

Katarina Dundović
HEP ODS d.o.o.
katarina.mikulic@hep.hr

Renato Ćučić
HEP ODS d.o.o.
renato.cucic@hep.hr

Željko Sokodić
HEP ODS - Elektra Križ
zeljko.sokodic@hep.hr

Ninoslav Holjevac
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ninoslav.holjevac@fer.hr

Matija Zidar
Fakultet elektrotehnike i računarstva
matija.zidar@fer.hr

Igor Kuzle
Fakultet elektrotehnike i računarstva
igor.kuzle@fer.hr

PRIMJENA NOVE TEHNOLOGIJE BATERIJSKIH SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

SAŽETAK

Ključnu ulogu u elektroenergetskoj tranziciji idućih godina imat će operatori distribucijskih sustava uvodeći elemente naprednih mreža kroz nove tehnologije. Uslijed povećane integracije distribuiranih izvora energije promjenjive proizvodnje te električnih automobila u transportu postavljaju se izazovi na razvoj distribucijske mreže i približavanje konceptu naprednih mreža. Kako bi se osigurao pouzdan i ekonomičan elektroenergetski sustav, jedan od ključnih elementa prilagodbi novonastalom stanju je ugradnja spremnika električne energije. Spremnici električne energije mogu poboljšati pouzdanost i sigurnost sustava, olakšati vođenje distribucijske mreže te smanjiti troškove kroz lokalnu primjenu pomicanjem vršnog opterećenja sustava i održavanjem ravnoteže proizvodnje i potrošnje električne energije. U referatu će se opisati značajke i moguća primjena baterijskih spremnika električne energije u distribucijskoj mreži u Hrvatskoj, uzimajući u obzir tehnološke i ekonomske aspekte; kao i trenutnu zakonsku regulativu. Na primjeru pilot projekta u Čazmi, kojim bi se izbjegla potreba za investicijom u gradnju nove distribucijske mreže, a zadovoljili kriteriji sigurnog i pouzdanog pogona sustava, objasnit će se jedna od mogućih primjena baterijskog spremnika.

Ključne riječi: napredne mreže, baterijski spremnici električne energije, tehno-ekonomska analiza

APPLICATION OF NEW BATTERY TECHNOLOGY IN THE DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

Distribution system operators will play a key role in the power energy transition in the coming years, by implementing elements of smart grids through new technologies. Due to the increased integration of distributed energy sources and electric cars in transport, challenges are being put in place to develop the distribution network and move towards the concept of smart grids. In order to ensure a reliable and economical power system, one of the key elements to adjust to the newly formed state is the installation of battery storages. Battery storages can improve system reliability and security, facilitate distribution network management, and reduce costs through the local application by shifting the system's peak load and maintaining a balance of electricity generation and consumption. The paper will describe the features and possible usage of battery storages in the Croatian distribution network, taking into account technological and economic aspects, as well as the current legislation. One of the possible applications of a battery storage will be explained through the example of a pilot project in Čazma, which would avoid the need to invest in the construction of a new distribution network and would meet the criteria of safe and reliable system operation.

Key words: smart grid, battery storage, techno-economic analysis

1. UVOD

Operatori distribucijskih sustava moraju pronaći načine prilagodbe novim trendovima u energetici koji podrazumijevaju rastuću integraciju obnovljivih izvora energije u distribucijsku mrežu te udio električnih automobila u transportu, odnosno prelazak iz konvencionalne mreže u naprednu mrežu. Navedeno je ostvarivo uz investiranje u razvoj distribucijske mreže te uz primjenu novih tehnologija i elemenata naprednih mreža. Operatori distribucijskih sustava moraju se pripremiti na takve promjene u budućnosti na pouzdan, prihvatljiv i održiv način uvažavajući specifičnosti određenog područja, a jedan od ključnih elementa je ugradnja spremnika električne energije. Spremnici električne energije mogu poboljšati pouzdanost i sigurnost sustava te vođenje distribucijske mreže; i smanjiti troškove kroz lokalnu primjenu spremnika pomicanjem vršnog opterećenja sustava i održavanjem ravnoteže proizvodnje i potrošnje električne energije.

Za razliku od prijenosne mreže u distribucijskoj mreži nužno je lokalno regulirati i jalovu i djelatnu snagu. Problem pada napona na dugim i opterećenim niskonaponskim izvodima u distribucijskoj mreži rješava se najčešće pomoću regulacijske preklopke na transformatorima, međutim uslijed priključivanja velikog broja distribuiranih izvora dolazi do suprotnih problema gdje napon na pojedinim mjestima raste iznad dozvoljenih vrijednosti. Lokalna kompenzacija jalove energije u distribucijskoj mreži vrši se uglavnom pomoću kondenzatorskih baterija, a kod korištenja sustava za skladištenje električne energije isto se sa smanjenim troškovima postiže pomoću elektroničkih energetskih pretvarača koji skladište znatnu količinu jalove snage. Sustav za pohranu električne energije se može uključiti u trenutku ispada nekog izvora ili dalekovoda u mreži te se koristiti za održavanje frekvencije i napona u mreži dok se ne pokrene rezervni izvor. Neke od primjena su i ravnanje vršnog opterećenja, smanjenje zagušenja, provjera kontrole napona, pouzdanost u slučaju ispada dijela mreže, utjecaj na učinkovitost cjelokupnog sustava i sl.

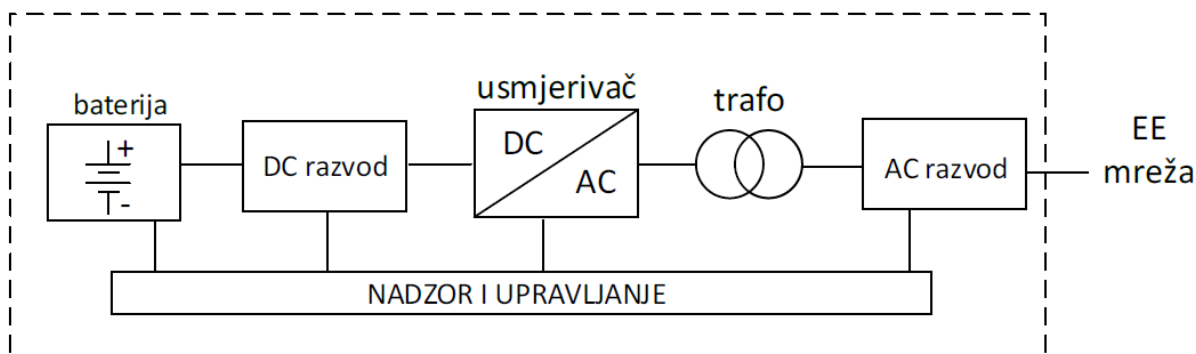
U radu će se opisati tehnologije i korištenje baterijskih spremnika električne energije te njihove moguće primjene u distribucijskoj mreži, zakonska regulativa kao i tehničko-ekonomska analiza na pilot projektu ugradnje baterijskog spremnika električne energije u sredjonaponskoj mreži Elektro Križ na području grada Čazme.

