

Bojana Barać, Matija Kostelac, Tomislav Capuder
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i
računarstva
[fbojana.barac, matija.kostelac, tomislav.capuder}@fer.unizg.hr](mailto:{bojana.barac, matija.kostelac, tomislav.capuder}@fer.unizg.hr)

Anton Marušić, Joško Grašo, Bernarda Ostojić
Elektra Zagreb HEP ODS d.o.o.
[fanton.marusic, josko.graso, bernarda.ostojic}@hep.hr](mailto:{anton.marusic, josko.graso, bernarda.ostojic}@hep.hr)

INTEGRACIJA BATERIJSKOG SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA POVEĆANJE OTPORNOSTI DISTRIBUCIJSKE MREŽE GRADA ZAGREBA

SAŽETAK

Prirodne katastrofe sve češće uzrokuju velike prekide u opskrbi električnom energijom, što je potaknulo intenzivna istraživanja metoda za povećanje otpornosti elektroenergetskih sustava. Kao odgovor na dva snažna potresa koji su 2020. godine pogodili grad Zagreb i uzrokovali prekide napajanja zdravstvenih ustanova, operator distribucijskog sustava razmatra implementaciju baterijskog spremnika energije za osiguranje pouzdanosti napajanja kritičnih potrošača tijekom kvarova ili ekstremnih mrežnih događaja. U ovom radu korišten je optimizacijski model za određivanje optimalne veličine i lokacije baterijskog spremnika, dok je upravljački sustav pretvarača, temeljen na konceptu virtualnog sinkronog stroja, razvijen radi analize dinamičke stabilnosti i sposobnosti sustava za pouzdano napajanje u otočnom režimu. Predloženi modeli verificirani su na stvarnim uvjetima srednjenaponske distribucijske mreže u Zagrebu.

Ključne riječi: baterijski spremnik energije, dinamička stabilnost, optimizacijski model, otočni pogon, otpornost, virtualni sinkroni stroj

INTEGRATION OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM TO ENHANCE RESILIENCE OF ZAGREB'S DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

Natural disasters increasingly cause significant power supply interruptions, prompting intensive research into methods for enhancing the resilience of power systems. In response to two major earthquakes that struck the City of Zagreb in 2020, leading to power outages in healthcare facilities, the distribution system operator is considering the implementation of a battery energy storage system to ensure reliable power supply to critical consumers during faults or extreme network events. This paper employs an optimization model to determine the optimal size and location of the battery storage system, while the converter control system, based on the concept of a virtual synchronous machine, is developed to analyze the dynamic stability and system capability for reliable power supply in islanded mode. The proposed models are validated under real conditions in the medium-voltage distribution network of Zagreb.

Key words: battery energy storage system, dynamic stability, optimization model, islanded operation, resilience, virtual synchronous machine

1. UVOD

Sve češća pojava nepredvidivih prirodnih katastrofa predstavlja jedan od glavnih uzroka velikih prekida u opskrbi električnom energijom te značajnih financijskih gubitaka u elektroenergetskim sustavima. Iako su ovi događaji relativno rijetki, njihov razorni utjecaj na energetske infrastrukture može rezultirati dugotrajnim procesima oporavka, koji ponekad traju mjesecima. Elektroenergetski sustavi uobičajeno su projektirani tako da mogu funkcionirati i u slučaju ispada jednog ili dva elementa, pri čemu se sigurnosni kriteriji analiziraju putem N-1 i N-2 metoda [1]. Međutim, događaji visokog utjecaja, ali niske vjerojatnosti, poput oluja, poplava, potresa, požara ili kibernetičkih napada, mogu imati katastrofalne posljedice, uzrokujući brojne prekinde u radu sustava. Sposobnost elektroenergetskog sustava da podnese, prilagodi se i oporavi od ovakvih ekstremnih događaja definira se kao otpornost elektroenergetskog sustava [2]. U literaturi su prikazane različite strategije za povećanje otpornosti sustava, koje se mogu podijeliti u dvije glavne kategorije: metode temeljene na planiranju i operativne metode [3]. Metode temeljene na planiranju usmjerene su na jačanje fizičke infrastrukture sustava, poput zamjene postojećih ili izgradnje paralelnih vodova, poboljšanja uzemljenja trafostanica i sličnih mjera [3]. Operativne metode, s druge strane, fokusiraju se na iskorištavanje dostupnih komponenti sustava kako bi se omogućila brža prilagodba i ubrzao proces oporavka od poremećaja [3]. U okviru operativnih metoda, obnovljivi izvori energije (OIE) igraju važnu ulogu jer se mogu instalirati bliže krajnjim korisnicima, čime se smanjuje rizik od velikih prekida u opskrbi. Međutim, fotonaponski sustavi i vjetroelektrane suočavaju se s izazovima otpornosti zbog ovisnosti proizvodnje o vremenskim uvjetima i dobu dana. Zbog toga se sve veći naglasak stavlja na baterijske sustave za pohranu energije, koji imaju sposobnost brzog frekvencijskog odziva. Iako se baterijski spremnici energije češće koriste za kratkoročno održavanje pouzdanosti mreže, odnosno za ublažavanje fluktuacija u proizvodnji OIE, pravilno dimenzionirani i upravljani baterijski sustavi također mogu omogućiti prijelaz dijela sustava u otočni način rada [4]. Stoga, baterijski spremnici energije predstavljaju efikasno rješenje za povećanje otpornosti elektroenergetskog sustava, osiguravajući kontinuiranu opskrbu električnom energijom kritičnim potrošačima tijekom ekstremnih događaja.

