

Ninoslav Holjevac¹
Fakultet elektrotehnike i računarstva
ninoslav.holjevac@fer.hr

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

Josip Kožar
HEP ODS - Elektra Križ
josip.kozar@hep.hr

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

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

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

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

TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA I OPTIMIZACIJA SPREMNIKA ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

SAŽETAK

Operatori distribucijskih sustava moraju pronaći načine prilagodbe novim trendovima u energetici koji podrazumijevaju rastuću integraciju obnovljivih izvora energije u distribucijsku mrežu. Navedeno je ostvarivo uz investiranje u razvoj distribucijske mreže te uz primjenu novih tehnologija i elemenata naprednih mreža, a jedan od ključnih elementa je ugradnja spremnika električne energije. Ovaj rad daje tehno-ekonomsku evaluaciju potencijalnih rješenja na primjeru slučaja ostvarivanja n-1 kriterija za pojno područje TS 35/10 kV Čazma uz detaljniju analizu investicije u baterijski spremnik energije pri čemu se određuju optimalna snaga i kapacitet baterijskog spremnika uvažavajući dnevne krivulje opterećenja i strujno-naponska ograničenja.

Ključne riječi: spremnici energije, distribucijska mreža, tehno-ekonomska analiza

DISTRIBUTION SYSTEM LEVEL ELECTRICAL ENERGY STORAGE TECHNO- ECONOMIC ANALYSIS AND OPTIMIZATION

SUMMARY

Distribution system operators need to adapt to emerging trend in the power system sector mainly driven by the widespread integration of renewable energy sources in low and medium voltage grids. This process can be achieved with the application of smart grid technologies with energy storage being one of the key elements. The purpose of this paper is to analyze different possible solution for ensuring N-1 criterion for the distribution grid supplied from TS 35/10 kV Čazma. The techno-economic analysis of different solutions is performed with special attention given to the solutions including the energy storage. The optimal power and capacity of the storage is calculated based on daily load diagrams with respect to load flow physical constraints.

Key words: electrical energy storage, electrical distribution grid, techno-economic analysis

¹ Stavovi izneseni u referatu su osobna mišljenja autora, nisu obvezujući za poduzeće/instituciju u kojoj je autor zaposlen te se ne moraju nužno podudarati sa službenim stavovima poduzeća/institucije.

1. UVOD

Operatori distribucijskih sustava (ODS) 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 [1]. Navedeno je ostvarivo uz investiranje u razvoj distribucijske mreže te uz primjenu novih tehnologija, metoda upravljanja i elemenata naprednih mreža [2]. 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 [3]. 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 [4].

TS 35/10 kV Čazma nalazi se u pojnom području TS 110/35 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. 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. Jednako tako prema Mrežnim pravilima koja reguliraju otočni pogon distribuirane proizvodnje beznaponska pauza koju uzrokuje ispad onemogućava napajanje lokalnih potrošača iz lokalne bioplinke elektrane (BPP Bojana) koja se uslijed ispada mora isključiti s mreže.

Ovaj rad daje tehno-ekonomsku evaluaciju potencijalnih rješenja koja uključuju kapitalne investicije u 35 kV mrežu, kapitalne investicije u 10 kV mrežu u vidu pojačanja vodova ili prelaska na 20 kV pogonski napon te investiciju u baterijski spremnik energije pri čemu se određuje optimalna snaga i kapacitet baterijskog spremnika u TS 35/10 kV Čazma uvažavajući dnevne krivulje opterećenja i strujno-naponska ograničenja. Članak je organiziran tako da se u poglavlju 2 navode neke osnovne karakteristike baterijskih spremnika dok poglavlje 3 daje pregled trenutnog stanja i problema za razmatrani testni slučaj. Nakon toga je u poglavlju 4 dan pregled potencijalnih rješenja i proračun strujno-naponskih prilika s baterijskim spremnikom. U poglavlju 5 kratko je prikazan proces optimiranja parametara baterijskog spremnika. Rad je zaključen poglavljem 6.

2. UGRADNJA BATERIJSKIH SPREMNIKA ELEKTRIČNE ENERGIJE U DISTRIBUCIJSKOJ MREŽI

Prijedlozi uredbi i direktiva Europske Unije iz 2016. godine (paket energetske mjere naziva „Čista energija za sve Europljane“) [5] postavljaju aktivne kupce (eng. *prosumere*) te nove tehnologije poput odziva potrošnje i spremnike energije na centralnu poziciju unutar budućeg europskog elektroenergetskog sustava.

