HRVATSKI OGRANAK MEĐUNARODNE ELEKTRODISTRIBUCIJSKE KONFERENCIJE - HO CIRED

9. (15.) savjetovanje Šibenik, 25. - 27. svibnja 2025.





Matija Kostelac Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva matija.kostelac@fer.hr Tomislav Capuder Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva tomislav.capuder@fer.hr

Joško Grašo Elektra Zagreb HEP ODS d.o.o. josko.graso@hep.hr Bojana Barać Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva <u>bojana.barac@fer.hr</u>

Anton Marušić Elektra Zagreb HEP ODS d.o.o. anton.marusic@hep.hr

Bernarda Ostojić Elektra Zagreb HEP ODS d.o.o. <u>bernarda.ostojic@hep.hr</u>

OPTIMIZACIJA BATERIJSKOG SUSTAVA ZA N-K SIGURNOST OPSKRBE BITNIH POTROŠAČA SPOJENIH NA SREDNJONAPONSKU DISTRIBUCIJSKU MREŽU GRADA ZAGREBA

SAŽETAK

Baterijski sustavi su se pokazali vrlo bitnima u razvoju budućih naprednih mreža. U ovom radu proučavat će se korištenje baterijskog sustava kako bi se osiguralo neprekidno napajanje bitnih potrošača spojenih na srednjonaponsku distribucijsku mrežu u slučaju poremećaja. Kroz rad se obavlja analiza mreže u kojem se nalaze bitni potrošači te se kroz optimizacijski model određuje lokacija i veličina baterijskog spremnika kako bi se održala neprekidnost napajanja u minimalnom trajanju od 3 sata. Također će se promatrati rad baterije tijekom normalnog pogona u svrhu smanjenja gubitaka.

Ključne riječi: distribucijska mreža, baterijski spremnik, optimizacija, N-k analiza

OPTIMIZATION OF BATTERY STORAGE SYSTEM FOR N-K SECURITY OF SUPPLY FOR ESSENTIAL CONSUMERS IN ZAGREB DISTRIBUTION GRID

SUMMARY

Battery storage systems have proven to be very important in the development of future advanced networks. This paper will study the use of a battery system to ensure uninterrupted power supply to critical consumers connected to the medium-voltage distribution network in the event of a disturbance. The paper analyzes the network in which critical consumers are located and determines the location and size of the battery storage system through an optimization model in order to maintain uninterrupted power supply for a minimum of 3 hours. The battery operation will also be observed during normal operation in order to reduce losses.

Keywords: distribution system, battery storage, optimisation, N-k analysis

1. UVOD

Sigurnost napajanja je jako bitan faktor u planiranju i vođenju elektroenergetskog sustava. Jedna od temeljnih analiza je N-1 koja kaže da u slučaju kada jedan element elektroenergetsko sustava ispadne iz operacije svi ostali elementi ostaju nastavljaju funkcionirati. U ekstremnim situacijama (potres, vremenske nepogode...) može se dogoditi da veći dio sustava ostane bez napajanja. Posljedice kada bitni potrošači kao što su bolnice, ostanu bez napajanja mogu biti katastrofalne. U ovom radu će se analizirati kako se s baterijskim sustavom može pružiti sigurnost napajanja bitnim potrošačima u distribucijskog mreži. Odredit će se optimalne dimenzije baterije tako da se može pružiti autonomija od minimalno 3 sata bitnim potrošačima. Također će se prikazati korist baterije kada radi paralelno s ostatkom mreže.