U literaturi je predstavljeno nekoliko radova koji se bave problematikom smještaja i dimenzioniranja baterijskih spremnika energije kako bi se povećala otpornost elektroenergetskog sustava. Primjerice, u radovima [5], [6] predstavljen je višeciljni optimizacijski model za određivanje optimalne veličine i lokacije baterijskih spremnika energije te fotonaponskih sustava u prijenosnim mrežama, kako bi bili pristupačni bitnim potrošačima i jedinicama koje nemaju sposobnost ponovnog pokretanja (black starta) tijekom ekstremnih događaja. S obzirom na to da sama primjena baterijskih spremnika za povećanje otpornosti nije dovoljna da opravda visoke investicijske troškove, često se integriraju na lokacije koje donose maksimalnu ekonomsku vrijednost u uvjetima normalnog rada sustava. U tom kontekstu, autori radova [7], [8] razvili su optimizacijske modele koji se fokusiraju na ulaganja u mobilne baterijske spremnike energije te njihovo premještanje radi formiranja dinamičkih mikromreža. Cilj je izbjeći smanjenje opterećenja uzrokovano ekstremnim događajima. Nadalje, u radu [9] analizirano je koliko kritičnog opterećenja različite tehnologije baterijskih spremnika energije mogu pokriti tijekom ekstremnih vremenskih uvjeta. Rad [10] bavi se optimizacijom veličine i lokacije baterijskog spremnika u distribucijskim mrežama s visokim udjelom OIE, s ciljem smanjenja isključenog opterećenja tijekom ekstremnih događaja. Sličan problem obrađen je u radu [11], koji predstavlja dvorazinski optimizacijski model. Unutarnji sloj modela fokusira se na optimizaciju performansi sustava za podnošenje višestrukih kvarova uz uvažavanje mrežnih ograničenja, dok se vanjski sloj bavi određivanjem optimalne veličine i lokacije baterijskog spremnika energije iz ekonomske perspektive. Analizom navedenih radova može se zaključiti kako se u znanstvenim i tehničkim analizama često zanemaruju ključni zahtjevi za osiguranje primarne rezerve tijekom otočnog rada baterijskih sustava, što može rezultirati nedostatnim kapacitetima snage i energije. Nadalje, upravljački sustav baterijskog spremnika, koji značajno utječe na njegovu sposobnost prijelaza u otočni način rada, također se rijetko uzima u obzir. U praktičnoj primjeni, takvi propusti mogu dovesti do nesposobnosti baterije da isporuči predviđene usluge koje su bile osnova za početnu investiciju. S investicijskog stajališta, takvi nedostaci mogu zahtijevati dodatne troškove za nabavu i instalaciju novih baterijskih sustava na ciljanim lokacijama, što ugrožava ekonomsku održivost projekta i smanjuje šanse za ostvarenje povrata ulaganja.

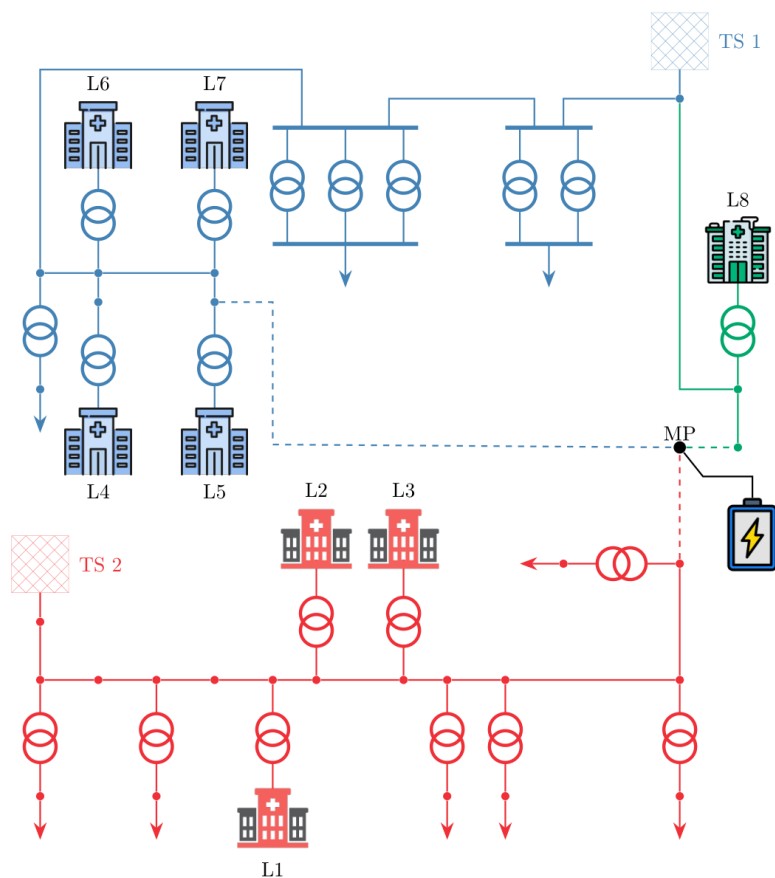
Kako bi se adresirali uočeni nedostaci u postojećoj literaturi, ovaj rad predstavlja okvir za optimizaciju veličine i lokacije baterijskog spremnika energije, uz integraciju dinamičkih analiza radi provjere tehničkih ograničenja sustava. Predloženi okvir sastoji se od dva ključna koraka. U prvom koraku razvijen je optimizacijski model za određivanje optimalne veličine i lokacije baterijskog spremnika energije s ciljem minimizacije ukupnih troškova. U drugom koraku izrađeni su dinamički modeli baterijskog spremnika i njegovog upravljačkog sustava kako bi se osigurala stabilnost prijelaza u otočni način rada. Dinamičkim analizama provjerava se sposobnost baterijskog sustava da omogući stabilan prijelaz u otočni pogon i zadovolji frekvencijska i naponska ograničenja tijekom otočnog rada. U slučajevima kada prijelaz nije

stabilan ili navedena ograničenja nisu zadovoljena, definiraju se dodatna ograničenja snage i kapaciteta baterijskog spremnika. Optimizacijski model zatim se ponovno rješava, uz uvažavanje novih ograničenja. Ovakav pristup osigurava pouzdanu integraciju baterijskih spremnika energije te poboljšava sigurnost opskrbe i N-k sigurnost promatrane mreže. Predloženi okvir primijenjen je na distribucijsku mrežu grada Zagreba. Potreba za integracijom baterijskog spremnika energije uočena je nakon dva snažna potresa koja su pogodila Zagreb i okolicu tijekom 2020. godine. U tim uvjetima, zdravstvene ustanove, koje su već iznimno osjetljive na prekide u opskrbi električnom energijom, dodatno su bile opterećene zbog pandemije COVID-19. Ovi događaji bili su ključni poticaj za donošenje mjera usmjerenih na povećanje sigurnosti i otpornosti sustava. U tom kontekstu, predlaže se instalacija baterijskog spremnika energije dovoljnog kapaciteta i snage koji može osigurati kontinuiranu opskrbu kritičnih potrošača, poput zdravstvenih ustanova, te pružati pomoćne usluge tijekom prijelaza u otočni pogon u slučaju kvarova u distribucijskoj mreži.