Očekivano povećanje proizvodnje iz varijabilnih obnovljivih izvora energije prisiljava ODS na dodatna ulaganja u kapacitet mreže, kako bi se osigurala ravnoteža proizvodnje i potrošnje u sustavu. Zbog varijabilnosti proizvodnje iz sunca i vjetra, kao i varijabilnosti potrošnje kod punjenja električnih vozila značajan dio distribucijskog kapaciteta neće biti optimalno iskorišten, a ni troškovno opravdan. Također, do izražaja dolazi važnost fleksibilnosti tog dijela elektroenergetskog sustava pa se zbog toga postavljaju i zahtjevi za aktivnim sudjelovanjem potrošača u radu EES.

Kao logično rješenje nameću se spremnici energije koji mogu poboljšati pouzdanost, sigurnost sustava i vođenje distribucijske mreže te smanjiti troškove kroz lokalnu primjenu spremnika pomicanjem vršnog opterećenja sustava i održavanjem ravnoteže proizvodnje i potrošnje električne energije.

Spremnici energije pruža dodatni kapacitet za mrežu i omogućava ravnjanje vršnog opterećenja, što omogućuje bolje (troškovno) i učinkovitije korištenje mreže, a ulaganja u rekonstrukciju i dogradnju postojeće distribucijske mreže mogu se izbjeći ili odgoditi. U distribucijskoj mreži najpogodniji spremnici energije su baterijski spremnici električne energije nazivne snage u rasponu od 1 do 50 MW s mogućnošću pohrane električne energije od otprilike 5 do 250 MWh.

Baterijski sustav za pohranu električne energije (BSPEE) u pravilu se sastoji se od: akumulatorske baterije, usmjerivača (ispravljača i izmjenjivača), sustava za nadzor i upravljanje BSPEE i ostale opreme.

Moguće primjene BSPEE u distribucijskoj niskonaponskoj i srednjonaponskoj mreži su:

- Ravnanje vršnog opterećenja
- Regulacija napona i frekvencije
- Kompenzacija jalove snage
- Poboljšanje kvalitete električne energije (kompenzacija harmonika)
- Tercijarna regulacija (rotirajuća rezerva)
- Osiguranje pouzdanosti napajanja (N-1 kriterij)

Pojavom distribuiranih izvora u distribucijskoj mreži napon raste. U slučajevima velike proizvodnje i male potrošnje smjer tijeka energije se promijeni, a napon može narasti i iznad maksimalno dozvoljenog iznosa. U tom slučaju moguće je, na odgovarajuća mjesta u NN ili SN mreži, ugraditi BSPEE čija je primarna usluga regulacija napona. Također, BSPEE mogu, zbog sposobnosti njegovih usmjerivača da injektiraju ili potroše znatnu količinu jalove energije, smanjiti propad i ubrzati oporavak napona u distribucijskoj mreži tijekom i nakon kvara. BSPEE može, pravovremenom pohranom i isporukom električne energije, vršiti ograničenje vršnog opterećenja u distribucijskoj elektroenergetskoj mreži.

Kriteriji koji čine ugradnju BSPEE opravdanim su:

- Visok trošak rekonstrukcije postojeće ili izgradnje nove mreže;
- Visok omjer vršnog i prosječnog opterećenja (vršno opterećenje traje relativno kratko vrijeme, a veći dio dana opterećenje je znatno niže);
- Nesigurnost veličine i vremena pojave dodatnog opterećenja (mogućnost nadogradnje BSPEE prema potrebi);
- Dugo trajanje rekonstrukcije postojeće ili izgradnje nove mreže (raspoloživost financijskih sredstava, prikupljanje potrebnih dozvola i sl.);
- Optimizacija plana investicije (BSPEE može biti privremeno rješenje);
- Koristi od istovremenog pružanja više usluga koje može pružiti BSPEE.

Također, treba ekonomski valorizirati i korist od ostalih usluga koje BSPEE pruža operatoru distribucijskog sustava.

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 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 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 stanja i trenutne mogućnosti N-1 različitih smjerova napajanja te su sukladno tome predložena potencijalna rješenja kako bi se povećala pouzdanost napajanja. Posebna pozornosti pridaje se rješenju koje uključuje izgradnju spremnika energije.