2. BATERIJSKI SPREMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE

Glavne značajne karakteristike za spremnike električne energije su energija i snaga spremnika. Energija spremnika je umnožak struje, napona i vremena pražnjenja spremnika, a snaga je umnožak struje i napona pražnjenja spremnika. Kapacitet spremnika električne energije je najviša vrijednost energije koja se može pohraniti u sustavu najčešće izražena u jedinicama Wh. Učinkovitost (η) sustava za pohranu električne energije je postotni omjer između električne energije predane sustavu za vrijeme pohrane energije i električne energije predane mreži za vrijeme pražnjenja sustava. Učinkovitost sustava se povećava ako se smanje gubici punjenja, gubici pražnjenja i gubici samopražnjenja. Vrijeme mjereno od trenutka kada sustav dobije nalog za pražnjenje skladišta energije do uspostave nazivne snage pražnjenja zove se vrijeme odziva sustava za pohranu energije. Neki sustavi za pohranu električne energije mogu odgovoriti na zahtjeve iz električne mreže i doseći nazivnu snagu predaje pohranjene energije vrlo brzo (unutar nekoliko ms), a nekima je za to potrebno mnogo duže (više minuta). Životni vijek sustava za pohranu energije se izražava preko broja ciklusa punjenja-pražnjenja koje može tijekom svog životnog vijeka odraditi. Troškovi se najčešće izražavaju u €(kn)/kW .

Baterijski sustav za pohranu električne energije (BSPEE) najčešće su građeni od nekoliko ključnih jedinice koje uključuju (Slika 1):

1. akumulatorske baterije,
2. usmjerivača (ispravljača i izmjenjivača),
3. sustava za nadzor i upravljanje BSPEE i
4. ostale opreme, što uključuje građevinsko zemljište, kontejnere ili zgrade za izgradnju opreme, električnu opremu potrebnu za priključenje baterijskog postrojenja na elektroenergetsku mrežu (transformator, harmonični filtri, rasklopna postrojenja istosmjernog i izmjeničnog napona, električni kabeli i oprema za dojavu i gašenje požara), pogonsko, zaštitno i gromobransko uzemljenje, itd. [1]



Slika 1. Blok shema BSPEE [1]

Akumulatorske baterije su spremnici energije koji pretvaraju višak električne energije u potencijalnu kemijsku energiju. One su najvažniji dio velikih baterijskih postrojenja i čine obično od 20-50% cijene cijelog postrojenja. Usmerivači pretvaraju izmjenični napon mreže u istosmjerni za vrijeme punjenja akumulatorskih baterija i obrnuto, istosmjerni u izmjenični tijekom pražnjenja akumulatorskih baterija odnosno rade kao ispravljači ili kao izmjenjivači ovisno o režimu rada. Cijena usmjerivača je također značajna u odnosu na cijenu postrojenja i može iznositi od 15% do 40% cijene cijelog postrojenja. **Error! Reference source not found.**

Prema izvedbi akumulatorskih baterija koje se koriste za ugradnju u velika baterijska postrojenja dvije su osnovne grupe - obične stacionarne akumulatorske baterije te baterije sa cirkulirajućim elektrolitom.

Vrste najučestalijih baterijskih spremnika i njihove karakteristike te troškovi ugradnje dani su u Tablica I. Karakteristike pojedinih **akumulatorskih baterija** [1].

Tablica I. Karakteristike pojedinih akumulatorskih baterija [1]

| Karakteristika | Olovne | NiCd | Li-ion | NaS | ZEBRA | VRB | ZnBr |
|--------------------------------|-------------|-------------|------------|--------------|--------------|-----------|-------------|
| TEHNIČKE KARAKTERISTIKE | | | | | | | |
| Dugotrajnost | ≤ 20 god. | 20+ god | ≤ 10 god. | ≤ 15 god. | ≤ 15 god. | ≤ 20 god. | ≤ 10 god. |
| Broj ciklusa (DoD 80%) | 200-1000 | 1000-3500 | 1000-2000 | 4000-5000 | 4000-5000 | > 12000 | 2000-3000 |
| Gustoća energije (Wh/kg) | 15-40 | 15-40 | 70-250 | 100-120 | 100-120 | 50 | 75-85 |
| Nazivni napon članka (V) | 2 | 1,2 | 2,4-3,7 | 2 | 2,5 | 1,2 | 1,8 |
| Korisnost (%) | 70-82 | 60-70 | > 90 | 80-90 | 85-95 | 70-85 | 60-75 |
| Vrijeme punjenja/pražnjenja | 5/1 | 1/1 | 1/1 | 1/1 | 1/1 | 1/1 | 1/1 |
| Vrijeme odziva | < 1 ms | < 1 ms | < 1 ms | 5 ms | 5 ms | 5 ms | 5 ms |
| Samopražnjenje (%/dan) | 0,033-0,3 | 0,067-0,6 | ≤ 0,1 | 0 (?) | 0 | malo | veliko |
| Radna temperatura (°C) | - 10 - + 40 | - 40 - + 50 | -20 - + 60 | +310 - + 350 | +310 - + 350 | +20 - +40 | + 20 - + 50 |
| Pogodne za snagu (MW) | ≤ 10 | < 30 | ≤ 2 | ≤ 50 | ≤ 5 | ≤ 15 | ≤ 1 |
| Duljina pražnjenja | do 5 h | < 1 h | ≤ 2 h | 2-8 h | 2-8 h | 4-8+ h | 2-4 h |
| TROŠKOVI | | | | | | | |
| Cijena baterije (€/kW) | 100-500 | 400-900 | 150-1000 | 3000-4000 | 150-1000 | 500-1300 | 300-700 |
| Cijena baterije (€/kWh) | 100-200 | 450-1100 | 700-1300 | 400-600 | 550-750 | 100-400 | 450-550 |