Ostatak rada strukturiran je na sljedeći način: poglavlje 2 detaljno opisuje optimizacijski model i dinamičko modeliranje koji čine okvir za integraciju baterijskih spremnika energije. U poglavlju 3 predstavljeni su rezultati dobiveni primjenom predloženog okvira na distribucijsku mrežu grada Zagreba. Zaključno, poglavlje 4 sažima ključne doprinose i rezultate ovog rada.

2. MODELIRANJE BATERIJSKOG SPREMNIKA ENERGIJE

Promatrani dio distribucijske mreže obuhvaća segment 10 kV i 0,4 kV hrvatskog elektroenergetskog sustava, prikazan na slici 1. Ovaj segment odabran je za razmatranje zbog koncentracije bitnih (kritičnih) potrošača, prvenstveno bolnica označenih kao L1-L8 na slici 1. Navedene bolnice modelirane su kao pasivni tereti, čija potrošnja temelji se na stvarnim podacima mjerenim na ovoj lokaciji. Budući da su promatrani bitni potrošači smješteni na tri distribucijska izvoda, za potrebe modeliranja definirane su četiri različite mikromreže, prikazane različitim bojama na slici 1: 1. mikromreža prikazana plavom, 2. mikromreža prikazana crvenom, 3. mikromreža prikazana zelenom, te 4. mikromreža koja obuhvaća sve tri prethodne zajedno. Za svaku od definiranih mikromreža određuju se optimalna veličina i lokacija baterijskog spremnika energije, koji će biti sposoban snabdijevati bitne potrošače u otočnom pogonu, prema okviru prikazanom na slici 2 i opisanom u sljedećim odjeljcima.

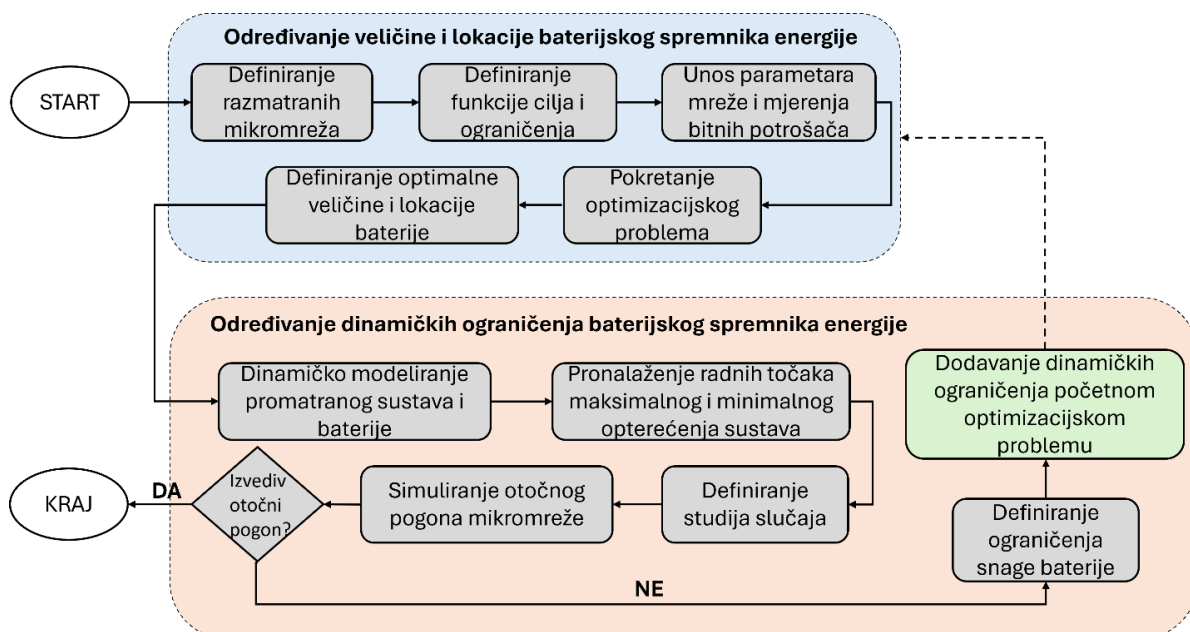


Slika 1. Izgled promatranog dijela elektroenergetske distribucijske mreže

Na slici 1, isprekidanom linijom prikazani su vodovi koji omogućuju napajanje promatranih distribucijskih izvoda putem baterijskog spremnika. U normalnom pogonu, baterijski spremnik je spojen na jedan od promatranih izvoda, dok u slučaju poremećaja u distribucijskoj mreži može osigurati otočni pogon za navedene izvode.

2.1 Određivanje dimenzija baterijskog spremnika energije

U ovom odjeljku opisan je optimizacijski model čiji je cilj određivanje optimalne veličine baterijskog sustava koji je prikladan za opskrbu svih bitnih potrošača unutar promatrane mikromreže tijekom 3 sata, u skladu sa zahtjevima operatora distribucijskog sustava. Za potrebe optimizacije odabrano je osam karakterističnih dana, po dva dana za svako godišnje doba. U razmatranje je uzeta isključivo potrošnja bitnih potrošača (zdravstvenih ustanova), dok je potrošnja ostalih potrošača zanemarena. Vremenski korak optimizacije je interval od 15 minuta.



Slika 2. Okvir analize sposobnosti baterijskog spremnika za pružanje pomoćnih usluga u ekstremnim uvjetima

Funkcija cilja optimizacijskog problema definirana je kao minimizacija troškova uzrokovanih gubicima u mreži i troškova investicije baterijskog spremnika, kako je prikazano jednačbom (1). Gubici u mreži ovise o otporu vodova R_{ik} i kvadratu struje $I_{ik,t}$ na vodu ik u trenutku t , dok je njihova cijena označena kao c_{loss} . Troškovi investicije ovise o kapacitetu baterije C_{bat} , maksimalnoj nazivnoj snazi $S_{bat,max}$, cijeni po jedinici kapaciteta c_1 i cijeni po jedinici snage c_2 .