3. POSTOJEĆE STANJE I OPIS PROBLEMA

3.1. Model mreže

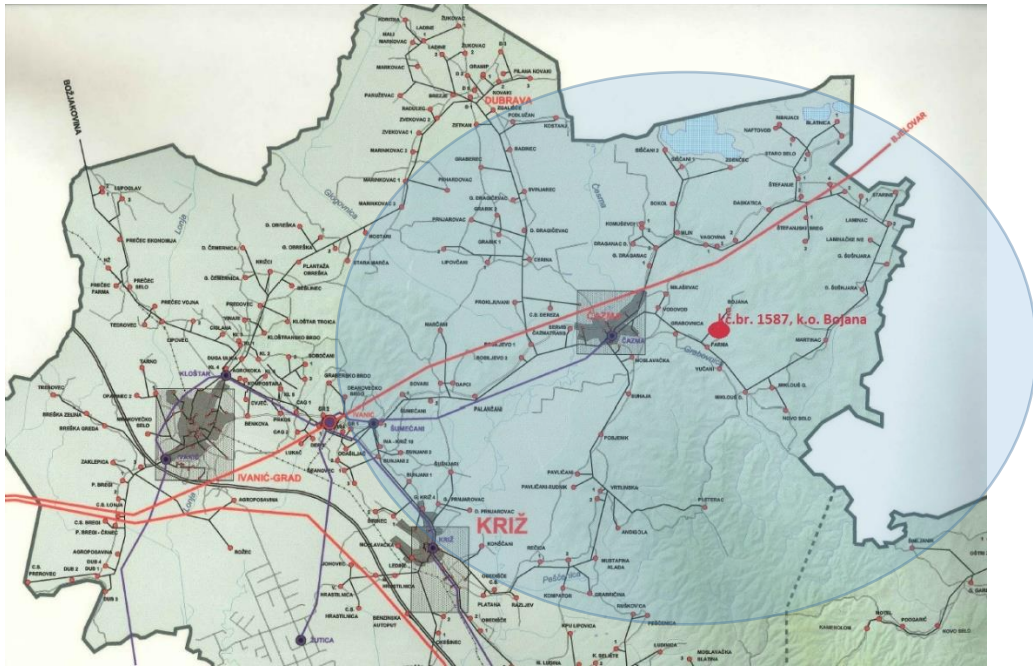
TS 35/10 kV Čazma nalazi se u pojnom području TS 110/35 kV Ivanić i u postojećem stanju nema zadovoljavajući rezervni smjer napajanja 35 kV vodom. Iz TS 35/10 kV Šumećani energija se dovodi radijalnim 35 kV vodom do distribucijskog područja TS 35/10 kV Čazma koja napaja korisnike na 10 kV pogonskom naponu. Srednje opterećenje transformatorske stanice je na razini 4 MVA dok je maksimalno izmjereno opterećenje na razini 5 MVA u slučaju prekapčanja 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 je u 10 kV izvod Martinac iz TS 35/10 kV Čazma.

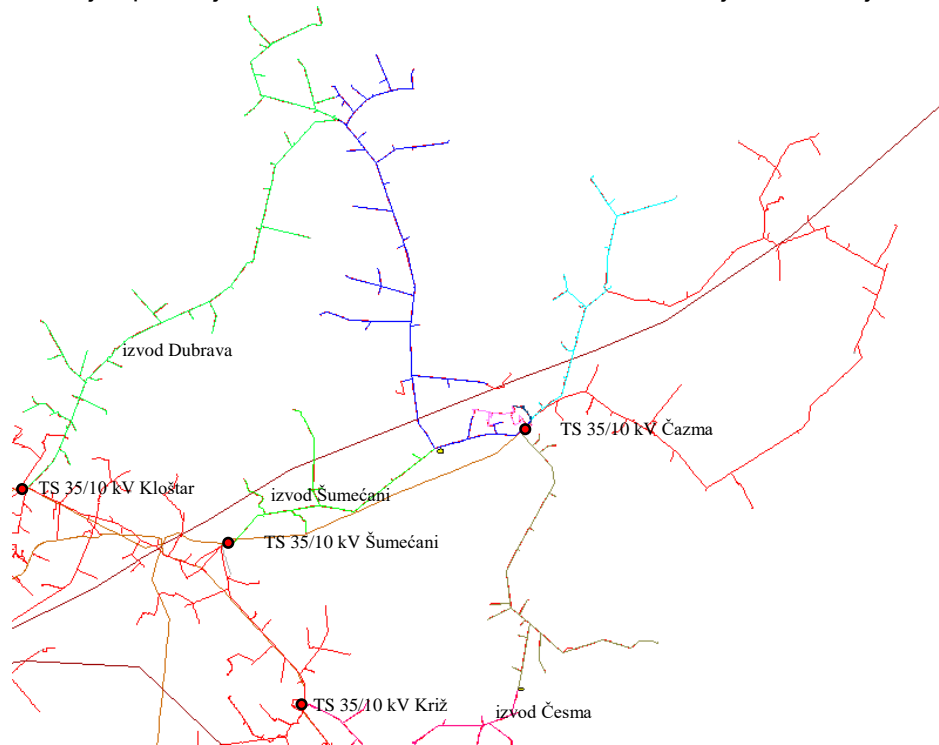
Od veza prema pojnim područjima okolnih TS 35/10 kV, TS 35/10 kV Čazma povezana je s 3 nadzemna voda na 10 kV pogonskom naponu i to prema pojnim područjima susjednih TS 35/10 kV:

1. Veza prema TS 35/10 kV Kloštar preko 10 kV izvoda Dubrava („gore“);
2. Veza prema TS 35/10 kV Šumećani preko 10 kV izvoda Šumećani („lijevo“);
3. Veza prema TS 35/10 kV Križ preko 10 kV izvoda Česma („dolje“);

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. Model mreže sa svim relevantnim elementima mreže je izrađen na georeferenciranoj podlozi (Slika 1) u programskom alatu za proračune elektroenergetskih mreža NEPLAN 5.5.5 (Slika 2).