Trenutno su najzastupljenije u primjeni Li-ion baterije čije je prednost velika gustoća energije pa ih je moguće postaviti u malom prostoru i brz razvoj ove tehnologije zbog čega im stalno pada cijena. Odziv Li-ion baterija na pojavu tereta je vrlo brz i iznosi, kao i kod olovnih baterija, oko jednu milisekundu (1 ms) do pune snage. Učinkovitost Li-ion baterija je >90 % ne uključujući gubitke u elektroničkom zaštitnom modulu, a posebno su pogodne za kratka pražnjenja velikim snagama. Dugotrajnost Li-ion baterija uobičajeno iznosi između 5 i 10 godina. Broj ciklusa punjenja i pražnjenja Li-ion baterija ovisi o dubini pražnjenja, visini struje pražnjenja, naponu punjenja i temperaturi okoline. Za Li-ion baterije obično se broj ciklusa definira uz DoD (engl. *Depth of Discharge*) 80% jer se ove baterije mogu dublje prazniti od olovnih. Porastom struje pražnjenja broj ciklusa se smanjuje, a smanjenjem napona punjenja on se povećava. Li-ion baterije gube kapacitet pri niskim temperaturama okoline, ali znatno manje od olovnih. Njihovo punjenje je brže od punjenja npr. olovnih baterija, zahtijevaju elektroniku koja štiti bateriju tijekom punjenja i vrši uravnoteženje napona pojedinih članaka koji su vezani u seriju, što komplicira izvedbu, poskupljuje cijenu i stvara dodatne gubitke. Cijena Li-ion

baterija ovisi o odabranom tipu baterije i zajedno sa zaštitnim krugom iznosi približno 700-1300 €/kWh, odnosno 150-1000 €/kW. [2]

Usmjerivači su uređaji koji rade kao ispravljači ili kao izmjenjivači, odnosno kad rade kao ispravljači pohranjuju električnu energiju iz mreže u akumulatorsku bateriju, a kada rade kao izmjenjivači predaju pohranjenu električnu energiju u mrežu. Funkcije usmjerivača u sklopu BSPEE su:

- pohrana električne energije u akumulatorskim baterijama;
- kontrolirano napajanje EES-a iz akumulatorskih baterija;
- kompenzacija jalove snage na mjestu izmjeničnog priključka usmjerivača;
- naponska podršku injektiranjem radne i jalove snage;
- te omogućiti komunikaciju s nadređenim sustavom upravljanja – BSPEE.

Sustav za nadzor i upravljanje BSPEE sastoji se od sustava za upravljanje baterijom ili BMS (engl. battery management system) i nadređenog sustava za nadzor i upravljanje cijelim BSPEE te ovisi o tipu baterije. Osnovne funkcije koje treba podržavati BMS su [3]**Error! Reference source not found.:**

- nadzor svih parametara baterije bitnih za procjenu raspoloživosti kapaciteta baterije – (SoC engl. *State of charge*);
- naponi pojedinih članaka, struja kroz bateriju, temperatura članaka) i za procjenu ukupnog stanja baterije SoH (engl. *State of health*);
- nadzor napona i informacije važne za regulacija napona u režimima punjenja, ovisno o tipu bateriju i temperaturi članaka;
- nadzor napona i informacije važne za regulaciju pražnjenja baterije;
- nalog za periodičku provedbu testova baterije za utvrđivanje raspoloživosti kapaciteta i kontinuiteta baterijskog kruga;
- zaštita baterije i nalog za isključenje u slučaju kritičnog stanja.

Glavne primjene BSPEE u naprednoj distribucijskoj mreži su smanjenje vršnog opterećenja, ujednačenje tj. vremensko optimiranje proizvodnje OIE; uravnoteženje dijagrama opterećenja. smanjenje zagušenja, provjera kontrole napona, povećanje pouzdanost u slučaju ispada dijela mreže, utjecaj na učinkovitost cjelokupnog sustava i sl.

3. ZAKONSKA REGULATIVA

Predmetno poglavlje obuhvaća opis i analizu relevantne zakonske regulative za ugradnju baterijskog spremnika električne energije u vlasništvu operatora distribucijskog sustava u distribucijsku mrežu.

U skladu s EU direktivom 2019/944 o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije i Izmjeni Direktive 2012/27/EU konkretnije člankom 36. koji se odnosi na vlasništvo operatora distribucijskih sustava nad postrojenjima za skladištenje energije [4]:

1. Operatori distribucijskih sustava ne smiju imati u vlasništvu niti razvijati postrojenja za skladištenje energije, voditi ih niti njima upravljati.

2. Odstupajući od stavka 1. države članice mogu operatorima distribucijskih sustava dopustiti da imaju u vlasništvu ili razvijaju postrojenja za skladištenje energije, vode ih ili njima upravljaju ako su ona u potpunosti integrirane mrežne komponente i ako je regulatorno tijelo dalo svoje odobrenje, ili ako su ispunjeni svi sljedeći uvjeti:

(a) drugim stranama, nakon otvorenog, transparentnog i nediskriminacijskog postupka javnog natječaja, koji je podložan preispitivanju i odobrenju od strane regulatornog tijela, nije se dodijelilo pravo da imaju u vlasništvu ili razvijaju takva postrojenja, vode ih ili njima upravljaju ili nisu mogle po razumnoj cijeni i pravodobno isporučiti te usluge;

(b) takva su postrojenja potrebna da bi operatori distribucijskih sustava mogli ispuniti svoje obveze u skladu s ovom Direktivom u vezi s učinkovitim, pouzdanim i sigurnim radom distribucijskog sustava i postrojenja se ne koriste za kupovinu ili prodaju električne energije na tržištima električne energije, i

(c) regulatorno tijelo procijenilo je nužnost takvog odstupanja i provelo je ocjenu javnog natječaja, uključujući uvjeta postupka javnog natječaja, te je dalo svoje odobrenje.

Regulatorno tijelo može sastaviti smjernice ili klauzule o nabavi kako bi operatorima distribucijskih sustava pomoglo u osiguranju poštenog postupka javnog natječaja.