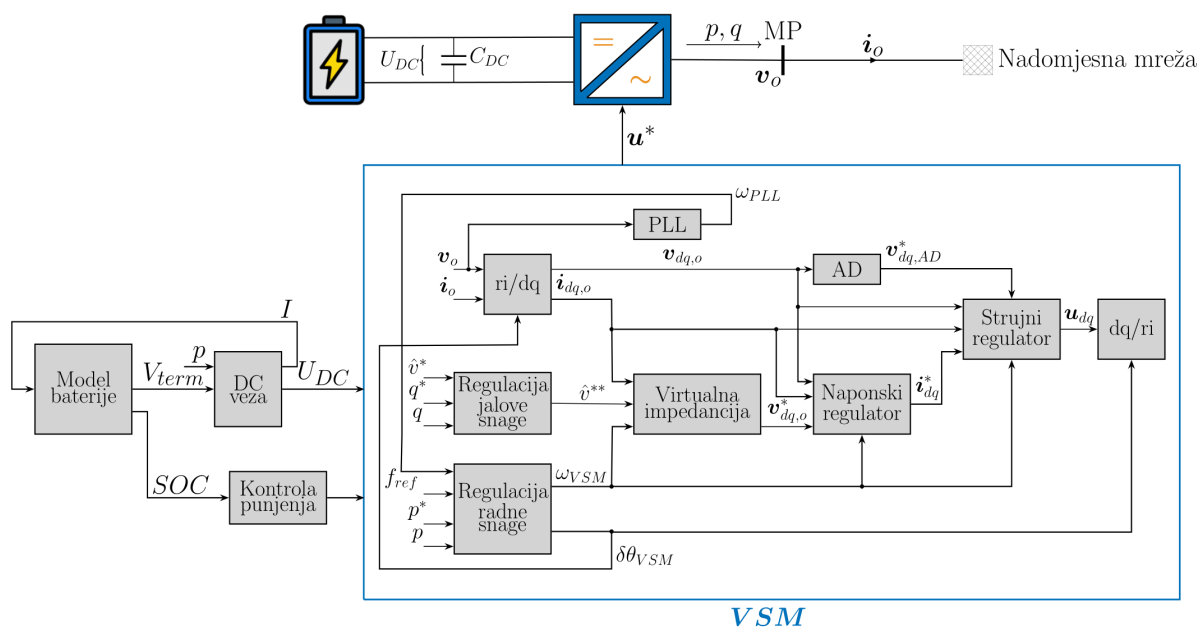
$$\min \sum_t \sum_{ik \in L} R_{ik} \cdot I_{ik,t}^2 \cdot c_{loss} + C_{bat} \cdot c_1 + S_{bat,max} \cdot c_2 \quad (1)$$

Ograničenja optimizacijskog problema obuhvaćaju ograničenja vezana uz baterijski spremnik i problem optimalnih tokova snaga (OPF). Kapacitet baterije mora u svakom trenutku biti unutar zadanih minimalnih i maksimalnih vrijednosti, dok su maksimalne snage punjenja i pražnjenja ograničene nazivnom radnom snagom baterijskog sustava. Tokovi jalove snage ograničeni su maksimalnom jalovom snagom pretvarača. Nadalje, snage baterijskog spremnika uključene su u model optimalnog toka snaga, čiji je cilj identificirati optimalne postavke elektroenergetske mreže koje minimiziraju ciljne troškove, uz istovremeno zadovoljavanje jednačbi tokova snaga, sigurnosnih kriterija sustava i operativnih ograničenja mrežnih komponenata. Za modeliranje tokova snaga u distribucijskim mrežama koristi se DistFlow model koji precizno opisuje tokove snaga u sustavu. Međutim, zbog nelinearnosti ovog modela, rješavanje OPF problema može biti računalno zahtjevno. Kako bi se povećala učinkovitost, problem se relaksira primjenom programiranja konusa drugog reda (engl. *Second-order cone programming* – SOCP) [12].

S obzirom na to da je naglasak ovog rada na dinamičkom modelu i upravljačkom sustavu baterijskog spremnika, optimizacijski model opisan je sažeto. Lokacija i veličina baterijskog spremnika, određeni optimizacijskim modelom, koriste se u nastavku za definiranje dinamičkih ograničenja baterijskog sustava. Optimizacijski model napisan je u programskom jeziku Python, uz primjenu Gurobi solver za rješavanje optimizacije.

2.2 Dinamičko modeliranje baterije i upravljačkog sustava

Ovo poglavlje donosi dinamičko modeliranje promatranih mikromreža s naglaskom na upravljački sustav baterijskog spremnika energije. Za potrebe dinamičkog modeliranja korišteno je okruženje programskog alata DigSILENT PowerFactory 2022. Budući da je prilikom integracije baterijskog spremnika potrebno osigurati pružanje pomoćnih usluga, kao i dinamički stabilan prijelaz i rad u otočnom pogonu, u upravljački sustav pretvarača implementirana je topologija virtualnog sinkronog stroja (engl. *Virtual Synchronous Machine* – VSM). VSM predstavlja mrežno-uspostavljajući (engl. *grid-forming*) pretvarač čija je tehnologija dizajnirana za oponašanje karakteristika sinkronog generatora, uključujući inercijski odziv, efekt prigušivanja i regulaciju radne snage i frekvencije (P/f). Također, VSM omogućuje postavljanje referenci za frekvenciju i napon, čime se osigurava stabilan samostalan rad u otočnom pogonu. Shema upravljanja pretvarača baterijskog spremnika prikazana je na slici 3, a temelji se na pristupu prikazanom u [13].