U literaturi se baterijski sustavi obično koriste za tržišnu arbitražu kojom se maksimizira profit kupnjom i prodajom električne energije na tržištu [1]. Također se često koriste za uravnoteženje proizvodnje obnovljivih izvora energije, čime se smanjuje rizik od njihove isprekidane proizvodnje [2]. Osim toga, baterija se može koristiti za uravnoteženje potrošnje električne energije na mjestu priključka za krajnje korisnike kako bi se izbjegli penali od odstupanja potrošnje [3]. Zbog velike brzine odziva baterijski sustavi se mogu koristiti za regulaciju frekvencije [4], upravljanja zagušenjima vodova [5] i regulacije napona [6]. Ovaj rad koristi nekoliko od spomenutih aspekata kao što su upravljanje frekvencijom i naponom, te pruža autonomiju za bitne potrošače u tom dijelu mreže.

2. METODOLOGIJA

U ovom poglavlju će se objasniti optimizacijski matematički model koji se koristi za proračune. Optimizacijski model spada u kategoriju kvadratnih optimizacijskih modela.

2.1. Model određivanja parametara baterije

Cilj prvog modela je odrediti optimalne parametre baterijskog sustava kao što su snaga baterijskog sustava, količinu energije koja se može spremiti u baterijski sustav i optimalnu lokaciju baterijskog sustava. Za proračun optimalnih tokova snaga u mreži se koristi DistFlow model s obzirom na to da je on pogodan za rješavanje radijalnih distribucijskih mreža [7]. Na slici 1 prikazan je koncept ovog modela s svim pripadajućim varijablama. Sva čvorišta u mreži su označena s "N", dok su vodiči označeni s "L". Prema slici tok radne i jalove snage kroz vodič $ik \in L$ označeni su s " P_{ik} " i " Q_{ik} ", a injekcija radne i jalove snage u čvorištu s " P_k " i " Q_k ". Iznos struje kroz vodič označen je s " I_{ik} ", a napon u čvorištu s " V_k ". Impedancija voda je označena s " $R_{ik} + jX_{ik}$ ".

Slika 1. Koncept i varijable DistFlow modela

Problem optimalnih tokova snaga modeliran je korištenjem metoda semidefinitnog programiranja (Engl. Semidefinite programming) te je potom relaksiran koristeći stožac drugog stupnja (Engl. Second-order cone programming). DistFlow model uzima u obzir kvadratne vrijednosti Ohmovog zakona, prikazano u jednadžbom (1). Nakon raspisivanja kvadrata dobije se jednadžba (2). Struja kroz vod se računa jednadžbom (3). Nakon toga se uvode nove varijable koje će zamijeniti kvadratne varijable struje i napona prema jednadžbi (4). Ovom supstitucijom jednadžba (2) postaje jednadžba (5), a jednadžba (3) u jednadžbu (6). Tokovi radne i jalove snage na vodu definirani su jednadžbama (7) i (8). Injekcije jalove i radne snage u čvorištu ($P_{k,t}$) i ($Q_{k,t}$) modelirani su s jednadžbama (9) i (10). Gdje ($Pg_{k,t}$) i ($Qg_{k,t}$) modeliraju proizvodnju generatora u čvorištu, a ($Pd_{k,t}$) i ($Qd_{k,t}$) predstavljaju potrošnju električne energije u čvorišta. Termička ograničenja voda se modeliraju s nejednadžbom (11). Kako bi napon ostao u zadovoljenim granicama

koristi se ograničenje (12). Napomena: minimalna i maksimalna vrijednost napona su kvadrirane jer $v_{k,t}$ predstavlja kvadratnu vrijednost napona.

$$U_{k,t}^{2} = \left| U_{k,t} \right|^{2} = \left| U_{i,t} - I_{ik,t} Z_{ik} \right|^{2}$$
(1)

$$|U_{k,t}|^{2} = |U_{i,t}|^{2} - 2 \cdot (R_{ik} \cdot P_{ik,t} + X_{ik} \cdot Q_{ik,t}) + |I_{ik,t}|^{2} \cdot (R_{ik}^{2} + X_{ik}^{2})$$
(2)

$$\left|I_{ik,t}\right|^{2} = \frac{\left|S_{ik,t}\right|^{2}}{\left|U_{i,t}\right|^{2}}$$
(3)

