

**MIKROMREŽA KAO RESURS ZA OPTIMIZACIJU NAPONA I SNAGA NA
DISTRIBUTIVNOM IZVODU****MICROGRID AS A RESOURCE FOR VOLTAGE AND POWER OPTIMIZATION AT
THE DISTRIBUTION FEEDER**Gordana Markov, Luka Strezoski, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – Cilj ovog istraživanja jeste da se na jednostavnom primjeru distributivne mreže od 33 čvora u koju je integrisana mikromreža, pokaže optimizacija napona i snaga na izvodu, koristeći primarno mikromrežu kao resurs sa optimizacijom, a zatim i ostale resurse koji se nalaze na raspolaganju u mreži.

Ključne reči: Optimizacija, napon, snaga, mikromreža

Abstract – The goal of this research is to demonstrate voltage and power optimization on a feeder of a 33-node distribution network integrated with a microgrid. This optimization will utilize the microgrid as the primary resource and subsequently other resources available within the network.

Keywords: Optimization, voltage, power, microgrid

1. UVOD

Danas se ključni trendovi u energetici mogu pratiti kroz 4D matricu: decentralizacija, dekarbonacija, demokratizacija i digitalizacija.

Decentralizacija označava da se iz pasivnih distributivnih mreža prelazi u aktivne distributivne mreže. To jeste proizvodnja koja je bila koncentrisana u okviru većih, tradicionalnih, generatorskih jedinica (npr. termoelektrane, hidroelektrane), sada se raspoređuje i dijeli između većih generatorskih jedinica i distribuiranih generatora (DG-ova), čija instalisana snaga može da varira u jako velikom opsegu [1]. Svi izvori obnovljive energije koji su snage do 10 MW se priključuju u distributivnu mrežu, dok se oni snage veće od 10 MW priključuju na prenosnu mrežu [2].

Dekarbonizacija se primarno odnosi na smanjenje zagađenjem CO₂, međutim ona obuhvata mnogo veći spektar zagađenja. Danas se teži dobijanju električne energije, sa što većim udjelom iz čistih obnovljivih izvora. Plan je da se postepeno njihov udio u proizvodnji električne energije povećava, sve dok se termoelektrane u potpunosti ne budu mogle ugasisi, što predstavlja jedan izuzetno zahtjevan i dugotrajan proces obzirom na dva faktora, a to su da su termoelektrane najveći proizvođači električne energije i da integracija velikog broja obnovljivih izvora u distributivnu mrežu predstavlja veoma komplikovan i tehnički zahtjevan poduhvat.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Luka Strezoski, vanr. prof.

U procesu dekarbonizacije energetskog sektora, električna energija koju proizvode građani pojavljuje se u obliku dva osnovna modela: model kupca-proizvođača (*eng. prosumer*) i model energetskih zajednica (zajednice obnovljivih izvora energije) [3].

Demokratizacija energetskog sektora je proces koji podrazumijeva aktivno uključivanje građana u proces donošenja i usvajanja klimatsko-energetske politike i aktivno učešće u svim segmentima implementacije.

Digitalizacija mreže se odnosi na digitalizaciju što većeg broja uređaja i procesa, a sve to u cilju što efikasnijeg i efektivnijeg funkcionisanja.

Ova četiri procesa kada teknu istovremeno čine jedan veći proces koji se naziva energetska tranzicija, a podrazumijeva prelazak sa tradicionalnih načina proizvodnje, koji većinom obuhvataju neobnovljive izvore energije (ugalj, nafta, plin), na nove, obnovljive izvore energije. Energetska tranzicija sama po sebi zahtjeva i vuče mnoge nove koncepte, a jedan od njih jeste i koncept mikromreže. Prednosti koje donosi implementacija mikromreže su mnogobrojne i zavise od elementa mikromreže, njene snage i pozicije u sistemu. Svakako jedna od prednosti jeste i mogućnost optimizacije napona i snaga na izvodima. U ovom radu biće stavljen naglasak na korištenje mikromreže kao resursa za optimizaciju napona i snaga na distributivnom izvodu. Mogućnost mikromreže da obavlja ovu funkciju proizilazi iz činjenice da mikromreža omogućava više autonomnosti u upravljanju distributivnom mrežom, što je posebno korisno u uslovima povećane distribuirane proizvodnje električne energije. Rezultati istraživanja prikazani su u trećoj glavi tabelarno.