Slika 3. Dinamički model baterijskog spremnika energije i upravljački sustav pretvarača

Baterijska ćelija modelirana je električnim krugom konstantnog unutarnjeg otpora $R_{i,cell}$ i naponskog izvora s naponom ćelije U_{cell} ovisnim o stanju napunjenosti (engl. *State of Charge* - SOC) kako je dano jednadžbom (2), gdje U_{max} i U_{min} predstavljaju maksimalni i minimalni dopušteni napon ćelije, a I_{cell} je struja jedne baterijske ćelije [14]. Maksimalni napon U_{max} odgovara naponu potpuno opterećene ćelije, dok U_{min} odgovara naponu ispražnjene baterijske ćelije.

$$U_{cell} = U_{max} \cdot SOC + U_{min} \cdot (1 - SOC) - I_{cell} \cdot R_{i,cell} \quad (2)$$

Budući da se baterijske ćelije slažu u serijske i paralelne spojeve kako bi se ostvarili željeni napon i kapacitet baterijskog sustava, struja jedne ćelije računa se prema izrazu (3), gdje I predstavlja izlaznu struju baterijskog sustava, a N_p broj paralelno spojenih baterijskih ćelija. Slično, izlazni napon baterijskog sustava V_{term} rezultat je napona ćelije i broja serijski spojenih baterijskih ćelija N_s , kao što je dano izrazom (4).

$$I_{cell} = \frac{I}{N_p} \quad (3)$$

$$V_{term} = U_{cell} \cdot N_s \quad (4)$$

Promjena stanja napunjenosti baterije SOC izračunava se na temelju protoka struje kroz baterijsku ćeliju tijekom vremena prema jednadžbi (5), gdje C_{cell} označava nazivni kapacitet baterijske ćelije u Ah.

$$SOC = -\frac{1}{3600C_{cell}} \int_{t_0}^t I_{cell}(\tau) d\tau \quad (5)$$

Opisanom modelu baterije potrebna je samo struja I kao ulazni signal, dok su napon V_{term} i SOC izlazni signali. Struja baterijskog sustava funkcija je mjerene radne snage u MW i napona DC veze U_{DC} (6). Nadalje, jednadžba (7) opisuje kako se napon DC veze dinamički mijenja tijekom vremena u ovisnosti o razlici terminalnog napona baterije V_{term} i trenutnog napona na DC kondenzatoru U_{DC} . Vremenska konstanta T , ovisna o kapacitetu i karakteristikama kruga, kontrolira brzinu prilagodbe U_{DC} prema V_{term} .

$$I = \frac{P \cdot 10^3}{U_{DC}} \quad (6)$$

$$\frac{dU_{DC}}{dt} = \frac{V_{term} - U_{DC}}{T} \quad (7)$$

Budući da je upravljanje i ponašanje pretvaračkih sustava teško obuhvatiti fazorskim prikazom, koriste se dq transformacije koje transformiraju mjerene napone i struje iz globalnog referentnog okvira u dq sinkroni referentni okvir. Modeliranjem upravljačkog sustava u dq referentnom okviru mapiraju se simetrični trofazni izmjenični signali u istosmjerne i konstantne na način prikazanim izrazom (8), što znatno olakšava upravljanje. Varijable $v_{r,o}$ i $v_{i,o}$ označavaju realnu i imaginarnu komponentu napona mjerenog na mjestu priključka (MP). d - i q -komponente izmjerenih napona ($v_{dq,o}$) i struja određene su primjenom rotacije definirane izrazom $e^{-j\delta\theta_{VSM}}$, gdje $\delta\theta_{VSM}$ predstavlja kutni pomak između globalnog referentnog okvira mreže i referentnog okvira VSM-a.

$$v_{dq,o} = (v_{r,o} + jv_{i,o}) \cdot e^{-j\delta\theta_{VSM}} \quad (8)$$

U bloku regulacije radne snage implementirana je strategija VSM-a kako bi se baterijskom spremniku energije omogućilo pružanje brzog frekvencijskog odziva. Njegova implementacija temelji se na jednadžbi njihanja koja je linearizirana s obzirom na kutnu brzinu kako je prikazano jednadžbom (9). Ovaj pristup omogućuje oponašanje statičkih i dinamičkih karakteristika sinkronog generatora, kao što su inercijski odziv, efekt prigušivanja te P/f regulacija. Kutna brzina VSM-a označena je kao ω_{VSM} , dok je T_a virtualna mehanička vremenska konstanta koja je ekvivalentna $2H$ tradicionalnih sinkronih strojeva. Referentna snaga označena je kao p^* , dok p predstavlja mjerenu snagu koju pretvarač razmjenjuje s mrežom na mjestu priključka. Efekt prigušivanja ostvaren je koeficijentom prigušivanja k_d te razlikom frekvencije VSM-a i frekvencije mreže ω_{PLL} određene pomoću fazno zaključane petlje (engl. *Phase Locked Loop* - PLL). Pored toga, usporedbom frekvencije VSM-a s referentnom vrijednošću ω_{VSM}^* i primjenom konstante statičnosti k_ω omogućuje se P/f regulacija.

$$\frac{d\omega_{VSM}}{dt} = \frac{1}{T_a} (p^* - p - k_d(\omega_{VSM} - \omega_{PLL}) - k_\omega(\omega_{VSM} - \omega_{VSM}^*)) \quad (9)$$

Odgovarajući fazni kut $\delta\theta_{VSM}$ određen je izrazom (10), gdje je ω_b nazivna kutna brzina, a $\delta\omega_{VSM}$ predstavlja razliku između frekvencije VSM-a i frekvencije referentnog stroja, koja definira brzinu globalnog referentnog okvira. Ovako određeni fazni kut predstavlja kutni pomak između referentnog okvira upravljačkog sustava pretvarača (VSM-a) i globalnog referentnog okvira mreže.

$$\frac{d\delta\theta_{VSM}}{dt} = \delta\omega_{VSM} \cdot \omega_b \quad (10)$$

Regulacija jalove snage ostvarena je jednadžbom (11), gdje faktor nagiba za jalovu snagu k_q određuje promjenu amplitude izlaznog referentnog napona v^{**} u odnosu na vanjsku zadanu vrijednost v^* , ovisno o odstupanju izlazne jalove snage $\hat{q}$ od njene referentne vrijednosti q^* . Prije korištenja kao ulazni signal u regulatoru jalove snage, mjerena izlazna jalova snaga pretvarača q prolazi kroz niskopropusni filter s graničnom frekvencijom ω_f , kako je definirano izrazom (12).