$$v_{k,t} = |U_{k,t}|^2, l_{ik,t} = |I_{ik,t}|^2$$
 (4)

$$v_{k,t} = v_{i,t} - 2 \cdot \left(R_{ik} \cdot P_{ik,t} + X_{ik} \cdot Q_{ik,t} \right) + l_{ik,t} \cdot \left(R_{ik}^2 + X_{ik}^2 \right)$$
(5)

$$l_{ik,t} \cdot v_{i,t} = P_{ik,t}^2 + Q_{ik,t}^2$$
(6)

$$P_{ik,t} = R_{ik} \, i_{ik,t} - P_{k,t} + \sum_{km \in L, m \neq i} P_{km,t}$$
(7)

$$Q_{ik,t} = X_{ik} \, i_{ik,t} - Q_{k,t} + \sum_{km \in L, m \neq i} Q_{km,t}$$
(8)

$$P_{i,t} = \sum_{k \in G_i} Pg_{k,t} - \sum_{l \in D_i} Pd_{k,t}$$
(9)

$$Q_{i,t} = \sum_{k \in G_i} Qg_{k,t} - \sum_{l \in D_i} Qd_{k,t}$$
(10)

$$P_{ik,t}^2 + Q_{ik,t}^2 \le (S_{ik}^{max})^2$$
(11)

$$\left(U_k^{\min}\right)^2 \le v_{k,t} \le (U_k^{\max})^2 \tag{12}$$

Problem optimalnih tokova snage rješava se zapisivanjem problema metodama semidefinitnog programiranja (engl. Semidefinite programming - SDP). Nakon toga model se relaksira pomoću programiranja konusa drugog reda (engl. Second-order cone programming - SOCP). Prednost SOCP-a je u brzini rješavanja optimizacijskog problema. Može se pokazati da za radijalne distribucijske mreže SDP relaksacija i SOCP relaksacija daju ekvivalentne skupove rješenja, dok za prijenosne uzamčene mreže to ne vrijedi. Rješavanje OPF-a uz pomoć konveksne relaksacije nudi nekoliko prednosti. Pruža mogućnost provjere je li rješenje globalni optimum te ako nije, pruža donju granicu minimalnih troškova, a time i udaljenost bilo kojeg drugog izvedivog rješenja od onog optimalnog. Također, neizvedivost relaksiranog problema ukazuje na to da je i početni problem neizvediv. Primjenom SOCP relaksacije jednadžba (6) prelazi u jednadžbu (13).

$$l_{ik,t} \cdot v_{i,t} \ge P_{ik,t}^2 + Q_{ik,t}^2$$
(13)

Funkcija cilja u ovom slučaju je minimizacija gubitaka na vodovima i zapisuje se uz pomoć jednadžbe (14), gdje gdje (C_{gub}) predstavlja penale, odnosno cijenu za nastale gubitke.

$$min\sum_{t}\sum_{ik\in L}R_{ik}\cdot l_{ik,t}\cdot c_{gub}$$
(14)