Slika 1 Pojno područje TS 35/10 kV Čazma s označenom lokacijom BPP Bojana 2 MW



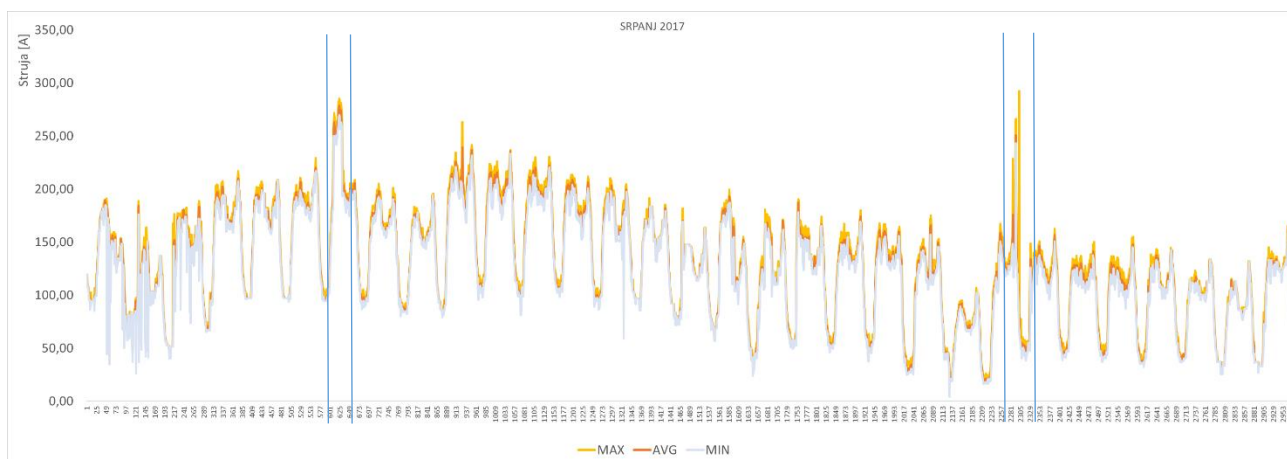
Slika 2 Model razmatranog opsega mreže u alatu za proračun elektroenergetskih mreža NEPLAN

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. Pregled maksimalno zabilježenih struja dan je u tablici ispod (Tablica 1) dok je mjesec s najvećim opterećenjem posebno izdvojen (Slika 3). Razlika između maksimalne i minimalne zabilježene struje unutar 15-minutnog perioda imaju prosječnu vrijednost 8,19 A. Razlika između maksimalne i prosječne vrijednosti u 15-minutnom intervalu je 4,23 A.

Histogram pojavljivanja (Slika 4) 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).

Tablica 1 Pregled maksimalnih struja u TS 35/10 kV Čazma u razmatranom razdoblju

Mjesec	Struja [I]	Datum [dd-mm-yyyy]	Sat [hh:mm:ss]	≈Snaga [MW]
06_2017	279,86	28-06-2017-sri	11:30:00	4,99
07_2017	285,56	07-07-2017-pet	11:45:00	5,09
08_2017	211,25	10-08-2017-čet	14:00:00	3,77
09_2017	240,89	29-09-2017-pet	10:45:00	4,30
10_2017	270,31	04-10-2017-sri	09:00:00	4,82
11_2017	225,49	28-11-2017-uto	18:30:00	4,02
12_2017	226,08	20-12-2017-sri	16:45:00	4,03
01_2018	233,33	22-01-2018-pon	07:15:00	4,16
02_2018	245,80	26-02-2018-pon	19:15:00	4,39
03_2018	198,24	21-03-2018-sri	15:15:00	3,54
04_2018	226,36	26-04-2018-čet	11:30:00	4,04
05_2018	201,94	11-05-2018-pet	15:45:00	3,60
06_2018	200,29	08-06-2018-pet	21:00:00	3,57