$$v^{**} = v^* + k_q(q^* - \hat{q}) \quad (11)$$

$$\frac{d\hat{q}}{dt} = -\omega_f \cdot \hat{q} + \omega_f \cdot q \quad (12)$$

Nadalje, referentna amplituda napona prolazi kroz blok virtualne impedancije prije nego što se koristi kao ulazni signal za kaskadnu regulaciju napona i struje. Virtualna impedancija ima ekvivalentan utjecaj na fazni kut VSM-a kao što sinkrona impedancija ima na napon sinkronog generatora. Izlazni signali ovog bloka su dq komponente referentnog napona, dane izrazima (13) i (14):

$$v_{d,o}^* = v^{**} - r_v \cdot i_{d,o} + \omega_{VSM} \cdot l_v \cdot i_{q,o} \quad (13)$$

$$v_{q,o}^* = 0 - r_v \cdot i_{q,o} - \omega_{VSM} \cdot l_v \cdot i_{d,o} \quad (14)$$

gdje su r_v i l_v virtualni otpor i induktivitet. Virtualna impedancija određuje osjetljivost ovako upravljanog sustava na promjene uvjeta u mreži. Niže vrijednosti virtualne impedancije povećavaju osjetljivost sustava. Blok virtualne impedancije ključan je u elektroenergetskim mrežama u kojima su otpori i induktiviteti istog reda veličine (npr. srednjenaponske i niskonaponske mreže) kako bi se postigla razdvojena regulacija radne i jalove snage.

Zatim, referentni naponski signal je ulazni signal kaskadnoj petlji naponskog i strujnog regulatora. Naponski regulator generira referentne strujne signale za unutarnji strujni regulator. d - i q -komponente napona, mjenog na mjestu priključka, uspoređuju se s njihovim referentnim vrijednostima, nakon čega se obrađuju pomoću PI regulatora koji proizvode referentne vrijednosti struje $i_{dq,o}^*$, kao što je opisano izrazima (15) i (16). d -komponenta referentnog strujnog signala mora se kontrolirati s obzirom na stanje napunjenosti baterije (SOC), budući da radna snaga ima prioritet. Blok kontrole punjenja kontinuirano provjerava jesu li struja i SOC unutar zadanih granica. Ako SOC padne ispod minimalne zadane vrijednosti, pražnjenje baterije se automatski onemogućuje. Slično tome, kada SOC dostigne svoju maksimalnu dopuštenu vrijednost, proces punjenja se zaustavlja.

$$i_{dq,o}^* = k_{pv}(v_{dq,o}^* - v_{dq,o}) + k_{iv}\epsilon + k_{ffi} \cdot i_{dq,o} \quad (15)$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = v_{dq,o}^* - v_{dq,o} \quad (16)$$

Nadalje, unutarnja strujna petlja generira referentni naponski signal pretvarača $v_{dq,CV}$ s obzirom na razliku mjerene izlazne struje pretvarača $i_{dq,o}$ i njene referentne vrijednosti $i_{dq,o}^*$, što je dato izrazima (17) i (18). Dodatno, mjereni napon na mjestu priključenja filtrira se u bloku aktivnog prigušivanja prije upotrebe u strujnom regulatoru kako je dato izrazima (19) i (20). Navedeni blok zadužen je za uklanjanje oscilacija na mjenom naponu.

$$v_{dq,CV} = k_{pc}(i_{dq,o}^* - i_{dq,o}) + k_{ic}\gamma + k_{ffv} \cdot v_{dq,o} - v_{dq,AD}^* \quad (17)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = i_{dq,o}^* - i_{dq,o} \quad (18)$$

$$\frac{d\emptyset}{dt} = -\emptyset \cdot \omega_{AD} + v_o \cdot \omega_{AD} \quad (19)$$

$$v_{dq,AD}^* = k_{AD}(v_o - \emptyset) \quad (20)$$

Prije upravljanja pretvaračem generiranim naponskim signalima, oni se moraju vratiti u globalni referentni okvir mreže koristeći suprotnu rotaciju, odnosno $e^{j\delta\theta_{VSM}}$.

Za ovako modeliran baterijski sustav, dinamičke simulacije izvedene su za evaluaciju izvedivosti prijelaza u otočni pogon u okviru svih promatranih mikromreža.

3. DINAMIČKE SIMULACIJE I REZULTATI

Optimizacijskim modelom, opisanim u odjeljku 2.1, određene su optimalne dimenzije baterijskog spremnika za svaku promatranu mikromrežu, što je prikazano u Tablici I. Kao optimalna lokacija baterijskog spremnika za sve mikromreže odabrano je čvorište označeno kao MP na slici 1, koje predstavlja sjecište triju promatranih distribucijskih vodova. Smještaj baterijskog spremnika na toj lokaciji omogućuje podršku za otočni pogon svih triju distribucijskih izvoda, kao i poboljšanje stabilnosti napona i smanjenje gubitaka.

Tablica I. Rezultati optimizacijskog modela

Mikromreža	Radna snaga [MW]	Nazivna snaga [MVA]	Kapacitet [MWh]
1.	0.629	0.663	2.456
2.	0.931	0.980	3.588
3.	0.203	0.228	0.786
4.	1.754	1.846	6.893

Na temelju opisanog dinamičkog modela iz odjeljka 2.2, simuliran je prijelaz svih promatranih mikromreža iz paralelnog pogona u otočni pogon u programskom okruženju DlgSILENT PowerFactory. Prijelaz u otočni pogon izvršen je u trenutku $t = 4$ s, pri čemu se analiziralo može li svaka mikromreža postići stabilan rad u otočnom pogonu za dvije kritične radne točke: maksimalno i minimalno opterećenje mikromreže. Ove radne točke odabrane su jer predstavljaju najizazovnije uvjete za ocjenu dinamičke stabilnosti sustava. Za svaku mikromrežu i obje radne točke analiziran je prijelaz u otočni pogon za sljedeća tri scenarija:

- I. Baterija se ne puni niti prazni prije prijelaza u otočni pogon,
- II. Baterija se puni maksimalnom snagom prije prijelaza u otočni pogon,
- III. Baterija se prazni maksimalnom snagom prije prijelaza u otočni pogon.

Važno je istaknuti da su prije prijelaza u otočni pogon 1. i 3. mikromreža napajane iz trafostanice TS 1 (slika 1), dok je 2. mikromreža napajana iz trafostanice TS 2. Što se tiče 4. mikromreže, baterijski spremnik je prije prijelaza u otočni pogon bio spojen na izvod označen crvenom bojom na slici 1. Tijekom prijelaza u otočni pogon u trenutku $t = 4$ s, plavi i zeleni izvodi se priključuju na čvorište MP, uzimajući u obzir vremensko kašnjenje zaštitnih releja i strujnih prekidača (45–70 ms). Za potrebe simulacije pretpostavljeno je ukupno vremensko kašnjenje od 150 ms, u skladu s inženjerskom praksom.