Dakle, dozvoljava se vlasništvo u slučaju kada se radi o potpuno integriranoj mrežnoj komponenti (koristi se jedino u svrhu osiguravanja sigurnog i pouzdanog rada distribucijskog sustava, a ne u svrhu

uravnoteženja ili upravljanja zagušenjem) te ako je regulatorno tijelo dalo svoje odobrenje. U nekim slučajevima takva su postrojenja potrebna da bi operatori distribucijskih sustava mogli ispuniti svoje obveze u skladu s ovom Direktivom u vezi s učinkovitim, pouzdanim i sigurnim radom distribucijskog sustava. Nakon što procjene nužnost takvog odobrenja, regulatorna tijela redovito ili barem svakih pet godina provode javno savjetovanje o postojećim postrojenjima za skladištenje energije kako bi se procijenila potencijalna dostupnost i zainteresiranost za ulaganje u takva postrojenja. Ako javno savjetovanje pokaže da su treće strane sposobne na troškovno učinkovit način imati u vlasništvu ili razvijati takva postrojenja, voditi ih ili njima upravljati, regulatorna tijela osiguravaju da se aktivnosti operatora distribucijskih sustava u tom području postupno ukinu u roku od 18 mjeseci. Kao dio uvjeta za taj postupak regulatorna tijela mogu dopustiti operatorima distribucijskih sustava da prime razumnu kompenzaciju, posebice da povrate preostalu vrijednost svojeg ulaganja u postrojenja za skladištenje energije.

Navedeni pregled nadolazeće EU legislative bitan je za definiranje smjera prilikom planiranja instalacije spremnika energije od strane ODS-a. Također, hrvatsko zakonodavstvo ima obvezu primijeniti članak 36. u Zakon o tržištu električne energije prema, članku 71. koji se odnosi na Prenošnje.

Ovim kratkim pregledom dano je trenutno stanje europske legislative uz navedenu problematiku ugradnje postrojenja za skladištenje električne energije konkretno baterijskih spremnika, čije se odredbe do kraja 2020. moraju primijeniti i uskladiti u nacionalnim zakonodavstvima država članica.

4. MOGUĆE PRIMJENE BSPEE

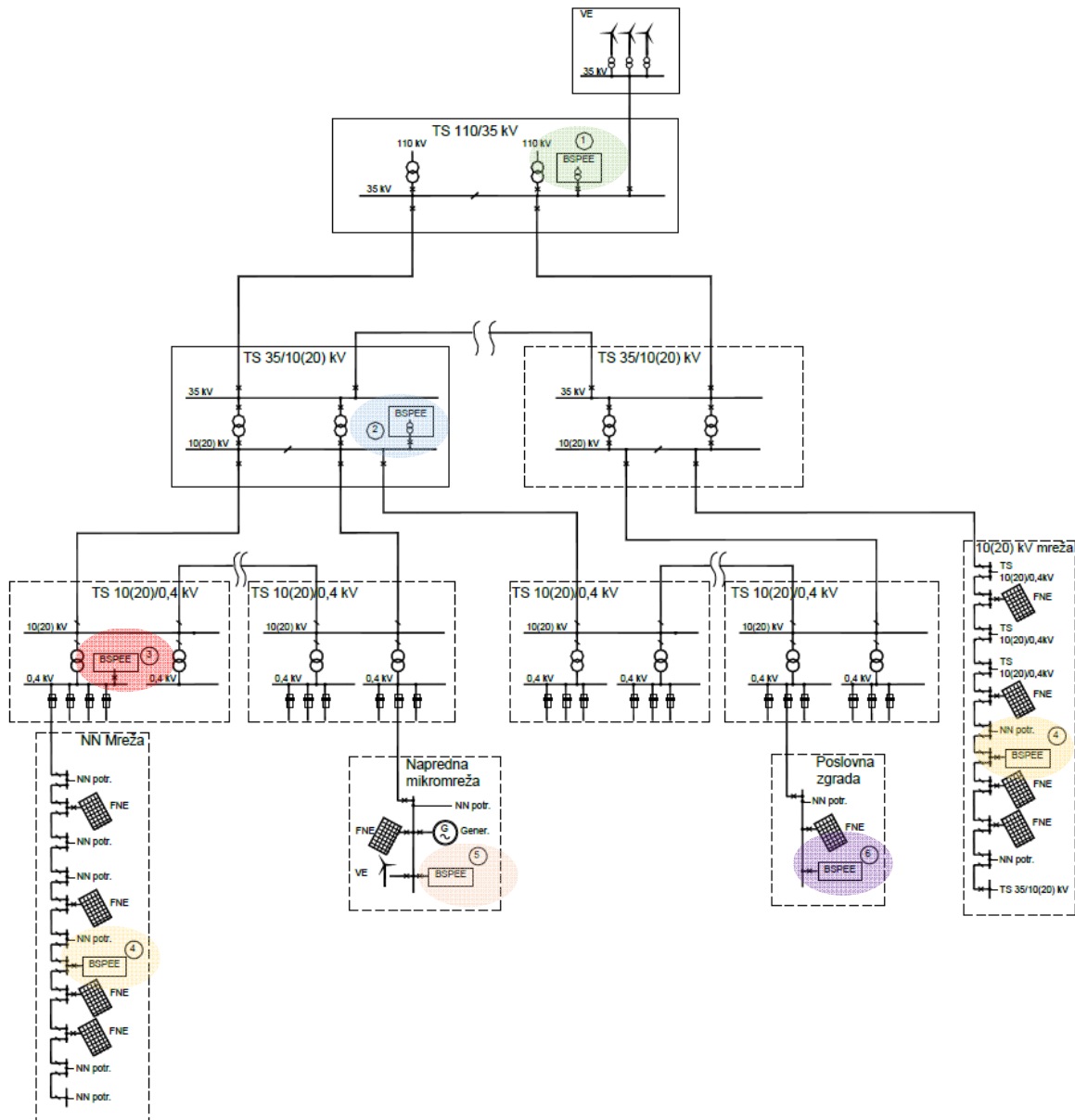
U ovom poglavlju obrađene su neke od mogućih primjena BSPEE koje su teoretski i tehnički izvedive ne uzimajući u obzir uvjete koje je u skladu s člankom 36. Uredbe (EU) 2019/944 nužno ostvariti za vlasništvo operatora distribucijskog sustava nad BSPEE.

Sustavi za pohranu električne energije mogu se koristiti za smanjenje utjecaja obnovljivih izvora energije na distribucijsku i prienosnu mrežu ili u trenutku ispada nekog izvora ili dalekovoda u mreži te se koristiti za održavanje frekvencije i napona u mreži dok se ne pokrene rezervni izvor. Na ovaj način se može izbjeći rotirajuća rezerva u generatorima koji rade bez opterećenja kako bi se uravnotežila mreža. Dakle, neke od mogućih primjena BSPEE su: lokalna kompenzacija jalove energije, smanjenje vršnog opterećenja, ujednačenje tj. vremensko optimiranje proizvodnje OIE; uravnoteženje dijagrama opterećenja, smanjenje zagušenja, provjera kontrole napona, povećanje pouzdanost u slučaju ispada dijela mreže, utjecaj na učinkovitost cjelokupnog sustava, upravljanje opterećenjem potrošnje, za autonomiju mikromreže i sl. BSPEE je uglavnom projektiran za pružanje više usluga, no raspored izvršenja tih usluga određen je po prioritetima i istovremeno se njim može obavljati samo jedna funkcija.