Slika 3 Krivulja kretanja opterećenja TS 35/10 kV Čazma za srpanj 2017. godine

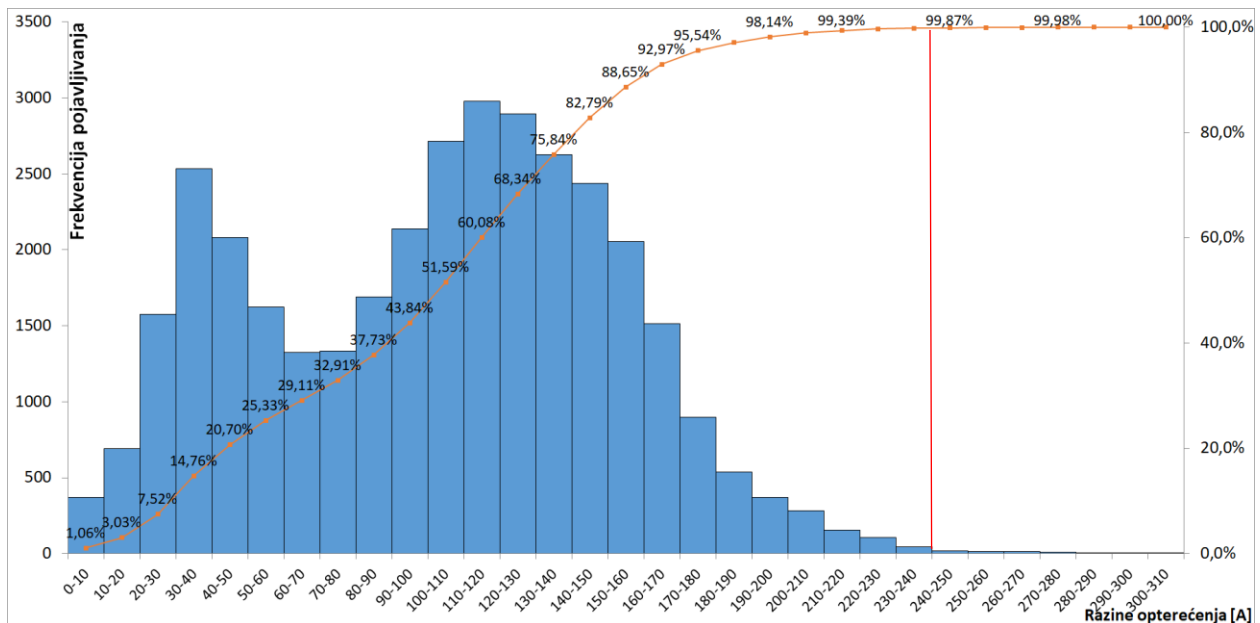
Podaci iz 2017./2018. godine prema razinama opterećenja odgovaraju podacima iz 2015. za maksimalno izmjereno opterećenje godine na temelju kojih je izrađen EOTRP za priključenje dodatnih 1 MW na postojeću snagu elektrane Bojana od 1 MW [6]. Normalno uklopno stanje na razini je opterećenja od 4,5 MW dok je pretpostavljeno da je stanje od 5,5 MW izvanredno.

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 za najnepovoljniji scenarij.

3.2 N-1 analiza

U normalnom pogonu za razmatrani scenarij maksimalnog opterećenja teret pojnog područja TS 35/10 kV Čazma je 4,5 MW uz proizvodnju od 2 MW što čini neto opterećenje od 2,5 MW. Postoje mjerenja u izvanrednim trenucima kada je opterećenje TS 35/10 kV Čazma na razini 5,5 MW uz nepoznato stanje BPP Bojana. Ovo opterećenje predstavlja granični scenarij maksimalnog opterećenja. Dodatno, uz razinu opterećenja veću od 2,5 MW moguća je evaluacija N-1 smjera napajanja za slučaja kada proizvodnja iz BPP Bojana ne bi bila dostupna. Postotci opterećenja koje je moguće zadovoljiti preko N-1 smjera izraženi su u odnosu na ovaj maksimalno izmjereni iznos.

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 ≈1,5% predstavlja postavku od 100% koja je za razmatrano vršno opterećenja ograničavajuća i predstavlja rubno nepovoljni scenarij.



Slika 4 Histogram pojavljivanja opterećenja TS 35/10 kV Čazma u razmatranoj godini

Analize tokova snaga kako je spomenuto provedena je za rubni scenarij koji predstavlja najnepovoljniji slučaj. 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.

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 2 Rekapitulacija N-1 proračuna

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 $\cos\phi=0,90$		10 kV mreža	35 kV mreža
I	TS 35/10 kV Kloštar	0%	27%	41%	2,4 MW (41%)	≈68%	Povećanje
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 omogućiti 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 mreže koji ne razmatra stanje u 0,4 kV mreži.

4. TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA POTENCIJALNIH RJEŠENJA

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 na 35 kV vodu te je potrebna investicija u naprednu zaštitu koja bi omogućila paralelni pogon 10 kV mreže (odabrani 10 kV N-1 vod) i 35 kV mreže.