Stabilnost prijelaza u otočni pogon ocijenjena je na temelju sljedećih kriterija:

- Postizanje stacionarnog stanja nakon prijelaza,
- Naponi svih čvorišta unutar granica $\pm 10\%$ od nazivne vrijednosti,
- Maksimalno odstupanje frekvencije unutar ± 2 Hz u prvim sekundama nakon poremećaja te unutar ± 1 Hz u stacionarnom stanju.

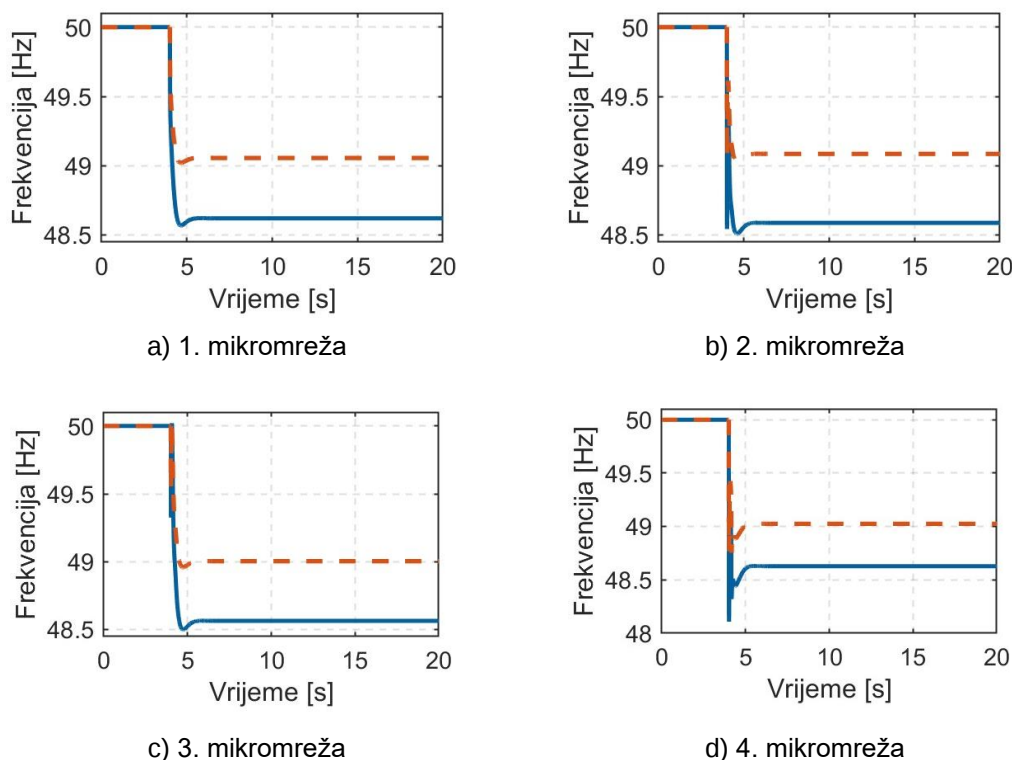
Simulacijski rezultati prikazani su grafički kroz promjene frekvencije i napona na mjestu priključka baterijskog spremnika (MP). Naglasak je stavljen na slučajeve u kojima stabilan prijelaz nije postignut.

Rezultati dinamičkih simulacija sažeti su u Tablici II. Analiza pokazuje da je najizazovniji scenarij prijelaza u otočni pogon onaj u kojem se baterijski spremnik energije puni maksimalnom snagom, uz istovremeno maksimalno opterećenje mikromreža. S druge strane, za radnu točku minimalnog opterećenja mikromreža prijelaz u otočni pogon bio je uspješan u svim analiziranim slučajevima stanja baterijskog spremnika.

Tablica II Ograničenja definirana na temelju dinamičke analize

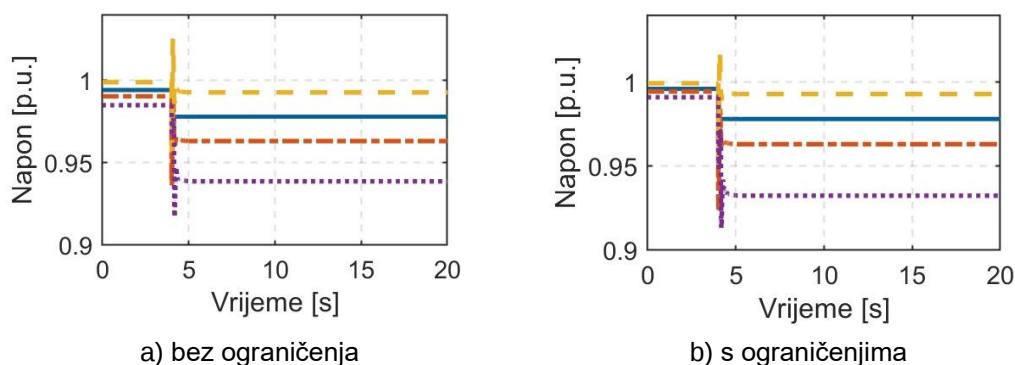
	Baterija se ne puni niti prazni	Baterija se puni max. snagom	Baterija se prazni max. snagom
1. mikromreža	Nema ograničenja	Ograničenje max. snage punjenja na 0.255 MW	Nema ograničenja
2. mikromreža	Nema ograničenja	Ograničenje max. snage punjenja na 0.3 MW	Nema ograničenja
3. mikromreža	Nema ograničenja	Ograničenje max. snage punjenja na 0.0725 MW	Nema ograničenja
4. mikromreža	Nema ograničenja	Ograničenje max. snage punjenja na 0.825 MW	Nema ograničenja

Slika 4 prikazuje frekvencijski odziv sustava za scenarij maksimalnog punjenja baterijskog spremnika u kombinaciji s maksimalnim opterećenjem mikromreža. U takvom slučaju, frekvencija nakon prijelaza u otočni pogon nije dosegla prihvatljivo ustaljeno stanje unutar raspona ± 1 Hz od nazivne vrijednosti. Kako bi se osigurao stabilan i siguran prijelaz u otočni pogon, uvedena su ograničenja na maksimalnu snagu punjenja baterijskog spremnika, kao što je prikazano u Tablici II. Ta ograničenja, definirana dinamičkom analizom, integrirana su u početni optimizacijski model kako bi se minimalizirali operativni troškovi uz istovremeno zadovoljenje zahtjeva dinamičke stabilnosti.