2. OPTIMIZACIJA U DISTRIBUTIVNOJ MREŽI

Optimizacija generalno u elektroenergetskim mrežama je izuzetno važna, jer pomaže u efikasnom upravljanju i korišćenju resursa, obezbjeđujući pouzdanu i ekonomičnu proizvodnju i distribuciju električne energije. U distributivnim mrežama optimizacija se obavlja uzimajući u obzir različite kriterijume i ograničenja.

Optimizacija napona je jedna od glavnih funkcija koju obavlja svaka distributivna mreža i praktično predstavlja regulaciju napona u različitim tačkama mreže, kako bi se održavao željeni naponski nivo u sistemu [4]. Tehničke granice u kojima napon mora da se zadrži, obično iznose +/- % ili +/- 10 % u odnosu na nominalnu vrijednost napona.

Optimizacija snaga, kao funkcija, ima za cilj da maksimalno iskoristi resurse koji se nalaze u distributivnoj mreži, istovremeno obezbjeđujući pouzdanost napajanja i maksimalnu moguću efikasnost. Ovo uključuje pravilno upravljanje proizvodnjom, raspodjelom električne energije duž distributivne mreže, kao i potrošnjom.

Kriterijum gubitaka aktivne snage veoma je značajan zbog činjenice da su gubici, naponi i snage veoma usko povezani. U praksi, postoji potreba za balansiranim pristupom između optimizacije napona i smanjenja gubitaka kako bi se postiglo najefikasnije i najodrživije upravljanje distributivnom mrežom. Ovo obično uključuje upotrebu naprednih softverskih alata

3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

U ovoj glavi će se na nekoliko različitih primjera vršiti optimizacija napona i snaga, uvažavajući pri tome kriterijum minimalnih gubitaka aktivne snage, kao i naponska i strujna ograničenja. Kao glavni resurs za optimizaciju koristila se mikromreža, a zatim transformator T1, Kondenzator 1 i Kondenzator 2. U ovom radu za modelovanje i proračun korišten je program Etap, besplatna verzija 19.0.1, skinuta 08.07.2023. sa sajta koji je u literaturi označen pod rednim brojem [7].

3.1. Višekriterijumska optimizacija

Višekriterijumska optimizacija predstavlja traženje najboljeg rješenja iz niza dopustivih rješenja, koja odgovaraju nizu usvojenih kriterijuma/ograničenja [5].

Ograničenja koja su uvedena:

- naponsko ograničenje za čvorove i
- strujno ograničenje za vodove.

Kriterijum minimalnih gubitaka aktivne snage može se i matematički zapisati u obliku sljedeće formule:

$$\min\{z_{obj}\} = \sum^m R_l * I_{l=1}^2, l = 1, 2, 3 \dots m \quad (3.1.1.)$$

[z_{obj}] -Funkcija koja se minimizira, ali uvažavajući i ograničenja

[R] -Otpornost voda

[I] -Struja po vodu

[l] -Indeks tekućeg voda

[m] -Ukupan broj vodova

Održavanje napona u zadatim tehničkim okvirima od izuzetne je važnosti. Tehničke granice u kojima napon može da se nađe prikazane su sljedećim formulama:

$$u_{min} \leq u_k \leq u_{max}, k = 1, 2, 3 \dots n \quad (3.1.2.)$$

$$u_{min} = 0.95 * u_n \quad (3.1.3.)$$

$$u_{max} = 1.05 * u_n \quad (3.1.4.)$$

[u_n] -Nominalni (nazivni) napon čvora

[u_{max}] -Maksimalna vrijednost napona čvora

[u_{min}] -Minimalna vrijednost napona čvora

[k] -Tekući čvor

[n] -Broj čvorova u sistemu

Održavanje vrijednosti struja po vodovima unutar tehničkih granica je takođe od velikog značaja. Tehničke gra-

nice u kojima vrijednosti struje po vodovima mogu da se nađu izražene su sljedećim formulama:

$$i_{min} \leq i_l \leq i_{max}, l = 1, 2, 3 \dots m \quad (3.1.5.)$$

$$i_{max} = 1.3 * i_n \quad (3.1.6.)$$

$$i_{min} = 0.4 * i_n \quad (3.1.7.)$$

[i] - Trenutna vrijednost struje po vodu

[i_n] - Nominalna (nazivna) vrijednost struje po vodu

[i_{max}] - Maksimalna vrijednost struje po vodu

[i_{min}] - Minimalna vrijednost struje po vodu

[l] - Tekući vod

[m] - Ukupan broj vodova

3.2. Primjer 1 – IEEE 33 test mreža

IEEE 33 test mreža se često koristi za testiranje performansi i stabilnosti elektroenergetskih sistema, proučavanje uticaja promjene opterećenja i analizu gubitaka energije. Napon mreže je 12.66 kV, dok je konfiguracija mreža radialna.