Stoga je procijenjeni iznos investicije u naprednu zaštitu od $\approx 0,5$ 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.

Razmotreni su sljedeći slučajevi potencijalnih ulaganja u mrežu na području TS 35/10 kV Čazma s kojima se omogućava pričuveni smjer napajanja za potrošače tog pojnog područja:

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 3) prikazane su procjene troškova i karakteristike navedenih rješenja.

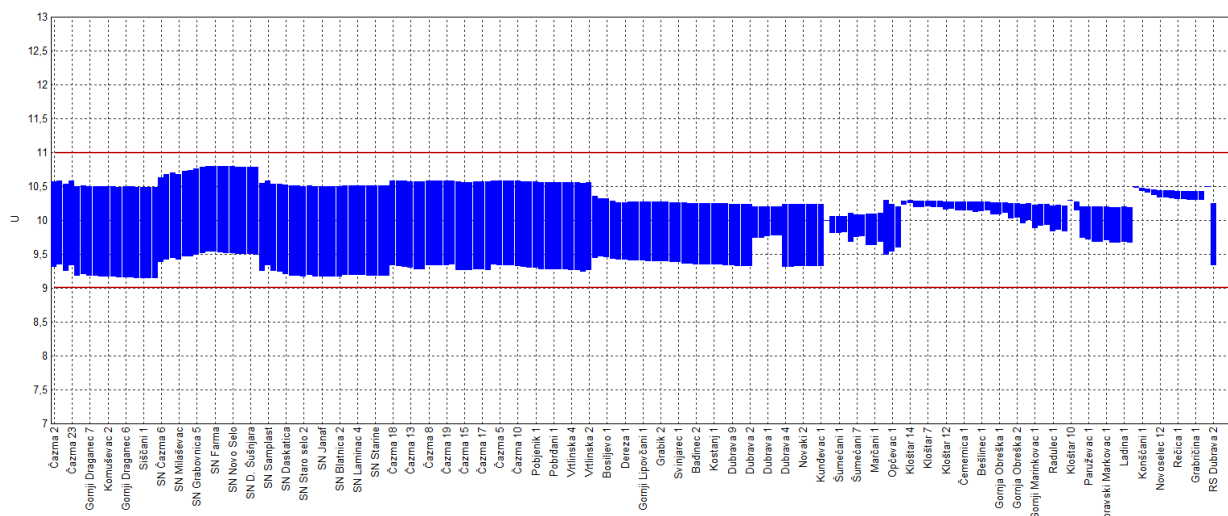
4. OPTIMIRANJE PARAMETARA BATERIJSKOG SPREMNIKA

4.1. Rezultati jednostavnog proračuna

Rezultati jednostavnog proračuna s baterijskim spremnikom s konstantnim $\cos\phi$ prikazani su na slici u nastavku (Slika 5). Ovaj proračun je proveden kako bi se mogla provesti usporedba puno preciznijeg proračuna kroz optimizacijski postupak koji uvažava sva ograničenja tokova snaga kao i proračun s dnevnim krivuljama opterećenja iz NEPLAN programskog alata. Jednako tako pretpostavljeni kapacitet baterije od 4 MWh dostatan je za 2 sata autonomije uz vršno opterećenja u punom trajanju ili prosječno 3 sata autonomije. Stacionarno stanje (za svaki 15-minutni period) je zadovoljavajuće u velikom dijelu mreže u svakom proračunu strujno-naponskih prilika za bilo koji trenutak kvara prema modeliranoj krivulji opterećenja. Rezultati stacionarnog pogona pokazuju se samo za jedan, najpovoljniji, smjer napajanja iz TS 35/10 kV Šumećani. Spremnik energije spojen je na mrežu i puni se u pogodnim trenutcima čiji rezultati su prikazani kroz optimizacijski proračun. Dodatno, detaljno optimalno dimenzioniranje spremnika bit će izvršeno istim optimizacijskom algoritmom koji je opisan u nastavku

Tablica 3 Rekapitulacija tehno-ekonomske analize

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 područje 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 Šumečani ≈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 Šumečani ≈0,5 mil kn	- mogućnost brzog dovršetka projekta - mogućnost korištenja spremnika za regulaciju napona, smanjenje gubitaka, pružanje frekvencijske rezerve HOPS-u	- 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	- povećana mogućnost integracije OIE i DG - istraživački i znanstveni potencijal	- trošak - složenija zaštita 35 kV i dijela 10(20) kV mreže - nova tehnologija - nedostatak pogonskog iskustva



Slika 5 Raspon napona u mreži sa spremnikom energije 2000 kW i $\cos\phi=0,9$ i elektranom BPP Bojana snage 2 MVA za slučaj napajanja preko 10 kV izvoda Čazma iz TS 35/10 kV Šumečani

4.2. Rezultati optimiranja parametara baterijskog spremnika

Za rješavanje tokova snaga se osim iteracijskih mogu koristiti i optimizacijske metode koje su nelinearne zbog kvadratnih ograničenja (umnožak dviju strukturnih varijabli).