Na slici ispod (Slika 2). prikazana su moguća mjesta ugradnje BSPEE, a ovisno o mjestu ugradnje razlikuje se i njegova primjena.

1. Uz broj 1, označeno zeleno, prikazan je BSPEE priključen u TS 110/35 kV, na mjestu priključenja vjetroelektrane na 35 kV sabirnicama, koji sudjeluje u regulaciji isporučene električne energije kroz izlaznu snagu, zatim može pružiti vremensko optimiranje proizvodnje i smanjenje potrebe za isključenjem VE, te dodatno regulaciju napona i frekvencije i kompenzaciju jalove snage.
2. Uz broj 2, označen plavo, BSPEE je spojen na 10(20) kV sabirnice u TS, te se za primarnu funkciju koristi smanjenje vršnog opterećenja TS što dovodi do odgode ili eliminiranja potrebe za izgradnjom nove distribucijske mreže. Zbog promjenjivosti područja s vršnim opterećenjem tijekom godine moguće je ugraditi i mobilne BSPEE koje se mogu premještati po lokacijama.
3. Uz broj 3, označeno crveno, BSPEE je spojen na 0,4 kV sabirnice u TS, a na toj poziciji se uglavnom koristi kod priključenog velikog broja distribuiranih izvora električne energije na NN mrežu pri čemu kod velike proizvodnje i male potrošnje dolazi do promjene tokova snaga prema SN mreži. Da ta snaga ne bi prelazila vrijednost nazivne snage distribucijskog transformatora i ne bi bilo potrebno raditi zamjenu transformatora u BSPEE se pohranjuje višak proizvedene energije.
4. Uz broj 4, označen žuto, BSPEE je spojen na niskonaponski izvod distribucijske mreže (ili npr. na srednjonaponski izvod) skupa sa potrošačima i proizvođačima u svrhu regulacije napona.

5. Uz broj 5, označen narančasto, BSPEE je spojen na naprednu mikromrežu kako bi se mogla ostvariti autonomija mikromreže.
6. Uz broj 6, označen ljubičasto, BSPEE je priključen na niskonaponski razvod napajanja poslovne zgrade radi aktivnog sudjelovanja potrošača u radu elektroenergetskog sustava – upravljanje opterećenjem potrošnje.



Slika 2. Moguća mjesta ugradnje BSPEE [1]

5. PILOT PROJEKT UGRADNJE BATERIJSKOG SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U TS ČAZMA

Budući da vrijeme ugradnje BSPEE može biti mnogo kraće od vremena potrebnog za temeljitu rekonstrukciju dijela distribucijske mreže, ovakav sustav može se ugraditi na određenim lokacijama privremeno i na taj način riješiti akutne probleme u preopterećenoj mreži. Za privremene ugradnje ekonomski je najpovoljnije ugraditi mobilne BSPEE koji se mogu seliti s lokacije na lokaciju te više puta iskoristiti. Pri odabiru odgovarajućeg tipa akumulatorske baterije treba uzeti u obzir raspoloživi prostor za ugradnju, ukupnu cijenu investicije, raspoloživi broj ciklusa i nazivne gubitke. Ako se BSPEE planira ugraditi za trajno rješenje povremenih preopterećenja distribucijske mreže ukupni troškovi ugradnje i održavanja BSPEE trebaju biti niži od troškova potrebnih za rekonstrukciju distribucijske mreže kako bi se riješio problem povremenih preopterećenja.

Za slučaj osiguranja pouzdanosti napajanja tj. N-1 kriterija na području TS 35/10 kV Čazma koje nema rezervno napajanje na 35 kV i trenutno N-1 kriterij osigurava preko 10 kV mreže na naponskoj razini evaluirana su potencijalna rješenja tj. smjerovi i naponske razine napajanja u skladu s postojećim opterećenjem i proizvodnjom bioplinske elektrane Bojana. U nastavku je dan pregled i procjena trenutnog stanje i trenutne mogućnosti N-1 različitih smjerova napajanja su sukladno tome predložiti potencijalna rješenja kako bi se povećala pouzdanost napajanja. Posebna pozornosti pridaje se rješenju koje uključuje izgradnju spremnika energije.

5.1. Postojeće stanje i opis problema

TS 35/10 kV Čazma nalazi se u pojnom području TS 110/35 kV Ivanić i u postojećem stanju nema zadovoljavajući rezervni smjer napajanja 35 kV vodom. Iz TS 35/10 kV Šumećani energija se dovodi radijalnim 35 kV vodom do distribucijskog područja TS 35/10 kV Čazma koja napaja korisnike na 10 kV pogonskom naponu. Srednje opterećenje transformatorske stanice je na razini 4 MVA dok je maksimalno izmjereno opterećenje na razini 5 MVA u slučaju prespajanja i izvanrednog pogona. U TS 35/10 kV Čazma instalirana su dva transformatora od 8 MVA grupe spoja Dyn5. Trenutno je na području pojne TS 35/10 kV Čazma priključena bioplinska elektrana Bojana snage 2 MW te su strujno-naponske prilike u normalnom pogonu zadovoljavajuće. BPP Bojana spojena u 10 kV izvod Martinac iz TS 35/10 kV Čazma.

Od veza prema pojnim područjima okolnih TS 35/10 kV, TS 35/10 kV Čazma povezana je s 3 nadzemna voda na 10 kV pogonskom naponu i to prema pojnim područjima susjednih TS 35/10 kV:

1. Veza prema TS 35/10 kV Kloštar preko 10 kV izvoda Dubrava
2. Veza prema TS 35/10 kV Šumećani preko 10 kV izvoda Šumećani
3. Veza prema TS 35/10 kV Križ preko 10 kV izvoda Česma

U uvjetima nedostupnosti primarnog smjera napajanja na 35 kV naponskoj razini (od TS 110/35 kV Ivanić preko TS 35/10 kV Šumećani) nije moguće u potpunosti zadovoljiti pogonske zahtjeve.