Baterijski spremnik definiran je vrijednošću kapaciteta u svakom vremenskom trenutku. Kapacitet baterijskog spremnika mora biti unutar definirane minimalne i maksimalne vrijednosti prikazano s jednadžbom (15), gdje je (SOCt) stanje napunjenosti baterije u trenutku t. Snaga punjenja Pcht) i pražnjenja (Pdscht) baterije mora biti u okvirima karakteristike baterije, njezinoj nazivnoj radnoj snazi, što je prikazano u jednadžbama (16) i (17). Binarna varijabla (xcht) indikator je punjenja baterije koja poprima vrijednost 1 kada se baterija puni, a vrijednost 0 kada se prazni ili ne radi. Isto vrijedi i za binarnu varijablu (xdscht) koja je indikator pražnjenja baterije. Baterija se ne može u isto vrijeme i puniti i prazniti pa u svakom trenutku mora vrijediti jednadžba (18). Kapacitet baterijskog spremnika u određenom vremenskom trenutku t računa se kao zbroj napunjenosti u prošlom trenutku zbrojeno/oduzeto s količinom nepunjenje/ispražnjene energije u tom vremenskom periodu. Jednadžba je prikazan s (19), gdje su (η _{ch}) i (η _{dsch}) koeficijenti učinkovitosti punjenja i pražnjenja baterije, a (au) trajanje vremenskog trenutka u satima. Jalova snaga baterije, odnosno učinske elektronike u pozadini baterije, modelirana je na sličan način kao i radna snaga preko jednadžbi (20)-(21), gdje (Qbat,max) predstavlja nazivnu jalovu snagu, a binarne varijable (ycht) i (ydscht) indikatori su smjera jalove snage. Jednadžba (22) ograničava da jalova snaga može biti samo u jednom smjeru. U svakom vremenskom trenutku mora vrijediti jednadžba (23), gdje je (Sbat,max) nazivna prividna snaga baterije. Baterija se integrira u model tokova snaga tako da se snaga punjenja i pražnjenja dodaju u jednadžbe (7) i (8), ako se u tom čvorištu nalazi baterija. Jednadžbe za ta čvorišta prikazane su s (24) i (25). Parametar (X_{bat}) je ulazni podatak koji govori u kojem čvorištu se nalazi baterija. S obzirom na to da se u modelu radi dimenzioniranje baterijskog spremnika, (Sbat,max), (Pbat,max), (Qbat,max) i (Cbat) se smatraju varijablama odluke. Nadalje u funkciju cilja se dodaju troškovi investicije baterijskog spremnika, prikazano u jednadžbi (26), gdje je (C_1) cijenu po jedinici kapaciteta baterije, a (C_2) cijena po jedinici snage baterije. U slučaju kada se optimizira i optimalna lokacija baterije koriste se jednadžba (27). U tom slučaju parametar (X_{bat}) postaje binarna varijabla koja je definirana za svako čvorište mikromreže, ali samo u jednom čvorištu može poprimiti vrijednost 1. Na ovaj način odabrat će se upravo ono čvorište koje najviše doprinosi funkciji cilja, u ovom slučaju minimizaciji troškova sustava.

$$0 \le SOC_t \le C_{bat} \tag{15}$$

$$Pch_t \le P_{bat,max} \cdot xch_t \tag{16}$$

$$Pdsch_t \le P_{bat,max} \cdot xdsch_t$$
 (17)

$$xch_t + xdsch_t \le 1 \tag{18}$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \eta_{ch} Pch_t \cdot \tau - \frac{Pdsch_t}{n_{dsch}} \cdot \tau$$
⁽¹⁹⁾

$$Qch_t \le Q_{bat,max} \cdot ych_t \tag{20}$$

$$Qdsch_t \le Q_{bat,max} \cdot ydsch_t \tag{21}$$

$$ych_t + ydsch_t \le 1 \tag{22}$$

$$S_{bat,max}^2 \ge Pch_t^2 + Pdsch_t^2 + Qch_t^2 + Qdsch_t^2$$
(23)

$$P_{i,t} = \sum_{k \in G_i} Pg_{k,t} - \sum_{l \in D_i} Pd_{k,t} - Pch_t \cdot x_{bat,i} + Pdsch_t \cdot x_{bat,i}$$
(24)

$$Q_{i,t} = \sum_{k \in G_i} Qg_{k,t} - \sum_{l \in D_i} Qd_{k,t} - Qch_t \cdot x_{bat,i} + Qdsch_t \cdot x_{bat,i}$$
(25)

$$min\sum_{t}\sum_{ik\in L} R_{ik} \cdot l_{ik,t} \cdot c_{gub} + C_{bat} \cdot c_1 + S_{bat,max} \cdot c_2$$
$$\sum_{i\in N} x_{bat,i} = 1$$
(26)