Slika 4. Frekvencija u slučaju II [plava puna linija – bez ograničenja; narančasta isprekidana linija – s ograničenjima]

Slika 5 prikazuje profil napona na mjestu priključka baterijskog spremnika. Rezultati ukazuju da je napon, kako bez uvođenja dinamičkih ograničenja tako i s uključenim dinamičkim ograničenjima, ostao unutar dozvoljenih granica.



Slika 5. Napon čvorišta MP za slučaj II [plava puna linija – 1. mikromreža; narančasta točkasto-puna linija – 2. mikromreža, žuta isprekidana linija – 3. mikromreža; ljubičasta točkasta linija – 4. mikromreža]

Nadalje, u suradnji s operatorom distribucijskog sustava, 4. mikromreža identificirana je kao optimalna lokacija za integraciju baterijskog spremnika energije unutar distribucijske mreže grada Zagreba. Ovo rješenje omogućuje korištenje baterije za otočni pogon sve tri promatrane mikromreže, pri čemu je potrebno osigurati adekvatnu komunikaciju između svih distribucijskih izvoda. Osim tehničkih prednosti, instalacija

jednog baterijskog sustava na ovoj lokaciji često je i financijski isplativija u usporedbi s postavljanjem više manjih baterijskih sustava na različitim lokacijama.

4. ZAKLJUČAK

Dva potresa koji su zahvatili grad Zagreb i okolna područja ukazali su na nesigurnost u opskrbi zdravstvenih ustanova električnom energijom koje su u tom periodu bile preopterećene radi pandemije Covid-19. Zbog toga se javlja motivacija za primjenu baterijskog sustava energije u blizini zdravstvenih ustanova koji će im moći pružiti uslugu otočnog pogona tijekom kvarova u distribucijskoj mreži. U ovom radu predstavljen je okvir određivanja veličine baterijskog spremnika energije koji je sposoban osigurati stabilan prijelaz i rad u otočnom pogonu zadovoljavajući sva tehnička ograničenja sustava. Veličina i lokacija baterije određuju se optimizacijskim modelom s ciljem minimizacije ukupnih troškova. Zatim se razvijaju dinamički model baterije i njegovog upravljačkog sustava koji se temelji na strategiji virtualnog sinkronog stroja kako bi se osiguralo pružanje pomoćnih usluga tijekom prijelaza i rada u otočnom pogonu. Nakon toga provode se dinamičke simulacije za određivanje dinamičkih ograničenja ukoliko prijelaz u otočni pogon nije izvediv. Rezultati pokazuju da je prijelaz u otočni pogon najizazovniji u slučaju kad se baterijski spremnik puni maksimalnom radnom snagom prije prijelaza u otočni pogon, a opterećenje promatranog sustava je maksimalno.

5. LITERATURA

- [1] Younesi, A., Shayeghi, H., Wang, Z., Siano, P., Mehrizi-Sani, A., & Safari, A., »Trends in modern power systems resilience: State-of-the-art review.,« *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p. 112397, 162 (2022).
- [2] Panteli, M., Pickering, C., Wilkinson, S., Dawson, R., & Mancarella, P., »Power system resilience to extreme weather: Fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures,« *IEEE Transactions on Power Systems*, pp. 3747-3757, 2016.
- [3] Panteli, M., Trakas, D. N., Mancarella, P., & Hatziaargyriou, N. D., »Power systems resilience assessment: Hardening and smart operational enhancement strategies,« *Proceedings of the IEEE*, pp. 1202-1213, 2017.
- [4] Bowen, T., Chernyakhovskiy, I., & Denholm, P. L., »Grid-scale battery storage: frequently asked questions,« Golden, CO (United States), 2019.
- [5] Zhang, B., Dehghanian, P., & Kezunovic, M., »Optimal allocation of PV generation and battery storage for enhanced resilience,« *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 535-545, 2017.
- [6] Gilasi, Y., Hosseini, S. H., & Ranjbar, H., »Resilience-oriented planning and management of battery storage systems in distribution networks,« *IET Renewable Power Generation*, pp. 2575-2591, 2023.
- [7] Kim, J., & Dvorkin, Y., »Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids,« *IEEE Transactions on Smart Grid*, pp. 4996-5006, 2018.
- [8] Wang, Y., Rousis, A. O., & Strbac, G., »Resilience-driven optimal sizing and pre-positioning of mobile energy storage systems in decentralized networked microgrids,« *Applied Energy*, p. 117921, 2022.
- [9] Rajabzadeh, M., & Kalantar, M., »Enhance the resilience of distribution system against direct and indirect effects of extreme winds using battery energy storage systems,« *Sustainable Cities and Society*, p. 103486, 2022.
- [10] Oraibi, W. A., Mohammadi-Ivatloo, B., Hosseini, S. H., & Abapour, M., »A resilience-oriented optimal planning of energy storage systems in high renewable energy penetrated systems,« *Journal of Energy Storage*, p. 107500, 2023.
- [11] Chen, L., Jiang, Y., Zheng, S., Deng, X., Chen, H., & Islam, M. R., »A two-layer optimal configuration approach of energy storage systems for resilience enhancement of active distribution networks,« *Applied Energy*, p. 121720, 2023.

- [12] Venkatasubramanian, B. V., Lotfi, M., Panteli, M., Javadi, M. S., & Carvalho, L. M., »Scalability analysis of convex relaxation methods for branch flow ac optimal power flow,« u *In 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2022 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, 2022.
- [13] Barać, B., Krpan, M., Capuder, T., & Kuzle, I., »Modeling and initialization of a virtual synchronous machine for power system fundamental frequency simulations,« *IEEE access*, pp. 160116-160134, 2021.
- [14] Nuhic, M., & Yang, G., »Battery energy storage system modelling in DIgSILENT PowerFactory,« *Modelling and Simulation of Power Electronic Converter Dominated Power Systems in PowerFactory*, pp. 177-200, 2021.