Distflow model koji opisuje tokove snaga prilagođene distribucijskoj mreži i optimizacijskim proračunima te čija je prilagodba stožastom programiranju korištena u ovom radu [7].

Za dva čvorišta i i j povezana impedancijom $Z_{ij} = R_{ij} + X_{ij}$ između kojih teče snaga $S_{ij} = P_{ij} + Q_{ij}$ i struja I_{ij} tada se može koristeći *Distflow* jednadžbe napisati:

$$U_j^2(t) = U_i^2(t) - 2(P_{ij}(t)R_{ij} + Q_{ij}(t)X_{ij}) \quad (1)$$

$$I_{ij}(t) \geq \frac{1}{U_i^2(t)}(P_{ij}^2(t) + Q_{ij}^2(t)) \quad (2)$$

Dvije gornje jednadžbe tvore nelinearni i nekonveksni problem koji je potrebno modificirati kako bi se mogao lakše riješiti. Uvode se sljedeće dvije aproksimacije

$$i_{ij}(t) = I_{ij}^2(t) \quad (3)$$

$$v_i(t) = U_i^2(t) \quad (4)$$

Time jednadžba (2) postaje linearna:

$$v_j(t) = v_i(t) - 2(P_{ij}(t)R_{ij} + Q_{ij}(t)X_{ij}) \quad (5)$$

A dodanom pretpostavkom $U_i(t) = 1$ se jednadžba (3) svodi na stožasti konveksni oblik:

$$i_{ij}(t) \geq (P_{ij}^2(t) + Q_{ij}^2(t)) \quad (6)$$

Jednadžbe (5) i (6) tvore aproksimirani konveksni oblik problema tokova snaga između dva čvorišta koji se može riješiti u većini današnjih programa za optimiranje. Iz svojstva konveksnosti slijedi jamčeni optimum što nije slučaj u inicijalnom modelu opisanom jednadžbama (1) i (2).

Koristeći prethodno opisan skup jednadžbi za pad napona i struju između dva čvorišta u mreži, primjenom I. Kirchoffovog zakona dobiva se skup jednadžbi kojim se opisuju strujno naponske prilike u cijeloj mreži.

$$P_{ij}(t) = P_{teret}(j) - P_{DG}(j,t) - P_{spremnik}(j,t) + i_{ij}(t)R_{ij} + \sum_{j=m} P_{m-n} - \sum_{j=n} P_{m-n} \quad (7)$$

$$Q_{ij}(t) = Q_{teret}(j) - Q_{DG}(j,t) - Q_{spremnik}(j,t) + i_{ij}(t)X_{ij} - v_i(t)Bsh_{i-j} + \sum_{j=m} Q_{mn} - \sum_{j=n} Q_{mn} \quad (8)$$

Gornjim jednadžbama definira se zakon očuvanja energije u svakom čvorištu mreže odnosno, radna snaga P_{ij} koja teče granom prikazanom na slici dolje jednaka je snazi tereta, proizvodnji distribuirane proizvodnje, snazi razmjene spremnika energije u krajnjem čvorištu te odlaznim snagama u idućim granama te gubicima koji se javljaju.

Model vrijedi i za dvosmjerne tokove snaga:

$$P_{ij}(t) \in (-\infty, +\infty) \quad (9)$$

$$Q_{ij}(t) \in (-\infty, +\infty) \quad (10)$$

Model spremnika koji se koristi u ovoj studiji je linearan. Spremnik ima mogućnost punjenja i pražnjenja i to radne i jalove energije kao što je prikazano u iduće dvije jednadžbe:

$$P_{spremnik}(i,t) \in (-\infty, +\infty) \quad (11)$$

$$Q_{spremnik}(i,t) \in (-\infty, +\infty) \quad (12)$$

Jednadžba (13) opisuje punjenje i pražnjenje spremnika energije pri čemu je τ trajanje jednog vremenskog perioda koji se promatra u modelu.

$$W_{spremnik}(i,t+1) = W_{spremnik}(i,t) + (\eta_{punjenje} P_{spremnik,punjenje} - \eta_{pražnjenje} P_{spremnik,pražnjenje})\tau \quad (13)$$

Ovisno o tehnologiji spremnika energije koji se koristi moguće je ograničiti promjenu izlazne snage i prema gore i prema dolje.

$$P_{spremnik}(i, t+1) - P_{spremnik}(i, t) \leq R_{spremnik, up} \quad (14)$$

$$P_{spremnik}(i, t+1) - P_{spremnik}(i, t) \geq -R_{spremnik, down} \quad (15)$$

