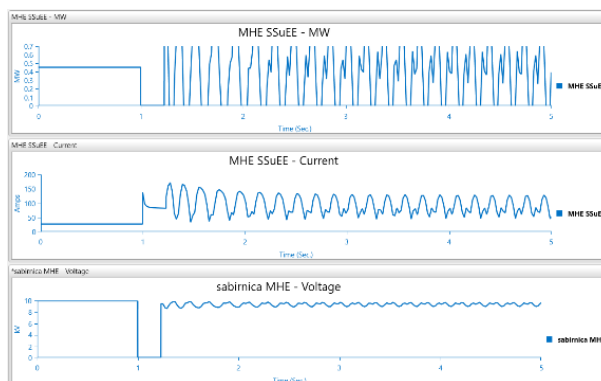
Tranzijentna stabilnost

Jedno od najvažnijih pitanja koje se nameće sa aspekta uklapanja MHE u EES jeste na koji način će one uticati na vrednosti struje kvara u priključnoj mreži. Pritom poznato je da usled kvara dolazi do propada napona u mreži. Udaljenost kvara od Male Hidroelektrane diktira kolika će biti dubina tog propada, a trajanje kvara određuje dužinu tog propada. U ovakvim analizama se kao referentni slučaj uzima trolni kratak spoj. Ako se uzmu u obzir sve jači zahtevi za proizvodnju “čiste” energije izuzetno je bitno razmotriti stabilnost MHE pri mogućim kvarovima u EES-u. Kvarovi su neizbežni, ali je potrebno nakon njihovog eliminisanja uspostaviti održiv režim u kome će potrošači biti snabdevani dovoljnom količinom energije [11].

Na slici 4.6 vreme trajanja kvara je 180ms. Nakon što se kvar otkloni generator se vratio u normalan pogon. Na slici 4.7 su prikazane veličine za vreme trajanja kvara 240ms. Nakon te dužine trajanja kvara generator ulazi u nestabilan režim. Jasan pokazatelj nestabilnog rada je talasni oblik aktivne snage generatora na kom se vide oscilacije velike amplitude koje se ne prigušuju u vremenu.



Slika 4.6 – ETAP: Veličine snage, struje i napona za vreme trajanja kvara od 180 ms



Slika 4.7 – ETAP: Veličine snage, struje i napona za vreme trajanja kvara od 240 ms

4.2. Priključenje Solarne elektrane MSE SSuEE

U čvoru br. 10 priključena je Mala Solarna elektrana: instalirana snaga 450 kVA; maksimalna aktivna snaga: 450 kW; naponski nivo priključenja 10 kV i faktor snage: 1.00.

Na slici 4.8 su prikazani rezultati provere kriterijuma priključenja MSE. Može se uočiti da priključenje MSE neće imati za posledicu probleme u DM sa flikerima, harmonicima, brzim promenama napona i opremom. Ipak, uočeni su problemi na sporim promenama napona.

Results

Last calculation: 2024-05-24 16:20:26, Input data: 2024-05-24 16:20:26

Criteria	State
Short Circuit Power	Not performed
Equipment limits	OK
Slow voltage change	Not passed
Fast voltage change	OK
Flicker	OK
Harmonics	OK

Slika 4.8 – Rezultat proračuna za priključenje MSE SSuEE

Na slici 4.9 su prikazane vrednosti rezultata sporih promena napona. Problemi su u čvorovima 10 i 11. Ovaj problem zahteva promenu preseka provodnika na deonicama 5–6 i 6–10, npr. zamenom Al-Fe uže sa kablom XHE 49-A 3x1x150mm².

Voltage change

Type	Name	Value	Limit	Remark
Slow voltage change				
Connection point	čvor 10	3,19 %	< 3,0 %	Not passed
Connection point max. ΔV	čvor 11	3,87 %	< 3,0 %	Not passed

Slika 4.9 – Vrednosti rezultata sporih promena napona

Na slici 4.10 su prikazani rezultati kriterijuma za priključenje MSE na Test mrežu nakon što su na deonicama 5–6 i 6–10 zamenjeni preseki provodnika. Može se uočiti da su tada svi kriterijumi ispunjeni.

Results

Last calculation: 2024-05-24 16:48:16. Input data: 2024-05-24 16:48:16

Criteria	State
Short Circuit Power	Not performed
Equipment limits	OK
Slow voltage change	OK
Fast voltage change	OK
Flicker	OK
Harmonics	OK

Slika 4.10 – Rezultati proračuna priključenja MSE SSuEE nakon zamene preseka na deonicama 5–6 i 6–10

Node #	S [MVA]	P [MW]	Q [Mvar]	vmin [%]	vmax [%]	ΔV [%]	itth [%]	itmax [%]	ipmax [%]	Rev. Feed [MW]	State
čvor 15	0,614	0,614	0,000	101,425	103,424	1,506	80,641	0,000	0,000	0,000	Ok

Slika 4.11 – PSS Sincal: Rezultat proračuna Hosting kapaciteta na proširenoj Test mreži

5. ZAKLJUČAK

U radu su opisane:

- osnove OIE, i njena sve veća upotreba u svetu;
- procedure i propisi priključenja novog OIE na DM.
- kako i na koji način se vrši priključenje OIE, uz uslove i kriterijume koji su analizirani kroz softverske alate PSS SINCAL i ETAP.