Podaci o opterećenju se baziraju na godini dana mjerenja 15-minutnih vrijednosti struja (minimalna, srednja i maksimalna struja za svako 15-minutno razdoblje mjerenja) za razmatrani opseg mreže. Ti podaci su upotpunjeni dnevnim krivuljama potrošnje svih potrošača većih od 50 kW, a koje su generirane na temelju obrađenih povijesnih podataka za razdoblje od lipnja 2017. godine do lipnja 2018. godine. Histogram pojavljivanja različitih opterećenja za razmatranu godinu povijesnih podataka pokazuje da se u 99,90% vrijednosti opterećenje nalazi na razini manjoj od 250 A ($\approx 4,5$ MW) dok se u 99,00% slučajeva opterećenja nalazi na razini ispod 200 A ($\approx 3,5$ MW).

Sukladno zaključcima analize povijesnih podataka o opterećenju razina opterećenja od 4,5 MW uz proizvodnju iz BPP Bojana na razini 2 MW predstavlja zadovoljavajući simulacijski scenarij za procjenu povećanja pouzdanosti napajanja pri za najnepovoljniji scenarij.

Analiza pretpostavlja postavku automatskog regulatora napona u TS 110/35 kV Ivanić na 35,5 kV (101,43%) što uz uvažavanje mrtve zone regulatora od $\approx 1,5\%$ predstavlja postavku od 100% koja je za razmatrano vršno opterećenja ograničavajuća i predstavlja rubno nepovoljni scenarij. Analize tokova snaga, kako je spomenuto provedena je za rubni scenarij koji predstavlja najnepovoljniji slučaj, u programskom alatu Neplan. Dodatno, pretpostavka je da je položaj ručne preklopke napona u TS 35/x kV u položaju s prijenosnim omjerom 35/10,5 kV.

U postojećem stanju postoje 3 pričuvna smjera napajanja kroz 10 kV mrežu kojima je moguće ostvariti N-1 smjer napajanja pojnog područja TS 35/10 kV Čazma u slučaju ispada u 35 kV mreži (Tablica II.). Smjer napajanja iz pojnog područja TS 35/10 kV Kloštar najnepovoljniji je te nije moguće ostvariti zadovoljavajuće naponske prilike. Najpovoljniji smjer napajanja je preko TS 35/10 kV Šumećani kada je moguće napojiti 45-59% opterećenja uz proizvodnju BPP Bojana od 2 MW uz $\cos\phi=1$ do $\cos\phi=0,9$.

Smjer napajanja preko TS 35/10 kV Križ povećava cjelokupnu pouzdanost napajanja jer se TS 35/10 kV Križ napaja preko zasebnog 35 kV voda iz TS 110/35 kV Ivanić.

Tablica II. Rekapitulacija N-1 proračuna [6]

| Smjer | TS 35/10 kV | Mogućnosti napajanja pojnog područja TS 35/10 kV Čazma (4 MW) uz proizvodnju BPP Bojana: | | | Max. teret promatranog dijela mreže TS 35/10 Čazma | Procjena pouzdanosti N-1 smjera | |
|-------|-------------|--|----------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|-------------|
| | | 0 MW | 2 MW $\cos\phi=1$ | 2 MW $\cos\phi=0,9$ 0 | | 10 kV mreža | 35 kV mreža |
| I | TS 35/10 kV | 0% | 27% | 41% | 2,4 MW (41%) | $\approx 68\%$ | Povećanje |

| Kloštar | | | | | | | |
|---------|-------------------------|-----|-----|-----|--------------|------|--------------|
| II | TS 35/10 kV Šumećani | 12% | 45% | 59% | 3,3 MW (59%) | ≈93% | Bez promjene |
| III | TS 35/10 kV Križ | 10% | 35% | 49% | 2,8 MW (49%) | ≈86% | Povećanje |

Dugotrajni prekidi napajanja mogu prouzrokovati značajne količine neisporučene energije kada se sagleda njihovo puno trajanje te je stoga važno imati u potpunosti zadovoljen N-1 kriterij. Promjene uklopnog stanja u mreži su moguće, te se kroz period od nekoliko sati mogu izvršiti prespajanja i napajanje dijelova mreže iz različitih smjerova, no to svejedno ostavlja korisnike bez napajanja značajan dio vremena.

Dodatno, i uz pretpostavku da su zadovoljeni uvjeti koji bi omogućili nesmetano napajanje iz BPP Bojana očekivano je da u nekim dijelovima godine proizvodnja iz tog distribuiranog izvora neće biti dostupna (očekivana raspoloživost bioplinskog postrojenja je između 7525 i 8500 sati godišnje). U tim slučajevima postojećim N-1 smjerovima napajanja moguće je napojiti značajno manji dio korisnika (od 0% do 12%) te se vrijednost pouzdanog pričuvnog smjera napajanja povećava. Bitno je napomenuti da su navedene procjene dostupnosti N-1 smjerova napajanja okvirne i temeljene na modelu koji ne razmatra stanje u 0,4 kV mreži.

Iz provedenih analiza razvidno je da je proizvodnja BPP Bojana snage 2 MW kritično potrebna za ostvarivanje zadovoljavajućeg napajanja kupaca na pojnom području TS 35/10 kV Čazma u slučaju kvara na pojnom 35 kV vodu TS 35/10 kV Šumećani-TS 35/10 kV Čazma. Kako bi se omogućio ostanak BPP Bojana na mreži i u sinkronizmu sa sustavom potrebno je izbjeći beznaponsku pauzu prilikom kvara i za promjenu smjera napajanja potrošača na pojnom području TS 35/10 kV Čazma potrebna je investicija u naprednu zaštitu koja bi omogućila paralelni pogon 10 kV mreže (odabrani 10 kV N-1 vod) i 35 kV mreže. Procijenjeni iznos investicije u naprednu zaštitu od ≈0,5 mil. HRK potreban i u slučaju investicije u baterijski spremnik i u slučaju investicije u 10(20) kV mrežu, odnosno prelazak na 20 kV pogonski napon. Za ostvarivanje takvog načina pogona koji omogućava izbjegavanje beznaponske pauze potrebno je izvršiti zamjenu zaštite (npr. distantna ili usmjerena nadstrujna te svakako pilot zaštita), uvesti brze komunikacijske kanale (optika) te potencijalno promijeniti prekidače na razmatranim vodovima ako dođe do porasta iznosa struja kratkog spoja. Detaljna analiza i podešenje takvog sustava zaštite je van opsega ovog rada. Jednako tako ne razmatra se sama dinamika i dinamičko ponašanje baterijskog spremnika u trenutku nastanka kvara u mreži.