IEEE 33 test mreža sastoji se od :

- **Čvorovi:** Mreža ima ukupno 33 čvora. Svi čvorovi su potrošački (PQ čvorovi), osim čvora br.0, koji predstavlja napojni čvor tj. (ΘV čvor) i ima fiksni modu napona i fazniugao.

- **Grane:** IEEE 33 test mreža ima 32 grane koje povezuju čvorove. Za svaku granu moguće je zadati impedansu.

- **Opterećenje:** U mreži postoje čvorovi koji predstavljaju potrošače električne energije. Opterećenje može biti rezistivno, induktivno ili kapacitivno i simulira stvarne potrošače u elektroenergetskim sistemima.

- **Generatori:** Takođe, postoje čvorovi koji predstavljaju električne generatore, koji proizvode električnu energiju i predaju je u sistem.

Nakon pokrenute simulacije tokova snaga, rezultati koji su dobijeni u proračunu, poređeni su sa radom koji se nalazi u sklopu IEEE literature, a u sklopu literature ovog rada nalazi se pod brojem [6]. Svi rezultati prikazani su u tabeli 3.2.1.

Tabela 3.2.1. Poređenje rezultata (gubitaka)

	Gubici aktivne snage[kW]
Rezultat ovog rada IEEE33	211.00
Rezultat iz literature IEEE 33	211.22

Nakon poređenja totalnih gubitaka aktivne snage, iz table 3.2.1. može se zaključiti da su rezultati približno jednaki, a samim tim i napravljeni model dovoljno dobar.

3.3. Primjer 2 – IEEE 33* test mreža

Prije nego što se izvršila neophodna integracija jedne mikromreže u originalni model IEEE 33 test mreže, obezbjeđeno je da se ova distributivna mreža napaja iz

matične mreže preko transformatora T2 snage 20 MVA i prenosnog odnosa 69/12.66 kV. Nakon toga izvršena je integracija mikromreže, koju je primarno činila jedna solarna elektrana, čija je ukupna instalirana snaga iznosila 1.5 MW. Da bi se osigurala stabilnost, mikromreži je dodat i jedan dizel generator snage 1.2 MW, kao rezervno napajanje. Takođe, u ovoj mikromreži se nalazi i potrošač snage 60 kVA. Ova mikromreža pripada naponskom nivou 0.415 kV, a na matičnu mrežu priključena je preko transformatora T1 čija snaga iznosi 1.5 MVA, a prenosni odnos 12.66/0.415 kV.

Mreža takođe posjeduje mogućnost ostrvskog režima rada. U distributivnoj mreži dodata su i dva kondenzatora, u čvoru 27 Kondenzator 1 snage 300 kVar i u čvoru 29 Kondenzator 2 snage 900 kVar.

Podešenja svih drugih elemenata sistema ostala su identična kao u originalnoj mreži. Nakon pokretanja simulacije došlo se do zaključka da u novoj mreži IEEE 33*, nije bilo narušavanja ni jednog ograničenja. Gubici aktivne snage dati su u tabeli 3.3.1, kao i gubici u originalnoj mreži, radi poređenja.

Tabela 3.3.1. Poređenje gubitaka

	Gubici aktivne snage [kW]
<i>IEEE 33</i>	211.0
<i>IEEE 33*</i>	83.8

Iz ovoga je očigledno da su se u novoj konfiguraciji gubici aktivne snage smanjili za približno 60.2%.

Pošto se u ovom slučaju optimizacija izvršila dodavanjem elemenata u mrežu, sada bi bilo neophodno izvršiti i optimizaciju u ovoj konfiguraciji mreže, prepodešavanjem elemenata. Dakle, cilj narednih simulacija jeste da se smanje gubici u odnosu na gubitke koji su dobijeni u prethodnom primjeru. Neophodno je ispitati da li svi elementi imaju najoptimalnije podešenje, i ukoliko to nije slučaj, pomjerenje ka boljem rješenju neophodno je raditi u početnim koracima od po 10 %

3.4. Primjer 3 – IEEE 33* test mreža sa optimizovanom proizvodnjom mikromreže

Proizvodnja za koju se dobijaju minimalni gubici aktivne snage iznosi 1297 kW. Povezivanjem mikromreže, čija je proizvodnja veća od njene potrošnje, na distributivnu mrežu, dobija se mogućnost da ona napaja potrošače koji se nalaze u njenoj neposrednoj blizini. Što je veća njena proizvodnja, manji su tokovi snaga koji dolaze od korijena matične distributivne mreže ka ovim potrošačima, pa su samim tim manji i gubici.