2.2. Dinamički model

Dinamički model koristi se za provjeru izvedivosti prijelaza na otočni način rada koristeći samo baterijski spremnik [8]. Prilikom odspajanja od ostatka mreže potrebno je osigurati dinamički stabilan prijelaz i rad u otočnom pogonu, tj. održavanje napona i frekvencije u unaprijed definiranim tehničkim granicama. Ovo je modelirano i testirano s pomoću alata DIgSILENT PowerFactory 2019. Koristi se tehnologija Virtual Synchronous Machine (VSM) koja može pružiti virtualnu inerciju s postavljenom frekvencijom i referencom napona, omogućujući bateriji da prati ponašanje tradicionalnih sinkronih generatora. Blok modela baterije temelji se na dostupnom modelu u PowerFactoryju opisanom u [9], cijela formulacija se može pronaći u [10]. Stabilan prijelaz u otočni način rada MG postiže se ako napon sabirnice ne prelazi definirane granice od ±10% nazivnog napona. Odstupanje frekvencije ne može prijeći ±2 Hz u prvoj sekundi nakon odlaska u otočni pogon i mora ostati unutar granice od ±1 Hz nakon odlaska u otočni pogon. Parametri baterije preuzete su iz gore spomenutog modela. Razmatrat će se tri slučaja. U prvom slučaju snaga punjenja i pražnjenja baterije su 0, tj. baterija ne radi. U drugom i trećem slučaju, baterija se puni odnosno prazni maksimalnom snagom prije nego što dođe do ispadanja.

2.3. Model baterije u paralelnom radu sa mrežom

Ovaj model optimizira ponašanje baterije kada radi paralelno s ostatkom mreže u normalnom radu. Ovaj model je vrlo sličan modelu prikazanom u poglavlju: " Model određivanja parametara baterije ", izostavljajući neke varijable ili ih tretirajući kao parametre. Varijable baterije iz prvog modela, SoC_{max}, P_{max} i Q_{max}, tretiraju se kao ulazni parametri umjesto kao varijable odluke, također se čvorište u kojem se nalazi baterija definira kao ulazni parametar. Binarna varijabla x_k i njezina odgovarajuća ograničenja uklonjeni su iz ovog modela. Kao što je prije spomenuto, funkcija cilja je i dalje minimiziranje gubitaka u mreži.

3. PROMATRANI SCENARIJ I PARAMETRI MODEL

3.1. Osnovni parametri modela

Prvo, studija je provedena kako bi se utvrdilo u kojem dijelu zagrebačke distribucijske mreže bi bilo najbolje smjestiti baterijski sustav kako bi se njime obuhvatio što veći broj bitnih potrošača. U sklopu studije provodi se N-1 analiza za bitne potrošače sa zaključkom da je N-1 kriterij zadovoljen za sve bitne potrošače. Slika 2 prikazuje dio mreže odabrane za ovu studiju s označenim bitnim potrošačima. Ukupno, mreža sadrži osam čvorova s bitnim potrošačima u sebi i podijeljen je u tri različite mikromreže (MG), plavu, crvenu i zelenu kako je prikazano na slici. To je 10 kV distribucijska mreža napajana iz dvije različite aktivne mreže (čvorišta 11 i 19). Otpor i reaktancija voda ovisi o konkretnoj vrsti voda i kreću se u vrijednostima od 0,1-0,17 odnosno 0,1-0,13 ohma po kilometru. Toplinska granica vodova može biti oko 6,6-6,8 MVA ovisno o specifičnom tipu voda. Napon u čvorištu ne smije pasti ispod 90 % niti se podići iznad 110 % nazivnog napona. U normalnom radu MG-ovi su odvojeni od čvorišta 1 kako bi mreža bila radijalna (distribucijske mreže se uvijek vode radijalno). Sustav za pohranu baterija instaliran je u čvoru 1 u svim analizama osim u sjedećim analizama. U slučaju kada MG prijeđu u otočni način rada, odspojeni su od ostatka mreže i spojeni na čvor jedan. Imajte na umu da nam nije dopušteno otkrivati osjetljive detalje o točnoj lokaciji mreže i imenima bitnih potrošača.