Postojeći N-1 pravci kroz 10 kV mrežu ne mogu zadovoljiti postojeću razinu opterećenja niti uz pretpostavku proizvodnje BPP Bojana od 2 MW. Preko TS 35/10 kV Kloštar moguće je napojiti maksimalni teret od 2,4 MW, preko TS 35/10 kV Križ 2,8 MW, a preko TS 35/10 kV Šumećani 3,3 MW. Najpovoljniji N-1 smjer napajanja je stoga preko 10 kV izvoda Čazma iz pojne TS 35/10 kV Šumećani. Tehnički najpovoljnije rješenje za pojno područje TS 35/10 kV Čazma je prelazak na 20 kV pogonski napon, no gledajući globalno, bez cjelovitog prelaska i okolnih 35/10 kV stanica na 20 kV pogonski napon gubi se na pouzdanosti napajanja tih ostalih pojmih područja koja pričuvni smjer ostvaruju iz TS 35/10 kV Čazma. Razmotreni su sljedeći slučajevi potencijalnih ulaganja u mrežu na području TS 35/10 kV Čazma s kojima se omogućava pričuvni smjer napajanja za potrošače tog pojnog područja TS 35/10 kV Čazma u velikom rasponu mogućih pogonskih stanja:

1. Kapitalnim ulaganjem u 35 kV mrežu odnosno upetljavanjem TS 35/10 kV Čazma u 35 kV mrežu;
2. Kapitalnim ulaganjem u 10(20) kV mrežu – odnosno rekonstrukcija i pojačanje magistralnih dionica poveznih 10 kV dalekovoda prema pojnim područjima susjednih TS 35/10 kV Kloštar, TS 35/10 kV Šumećani i TS 35/10 kV Križ ili planskim prelaskom na 20 kV pogonski napon dijela razmatrane mreže;
3. Investicijom u instalaciju baterijskog spremnika jer spremnik energije osigurava pravovremenu tranziciju s osnovnog na rezervno napajanje, odnosno brzi odziv (promjenu snage na točki priključenja) u trenutku ispada osnovnog napajanja. Drugim riječima, osigurava stabilnost (kontinuitet) napajanja iz BPP Bojana zadržavajući naponske prilike u zadovoljavajućim granicama. Spremnik energije svojim kapacitetom (pohranjenom energijom) omogućava dovoljno dugu ispomoć napajanju iz rezervnog smjera po postojećim pravcima napajanja na 10 kV pogonskom naponu.

Osvrt na svako od potencijalnih rješenja dano je u nastavku. Pri tome je za slučaj prelaska na 20 kV i investicije u baterijski spremnik zadovoljavajuće rješenje moguće ostvariti i za smjer preko izvoda Čazma iz TS 35/10 kV Šumećani i za smjer preko izvoda Rečica iz TS 35/10 kV Križ. Ekonomski i tehnički povoljnije rješenje je smjer iz TS 35/10 kV Šumećani u svim aspektima osim u pouzdanosti

pogona na kvar na 35 kV vodu TS 110/35 kV Ivanić – TS 35/10 kV Šumećani gdje se prednost daje smjeru napajanja iz TS 35/10 kV Križ. U tablici ispod (Tablica III.) prikazane su procjene troškova i karakteristike navedenih rješenja.

Tablica III. Rekapitulacija tehno-ekonomske analize [6]

| Rješenje | Procijenjeni trošak [HRK] | Tehnički zahtjevi u N-1 pogonu | Napredna zaštita | Prednosti | Nedostatci |
|--|---------------------------|--|---|---|---|
| 35 kV vod Križ-Čazma (13 km duljine) | ≈7,2 mil | Zadovoljavajuće strujno-naponske prilike | Nije potrebna | - ostvarivanje N-1 kriterija u 35 kV mreži | - imovinsko pravni odnosi - nije u skladu dugoročnim planom razvoja |
| Prelazak na 20 kV (pojno područja TS 35/10 kV Čazma) | ≈7,2 mil | Zadovoljavajuće strujno-naponske prilike | Preduvjet ako se želi zadržati BPP Bojana na mreži; 10(20) kV vod iz TS 35/10 kV Šumećani ≈0,5 mil kn | - mogućnost integracije dodatna 2 MW u BPP Bojana - dugoročni benefiti (manji gubici, bolje naponske prilike, povećana mogućnost integracije OIE i DG...) | - velik broj elemenata koje je potrebno prilagoditi za 20 kV napon može produžiti rok dovršetka - smanjenje pouzdanosti graničnih područja koja ostaju na 10 kV, a graniče s TS 35/20 kV Čazma |
| Baterijski spremnik (1,5 MW pretvarač; 3,5 MWh kapacitet) | ≈6,5 mil | Zadovoljavajuće strujno-naponske prilike | Petlja 35 kV voda i 10(20) kV voda Čazma iz TS 35/10 kV Šumećani ≈0,5 mil kn | - mogućnost brzog dovršetka projekta - mogućnost korištenja spremnika za regulaciju napona smanjenje gubitaka, pružanje frekvencijske rezerve HOPS-u, - povećana mogućnost integracije OIE i DG | - složenija zaštita 35 kV i dijela 10(20) kV mreže - nova tehnologija - nedostatak pogonskog iskustva |
| Baterijski spremnik (2 MW pretvarač; 5 MWh kapacitet) | ≈10,5 mil | Zadovoljavajuće strujno-naponske prilike | Petlja 35 kV voda i 10(20) kV voda Rečica iz TS 35/10 kV Križ ≈0,5 mil kn | - istraživački i znanstveni potencijal | - trošak - složenija zaštita 35 kV i dijela 10(20) kV mreže - nova tehnologija - nedostatak pogonskog iskustva |

Pozitivna značajka opcije 1 je što predstavlja potpuno osiguravanje N-1 smjera napajanja kroz 35 kV mrežu.

Pozitivna značajka opcije 2 (prelazak na 20 kV) je mogućnost integracije 2 MW dodatne proizvodnje u BPP Bojana (ukupno 4 MW).

Pozitivna značajka opcije 3 (spremnike energije) je mogućnost ostvarivanje dodane vrijednosti kroz korištenje spremnika energije za sekundarne namjene te brzina dovršetka projekta.