Ipak snaga koju injektira mikromreža ne može biti beskonačno velika, jer u jednom trenutku proizvodnja, postaje dosta veća od obližne potrošnje, dobijaju se sve veći uzvodni tokovi snaga, a samim tim i gubici aktivne snage u mreži. Rezultati koji su dobijeni ovdje poklapaju se sa rezultatima iz rada koji je naveden u literaturi pod rednim brojem [2]. U tabeli 3.4.1. prikazan je odnos gubitaka u prethodnoj i sadašnjoj iteraciji može se reći da su gubici aktivne snage smanjeni za 0.36%.

Tabela 3.4.1. Poređenje gubitaka

	Gubici aktivne snage [kW]
<i>IEEE 33*</i>	83.8
<i>IEEE 33* nakon prve optimizacije</i>	83.5

3.5. Primjer 3 – IEEE 33* test mreža sa optimizovanom proizvodnjom transformatora T1

Prvo se podešavao otcjep na regulacionom transformatoru T1. Vrijednosti koje otcjep može da uzme su -5.0 %, -2.5 %, 0, 2.5 % i 5.0 %. Obzirom da su gubici najmanji kada se otcjep na primaru nalazi u nultom položaju, a otcjep na sekundaru na poziciji -5 %, ovo podešenje transformatora će se zadržati. Da će se gubici smanjivati povećavanjem otcjepa na sekundaru transformatora u negativnu stranu bilo je za očekivati, zato što se ovom radnjom smanjuju struje na sekundaru, a samim tim i gubici. U tabeli 3.5.1. prikazan je odnos gubitaka u prethodnoj i sadašnjoj iteraciji, i može se reći da su smanjeni za 1.08 %.

Tabela 3.5.1. Poređenje gubitaka

	Gubici aktivne snage [kW]
<i>IEEE 33* nakon prve optimizacije</i>	83.5
<i>IEEE 33* nakon druge optimizacije</i>	82.6

3.6. Primjer 4 – IEEE 33* test mreža sa optimizovanom proizvodnjom Kondenzatora 1

Kao rezultat proračuna dobilo se da kako raste kapacitet tako gubici aktivne snage padaju. Ovo se može objasniti činjenicom da je u sistemu neophodno da postoji reaktivna snaga, ali da njen prenos utiče na povećanje pada napona [2]. Sa većim padom napona, veći je i ukupan otpor koji struja mora prevazići kroz vodove, čime se povećavaju i gubici. Zato se teži postavljanju dovoljnog broja kompenzatora reaktivne snage na strateški odgovarajućim mjestima, kako bi se izbjegao prenos, a samim tim i gubici. Iako se ovdje nije konkretno mjenjalo mjesto kondenzatora u sistemu, njegov veći kapacitet uticao je na to da se gubici smanje, ali samo do određenog trenutka, kada njegova proizvodnja kao u slučaju mikromreže postaje opterećenje za vodove i sistem i gubici opet kreću da rastu.

Za kapacitet 630 kVar dobijaju se najmanji gubici. U tabeli ispod prikazan je odnos gubitaka u prethodnoj i sadašnjoj iteraciji, i može se reći da su smanjeni za 4.0 %.

Tabela 3.6.1. Poređenje gubitaka

	Gubici aktivne snage [kW]
<i>IEEE 33* nakon druge optimizacije</i>	82.6
<i>IEEE 33* nakon treće optimizacije</i>	79.3

3.7. Primjer 5 – IEEE 33* test mreža sa optimizovanom proizvodnjom Kondenzatora 2

Ovdje je kao rezultat dobijeno da u kom se god smjeru krene mijenjati kapacitet kondenzatora, gubici se ne smanjuju, tako da je zaključak da je trenutno podešenje elementa najbolje i zbog toga se neće mijenjati.