Slika 2. Topologija promatrane mreže

3.2. Parametri modela za određivanje veličina baterije

Određivanje veličine baterije će se provesti za svaku mikromrežu zasebno i za slučaj sve tri mikromreže. Koristit će se osam karakterističnih dana, po dva za svako godišnje doba, koji predstavljaju radni dan i nedjelju. Mikromreže su odvojene od ostatka mreže i uzimaju se u obzir samo bitni potrošači. Svi ostali potrošači su odvojeni od mreže, tj. njihova potrošnja je 0. Za bitne potrošače koriste se stvarna mjerenja s obračunskog mjernog mjesta. Parametri baterijskog sustava određeni su tako da mogu osigurati 3 sata autonomije za svaku mikromrežu dok su odvojene od ostatka mreže. Optimizacija je podijeljena u vremenske korake od 15 minuta. Odabrani kapacitet baterije mora biti dovoljan da može osigurati barem 3 sata autonomije za mikromrežu u svakom trenutku. U modelu s kojem se određuje lokacija baterije će se analizirati samo četvrti slučaj mikromreže tj. slučaj kada se promatraju sve tri mikromreže zajedno.

3.3. Parametri modela u paralelnom radu

U ovom model se rad baterije optimizira paralelno s normalnim radom mreže. Analize se provode za svaku mikromrežu posebno i za slučaj kada su sve tri mikromreže spojene zajedno te se napajaju preko pojne točke 11 (slika 2). Osim bitnih potrošača ovdje su dodani i svi ostali potrošači koji se nalaze u mreži. Krivulje njihove potrošnje stvorene su korištenjem standardnih nadomjesnih krivulja opterećenja prikazanih na sl. 3 i skaliran na 30 % nazivne snage 10/0,4 kV transformatora u tom čvorištu. Parametri baterije za svaku analizu bit će optimalna veličina izračunata u tom slučaju iz prve optimizacije. Dodatno, kapacitet baterije mora održavati minimalno stanje napunjenosti (SoC) potrebno za prijelaz u otočni način rada i održavanje autonomiju od barem 3 sata u svakom koraku optimizacije.



Slika 3. Nadomjesne krivulje opterećenja

4. REZULTATI

4.1. Rezultati dimenzioniranja i optimalne lokacije baterijskog sustava

Analizom svih 8 karakterističnih dana odabiru se parametri koji pokrivaju sve slučajeve (najveća kapacitet i snaga). Rezultati analiza svih mikromreža prikazani su u tablici 1. Baterija iz crvenog MG ima najveće parametre naspram ostalih pojedinačnih mikromreža i stoga je dovoljna da zadovolji svaku mikromrežu pojedinačno. Kada se promatraju sve tri mikromreže zajedno baterijski spremnik očekivano ima najveći kapacitet. U optimizaciji gdje se optimizira lokacija baterije, parametri su ostali isti kao i kod slučaja sa sve 3 mikromreže. Čvorište 6 je odabran kao optimalna lokacija za bateriju jer je najbliže potrošnji. Iako je čvorište 6 optimalna lokacija za baterijski spremnik ne postoji značajna razlika naspram slučaja kada je baterija u čvorištu 1. S obzirom na to u daljnjim analizama baterijski spremnik će biti postavljen u čvorište 1 je također povoljnije zbog prostornih uvjeta, te je jednostavnije sa stajališta vođenja sustava. U svim analizama dimenzioniranja i optimalne lokacije baterijskog sustava naponi i struje su ostali unutar tehničkih ograničenja.