Tehnički najpovoljnije rješenje za pojno područje TS 35/10 kV Čazma je prelazak na 20 kV pogonski napon, no gledajući globalno, bez cjelovitog prelaska i okolnih 35/10 kV stanica na 20 kV pogonski napon gubi se na pouzdanosti napajanja tih ostalih pojmih područja koja pričuveni smjer ostvaruju iz TS 35/10 kV Čazma, upravo zbog čega se kao optimalno rješenje predlaže ugradnja baterijskog spremnika električne energije. Optimiranje baterijskog spremnika odrađeno je u optimizacijskom okruženju FICO Xpress, ali nije predmet ovog referata. Mogućnost analize rada s promjenjivim cosfi omogućava smanjivanje zahtijevane snage s preliminarnih 2 MVA na razinu 1,3 MVA odnosno 1,8 MVA kako je prikazano u tablici u nastavku (Tablica IV).

Tablica IV. Rezultati optimiranja parametara spremnika baterija [6][4]

| Red. broj | Smjer napajanja | Snaga pretvarača | Kapacitet potreban za: | | |
|-----------|-----------------|------------------|------------------------|---------------|---------------|
| | | | 1h autonomije | 2h autonomije | 3h autonomije |

| | | | | | |
|---|----------------------|---------|-------|---------|---------|
| 1 | TS 35/10 kV Šumećani | 1,3 MVA | 2 MWh | 3 MWh | 3,5 MWh |
| 2 | TS 35/10 kV Križ | 1,8 MVA | 2 MWh | 3,5 MWh | 5 MWh |

Primarna primjena spremnika energije bila bi osiguranje rezervnog (N-1) napajanja pojnog područja TS 35/10 kV Čazma uz osiguranje kontinuiranog pogona BPP Bojana i budućih distribuiranih izvora energije te prijenosa snage preko rezervnog 10 kV voda (Čazma iz TS 35/10 kV Šumećani ili Rečica iz TS 35/10 kV Križ); uz cijenu investicije na razini ostalih rješenja (prelazak na 20 kV pogonski napon i investicija u novi 35 kV vod).

6. ZAKLJUČAK

U radu su obrađene osnovne karakteristike i moguće primjene baterijskih spremnika električne energije kao nove tehnologije koja se nameće u naprednim distribucijskim mrežama. Spremnici električne energije mogu poboljšati pouzdanost i sigurnost sustava te vođenje distribucijske mreže; i smanjiti troškove kroz lokalnu primjenu spremnika pomicanjem vršnog opterećenja sustava i održavanjem ravnoteže proizvodnje i potrošnje električne energije. Pilot projektom kojim se baterijskim spremnikom električne energije omogućava povećanje pouzdanosti napajanja, izbjegavanje otočnog rada i integracija dodatnih obnovljivih izvora energije na distribucijsku mrežu omogućilo bi se stjecanje znanja koje bi se moglo primijeniti i na ostala područja u Hrvatskoj. Naročito korisna i zanimljiva analiza rezultata takvog pilot projekta bila bi za hrvatske otoke koji imaju slabe pričuvne smjerove napajanja, malen broj sati s maksimalnim opterećenjem, oscilacije u potrošnji tijekom ljetnih i zimskih mjeseci te velik potencijal za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora. Ostale primjene koje su razrađene odnose se na baterijske spremnike u vlasništvu drugih strana – privatnih investitora, opskrbljivača ili agregatora. Ovom pilot projektu prethodila je studija Baterijski sustavi za pohranu električne energije (BSPEE) i mogućnosti njihove primjene u distribucijskoj mreži HEP ODS-a kojom je obrađen pregled mogućih tehnologija za skladištenje električne energije s naglaskom na baterijske spremnike električne energije i njihove primjene, gdje se BSPEE pokazao kao dobra opcija za promoviranje i valorizaciju utjecaja na distribucijsku mrežu nove tehnologije.

Primarna primjena spremnika električne energije u Čazmi na području Elektre Križ bila bi osiguranje rezervnog (N-1) napajanja pojnog područja TS 35/10 kV Čazma uz osiguranje kontinuiranog pogona BPP Bojana i budućih distribuiranih izvora energije te prijenosa snage preko rezervnog 10 kV voda (Čazma iz TS 35/10 kV Šumećani ili Rečica iz TS 35/10 kV Križ). Osiguranje rezervnog smjera napajanja jest povećanje pouzdanosti mreže te je prema tome u skladu s EU direktivom 2019/944 o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije i Izmjeni Direktive 2012/27/EU, konkretno stavkom 2. članka 36. koji se odnosi na vlasništvo operatora distribucijskih sustava nad postrojenjima za skladištenje energije te dozvoljava vlasništvo u slučaju kada se radi o potpuno integriranoj mrežnoj komponenti (koristi se jedino u svrhu osiguravanja sigurnog i pouzdanog rada distribucijskog sustava, a ne u svrhu uravnoteženja ili upravljanja zagušenjem).

Sveukupno gledano, investicijom u baterijski spremnik tehnički je moguće ostvariti povećanje pouzdanosti napajanja za pojno područje TS 35/10 kV Čazma uz cijenu investicije na razini ostalih rješenja (prelazak na 20 kV pogonski napon i investicija u novi 35 kV vod), a pogotovo uzimajući u obzir potrebno vrijeme za implementaciju rješenja.

7. ZAHVALA

Istraživanje je financirano u sklopu projekta WINDLIPS – WIND energy integration in Low Inertia Power System (grant No. HRZZ-PAR-02-2017-03), koji se financira od strane Hrvatske zaklade za znanost, Hrvatskog operatora prijenosnog sustava (HOPS d.o.o) i HEP proizvodnje d.o.o

8. LITERATURA

- [1] Baterijski sustavi za pohranu električne energije i mogućnost njihove primjene u distribucijskoj mreži HEP ODS-a, Končar – Elektronika i informatika d.d., J. Škare, H. Divić, Zagreb, 2017.
- [2] Lithium – Ion Battery, EASE
- [3] I. Čolović, J. Škare i N. Mileusnić, Prilagodba statičkog frekvencijskog pretvarača niskog napona KONVert za pohranu električne energije, 13. savjetovanje HRO Cigré, Šibenik, 2017
- [4] EU Komisija: Direktiva 2019/944 o zajedničkim pravilima za unutarnje tržište električne energije

- [5] N. Holjevac, M. Zidar, K. Mikulić, I. Kuzle, J. Kožar, R. Ćučić, Tehno-ekonomska analiza i optimizacija spremnika energije u distribucijskoj mreži, HRO CIGRE, Šibenik, 2019.
- [6] Tehničko-tehnološki elaborat: „Pilot projekt određivanja tehničkih značajki spremnika energije u sredjonaponskoj distribucijskoj mreži Elektre Križ na području Čazme“, FER, ZVNE, Zagreb, travanj 2019.