Tabela 3.7.1. Poređenje gubitaka

	Gubici aktivne snage [kW]
<i>IEEE 33* nakon treće optimizacije</i>	79.3
<i>IEEE 33* nakon četvrte optimizacije</i>	79.3

3.8. Analiza rezultata

Ukupno smanjenje gubitaka dobijeno optimizacijom iznosi 5.36 %, a ako računamo i smanjenje gubitaka koje je izazvano integracijom mikromreže i kondenzatora u sistem ukupno smanjenje gubitaka aktivne snage iznosi 62.42 %. Smanjenje gubitaka po iteracijama u odnosu na prethodnu iteraciju prikazano je u tabeli 3.8.1.

Tabela 3.8.1. Smanjenje gubitaka po iteracijama

	Smanjenje gubitaka aktivne snage [%]
<i>IEEE 33*</i>	60.20 %
<i>IEEE 33* nakon prve optimizacije</i>	0.36 %
<i>IEEE 33* nakon druge optimizacije</i>	1.08 %
<i>IEEE 33* nakon treće optimizacije</i>	4.00 %
<i>IEEE 33* nakon četvrte optimizacije</i>	0.00 %

Iz prethodne tabele 3.8.1. jasno se vidi da se u ovom slučaju najveće smanjenje gubitaka dobilo prostom integracijom mikromreže i kondenzatora, zatim slijedi optimizacija snage kondenzatora, zatim optimizacija podešavanja regulacionog otcjepa na transformatoru i na kraju tek optimizacijom proizvodnje mikromreže.

4. ZAKLJUČAK

Distributivne mreže su podložne stalnim promjenama, koje su izazvane energetsom tranzicijom. Ove promjene utiču na stavljanje novih izazova koji se odnose na izmjenu strukture i načina funkcionisanja savremene distributivne mreže. Neki od izazova svakako bi bili i optimizacija napona i snaga na izvodima. Za optimizaciju u elektroenergetici, generalno, može se reći da je ključna za postizanje energetske efikasnosti, smanjenje emisije štetnih gasova, očuvanje resursa i stvaranje održivijih energetskih sistema.

Optimizacija elektroenergetskih mreža često uključuje upotrebu matematičkih modela i algoritama kako bi se postigli željeni ciljevi uzimajući u obzir različite faktore i ograničenja. Za rješavanje optimizacionih problema, ali i mnogih drugih, često se kao resurs koristi mikromreža. Optimizacija je izvršena uspješno sa smanjivanjem gubitaka aktivne snage za 62.42%. Iz ovih brojeva može se zaključiti koliko može biti značajna integracija mikromreže, kao i adekvatna optimizacija.

5. LITERATURA

- [1] Maria Luisa Di Silvestre, Salvatore Favuzza, Eleonora Riva Sanseverino, Gaetano Zizzo: "How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 93, 2018.
- [2] Josip Jukić: "Tehno-ekonomska analiza mjera za smanjenje gubitaka u distributivnoj mreži", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, Hrvatska, 2021.
- [3] Centar Za Održivu Energetsku Tranziciju (RESET): Džemal Hadžiosmanović, Armin Đuliman, Damir Miljević, Mirza Kušljugić: "Građanska energija i demokratizacija elektroenergetskog sektora u BiH", jun 2022. Dostupno na linku: <https://reset.ba/wp-content/uploads/2022/07/Final-Gradjanska-energija-RESET.pdf>, pristup ostvaren 17.08.2023.
- [4] Nenad Katić, Menadžment sistema u elektroenergetici EMS i DMS, Predavanja, Fakultet Tehničkih Nauka u Novom Sadu, Novi Sad, 2023.
- [5] Darko Šošić, Predrag Stefanov: "Višekriterijumska optimalna rekonfiguracija distributivne mreže primenom algoritma sivih vukova", INFOTEH- JAHORINA, Vol. 16, 2017.
- [6] B. Venkatesh, R. Ranjan, H.B. Gooi, "Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems to Maximize Loadability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 19, Issue: 1, 2004.
- [7] Dostupno na linku: <https://etap.software.informer.com/download/>, pristup ostvaren: 08.07.2023.

Kratka biografija:



Gordana Markov rođena je u Trebinju 1999. god. Osnovne studije na Fakultetu tehničkih nauka na odsjeku Elektroenergetski sistemi završila je 2022. godine.
kontakt: gordana.markov18@gmail.com



Dr. Luka Strezoski rođen je u Novom Sadu 1990. Doktorirao je na Fakultetu tehničkih nauka 2017. god., a od 2020 je izabran za šefa katedre. Oblast interesovanja su elektroenergetski sistemi.