	Kapacitet (MWh)	Aktivna snaga (MW)	Reaktivna snaga (MVA)
Plava mikromreža	2,456	0,6297	0,663
Crvena mikromreža	3,588	0,931	0,98
Zelena mikromreža	0,786	0,203	0,228
Sve 3 mikromreže	6,893	1,754	1,846
Sve 3 mikromreže s optimiziranjem lokacije	6,893	1,753	1,846

Tablica 1. Rezultati dimenzioniranja i optimalne lokacije baterijskog sustava

4.2. Dinamička analiza

U ovoj analizi će se provjeriti dinamička stabilnost nakon prijelaza mreže u otočni pogon u 3 različita scenarija: baterija ne radi (snaga je 0), baterija se puni maksimalnom snagom, baterija se prazni maksimalnom snagom. Prijelaz na otočni način je stabilan za sve mikromreže u prvom i trećem scenariju. Što znači da su napon i frekvencija prilikom i nakon prijelaza unutar definiranih granica. U drugom slučaju kada se baterija puni maksimalnom snagom, frekvencijske granice su narušene za sve mikromreže. Kako bi se postigao stabilan prijelaz, baterijskom spremniku treba ograničiti snagu punjenja u normalnom radu. Za plavu mikromrežu snaga punjenja treba biti ograničena na 0,255 MW (41,5% od maksimalne snage), crvenu mikromrežu treba ograničiti na 0,3 MW (32,2 % od maksimalne snage), zelenu mikromrežu na 0,0725 MW (35,7 % od maksimalne snage) i slučaj od s sve tri mikromreže na 0,825 MW (47% od maksimalne snage). Kada bi se ova ograničenja primijenila na normalan rad baterije, to bi značilo da bateriji treba više vremena da se napuni do potrebnog kapaciteta. U tim slučajevima se možda neće moći osigurati autonomija, pa prema tome treba prilagoditi upravljanje i optimizaciju rada baterije.

4.3. Rezultati u paralelnom radu s mrežom

U ovoj analizi baterijski sustav se koristi paralelno s mrežom kako bi se smanjili gubici u mreži tj. vršno opterećenje. Također se u svakom trenutku mora održavati minimalno stanje napunjenosti kako bi mikromreža mogla prijeći u otočni način rada te ostati u otočnom pogonu barem 3 sata. Slike 4-7 prikazuju ukupne gubitke u mreži s i bez baterije. U svim promatranim scenarijima mikromreža baterija je uspjela smanjiti ukupne gubitke. U crvenoj mikromreži analiziran je rad baterije u čvor 1 i 6. Iako su rezultati uglavnom usporedivi, baterija u čvoru 6 ima malo lošije rezultate. To znači da iako je čvor 6 bio optimalan u slučaju dimenzioniranja, on nije optimalan u paralelnom radu s mrežom.

Na slici 8 se prikazuje ponašanje baterije s obzirom na ponašanje mreže u normalnom pogonu. Baterija se puni u satima niske potrošnje i prazni u vršnim satima, čime se smanjuju vrhovi krivulje te se cijela krivulja izravnava. Izravnavanjem krivulje smanjuje je se struja u vršnim satima čime se smanjuju ukupni gubici s obzirom na gubici kvadratno ovise o struji. Trenutačno i minimalno stanje napunjenosti baterije prikazani su na slici 9, iz čega se može vidjeti optimizacija rada baterije s obzirom na dano ograničenje. Ovdje je prikazan samo jedan slučaj jer se slično ponašanje pojavljuje i u ostalim scenarijima. Tablica 2 prikazuje smanjenje troškova gubitaka na godišnjoj razini. Smanjenja su u rasponu od 6,3 % za plavu MG do 14,01 % za zelenu, te u prosjeku iznose oko 10 % ukupno.