Na osnovu prikazanih rezultata može se uočiti da su nakon priključenja OIE smanjeni gubici na mreži uz minimalna ulaganja, znatno popravljene naponske prilike i kvalitet napona i povećan stepen sigurnosti mreže.

6. LITERATURA

- "Zakon o električnoj energiji Republike Srpske" ("Službeni glasnik RS" br. 68/20)
- "Zakon o obnovljivim izvorima energije Republike Srpske" ("Službeni glasnik RS" br. 16/22)
- Neobnovljivi izvori energije https://hr.wikipedia.org/wiki/Neobnovljivi_izvori_energije
- Uloga obnovljivih izvora energije <https://www.industrija.rs/vesti/clanak/oie-energija-buducnosti>
- Istorija obnovljivih izvora energije [Istorija obnovljivih izvora energije - ecoport.me](https://www.ecoport.me/istorija-obnovljivih-izvora-energije-ecoport.me)
- Distribuirani energetski resursi https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_generation
- Podaci iz baze podataka elektrodistributivnog preduzeća MH "Elektroprivreda Republike Srpske" a.d. Trebinje.
- "Pravilnik o uslovima za priključenje elektrana na elektrodistributivnu mrežu Republike Srpske" MH "Elektroprivreda Republike Srpske" a.d. Trebinje, mart 2014. godine

4.3. Hosting capacity

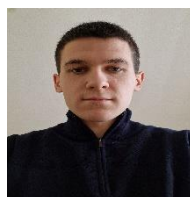
Hosting kapacitet se koristi kako bi se procenila sposobnost sistema da integriše nove OIE, kao što su solarni paneli, vetroelektrane i baterijske skladišne sisteme. Ovaj kapacitet predstavlja maksimalnu količinu dodatne energije koju sistem može prihvatiti bez da dođe do preopterećenja ili problema u kvalitetu napajanja.

Osnovna svrha hosting kapaciteta je procena koliko dodatne energije iz OIE može biti integrirano u postojeću mrežu bez skupe nadogradnje njene infrastrukture. Ovo je posebno važno u kontekstu tranzicije ka energetici s niskim emisijama CO₂ i povećane upotrebe OIE [12].

Na slici 4.11 je prikazano da se zahtevani uslovi kvaliteta napona mogu ispuniti samo na jednom mestu, i to u čvoru 15, koji je 0.4 kV naponskog nivoa. Moguće priključenje novog OIE je 614 kW zbog dodatnog uslova nemogućnosti injektiranja snage u 35 kV mrežu.

- Softverski alat PSS Sincal [Introduction - PSS@SINCAL - INDIELEC - Software CAD y CAE para ingenieria, ref-no-69-ps-c-pss-sincal-brochure-hires-intl-sept2018.pdf](https://www.siemens.com/infocenter/lit/pdf/69/ps-c-pss-sincal-brochure-hires-intl-sept2018.pdf) ([siemens.com](https://www.siemens.com))
- Softverski alat ETAP [ETAP | Schneider Electric Cpóija \(se.com\)](https://www.etap.com/), [New Products for Engineers \(cfemedia.com\)](https://www.cfemedia.com/), [Distribution System Software | Distribution Network Analysis | ADMS | ETAP](https://www.adms.com/)
- "Uticaj solarnih elektrana na elektroenergetski sistem BiH" – Parsons Brinckerhoff
- Hosting Capacity <https://www.nrel.gov/solar/market-research-analysis/advanced-hosting-capacity-analysis.html>
- G.Švenda, Z.Simendić: Adaptive On-Load Tap-Changing Voltage Control for Active Distribution Networks; Electrical Engineering, Vol. 104, April 2022, pp. 1041-1056; DOI: [10.1007/s00202-021-01357-8](https://doi.org/10.1007/s00202-021-01357-8)
- G.S.Švenda, I.Krstić, S.Kanjuh, M.Jajčanin, D.Vuletić: Volt Var Watt Optimization in Distribution Network with High Penetration of Renewable Energy Sources and Electric Vehicles; 2022 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Session 30: Industry Applications – Part II, Paper no. ID-21237, October 10-12, 2022, Novi Sad, Serbia; DOI: [10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960647](https://doi.org/10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960647)

Kratka biografija:



Nikola Sarkić je rođen u Doboju 1997. godine. Osnovne studije završio na FTN iz oblasti Elektrotehnike i Računarstvo – Elektroenergetski sistemi 2021. god. Iste godine upisao master studije na istom fakultetu.