Slika 4. Gubici u plavoj mikromreži







Slika 6. Gubici u zelenoj mikromreži



Slika 7. Gubici u scenariju sa sve 3 mikromreže



Slika 8. Profil punjenja i pražnjenja baterije s obzirom na ostatak mreže u scenariju



Slika 9. Trenutno i minir	alno stanje na	punjenosti baterije
---------------------------	----------------	---------------------

	Troškovi gubitaka s	Troškovi gubitaka bez baterije	Razlika		
	baterijom (€)	(€)	(%)		
Plava mikromreža	869,16	927,59	6,3		
Crvena mikromreža u čvorištu 1	2.990,76	3.326,73	10,1		
Crvena mikromreža u čvorištu 6	3.005,82	3.326,73	9,65		
Zelena mikromreža	43,93	51,09	14,01		
Sve 3 mikromreže kombinirano	16.971,81	18.939,87	10,39		

Tablica 2. Godišnji troškovi za gubitke s i bez baterije

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu analiziran je rad baterijskog sustava u svrhu osiguravanja sigurnosti napajanja bitnih potrošača u distribucijskoj mreži. Ovime se postiže, da u slučaju ekstremnih uvjeta, bitni potrošači ne gube napajanje električnom energijom. Bitni potrošači se u ovom slučaju smatraju strateški važnim potrošačima čiji gubitak napajanja može ima katastrofalne posljedice. Na početku je odabran dio mreže u kojemu se može obuhvatiti najveći dio bitnih potrošača. Nakon toga se radi dimenzioniranje baterije tako da može samostalno napajati bitne potrošače barem 3 sata. Algoritmom za optimalno dimenzioniranje izračunati su parametri baterije koji iznose 3,588 MWh za kapacitet i 0,98 MW za prividnu snagu. Kada baterija radi paralelno s ostatkom može se postići oko 10 % smanjenja gubitaka u tom dijelu distribucijske mreže održavajući dovoljan kapacitet za pružanje napajanja bitnim potrošačima tijekom minimalno 3 tri sata.

BIBLIOGRAFIJA

- [1] V. Kumtepeli, H. C. Hesse, M. Schimpe, A. Tripathi, Y. Wang, and A. Jossen, "Energy arbitrage optimization with battery storage: 3D-MILP for electro-thermal performance and semi-empirical aging models," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 204325–204341, 2020.
- [2] M. Gržanić and T. Capuder, "Coordinated scheduling of renewable energy balancing group," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 125, 2021.
- [3] N. Covic, F. Braeuer, R. McKenna, and H. Pandzic, "Optimal PV and Battery Investment of Market-Participating Industry Facilities," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 4, pp. 3441–3452, 2021.
- [4] V. Tsormpatzoudis, A. J. Forsyth, and R. Todd, "Rapid evaluation of battery system rating for frequency response operation," 2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019, 2019.
- [5] C. Straub, J. Maeght, C. Pache, P. Panciatici, and R. Rajagopal, "Congestion management within a multi-service scheduling coordination scheme for large battery storage systems," 2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019, 2019.
- [6] C. Jamroen, A. Pannawan, and S. Sirisukprasert, "Battery Energy Storage System Control for Voltage Regulation in Microgrid with High Penetration of PV Generation," *Proc. - 2018 53rd Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2018*, 2018.
- [7] D. K. Molzahn and I. A. Hiskens, A Survey of Relaxations and Approximations of the Power Flow Equations. 2019.
- [8] T. Capuder, M. Kostelac, M. Krpan, and I. Pavić, "Multi-energy Microgrid Ability to ProvideFlexibility Services to the System Operator andSecurity of Supply to End-users," in 3rd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST), 2020.
- [9] S. D'Arco, J. A. Suul, and O. B. Fosso, "A Virtual Synchronous Machine implementation for distributed control of power converters in SmartGrids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 122, pp. 180– 197, 2015.
- [10] B. Barac, M. Krpan, T. Capuder, and I. Kuzle, "Modeling and Initialization of a Virtual Synchronous Machine for Power System Fundamental Frequency Simulations," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 160116– 160134, 2021.