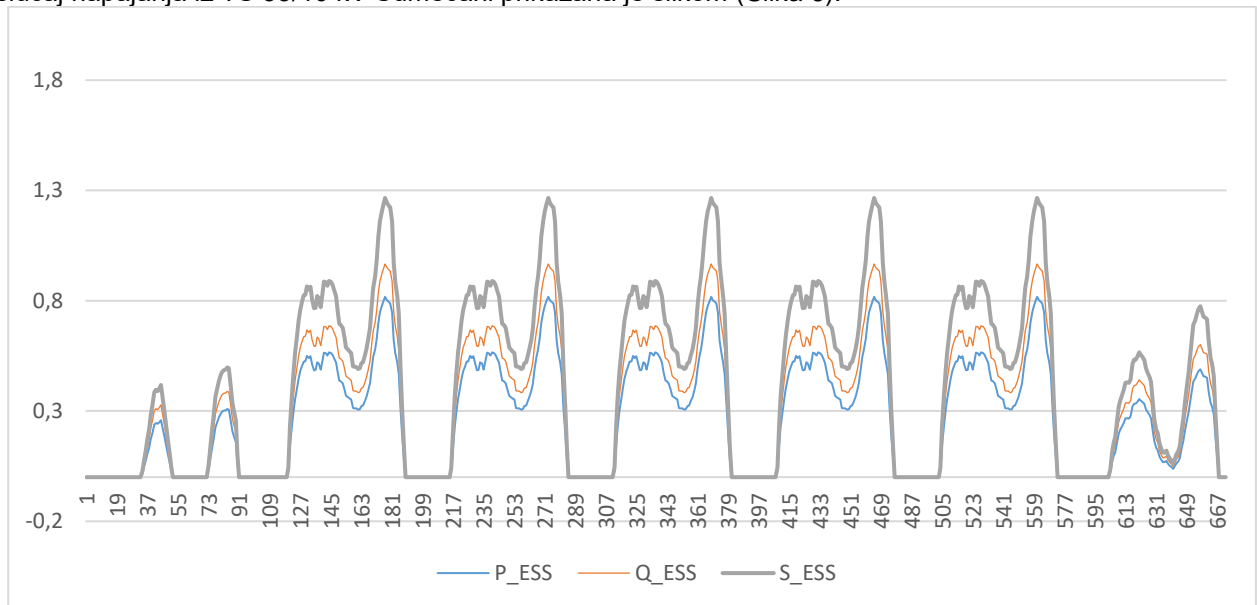
Korištena je razvijena aplikacija koja prihvaća tekstualnu datoteku s elementima mreže i mjerenjima (opterećenjima i proizvodnjama). U NEPLAN programskom alatu je napravljen dodatak koji kreira takve datoteke, a optimiranje se vrši u optimizacijskom okruženju FICO Xpress.

Spremnik energije u ovome slučaju ima mogućnost rada s promjenjivim faktorom snage, odnosno može raditi u sva četiri kvadranta snage. Upravo ova 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 4).

Tablica 4 Rezultati optimiranja parametara spremnika baterija

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

Krivulja tjedne izlazne snage (radne i jalove) za simulirano opterećenje kroz optimizacijski algoritam za slučaj napajanja iz TS 35/10 kV Šumećani prikazana je slikom (Slika 6).



Slika 6 Krivulja tjedne izlazne snage baterijskog spremnika– optimizacijski algoritam

6. ZAKLJUČAK

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 pojnih područja koja pričuvni smjer ostvaruju iz TS 35/10 kV Čazma.

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). Osiguranje rezervnog smjera napajanja jest povećanje pouzdanosti mreže te bi prema tome u skladu s EU direktivom vezanom za vlasništvo ODS-a nad spremnikom energije, baterijski spremnik bio dopuštena investicija ODS-a. Dodatno, spremnik energije moguće je koristiti za sekundarne namjene, prvenstveno za regulaciju napona i jalove snage, upravljanje gubicima te pružanje frekvencijske rezerve i/ili energije uravnoteženja HOPS-u.

Dodatno, pilot projektom kojim se baterijskim spremnikom energije omogućava povećanje pouzdanosti napajanja, izbjegavanje otočnog rada i integracija dodatnih obnovljivih izvora energije omogućilo bi se stjecanje znanja koje bi se moglo primijeniti i na ostala područja u Hrvatskoj. Pogotovo su interesantni otoci koji imaju slabe pričuvne smjerove napajanja, malen broj sati s maksimalnim opterećenjem i velik potencijal za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora.

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) te uz to stvoriti vrijedno pogonsko iskustvo.

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 te u sklopu H2020 projekta CROSSBOW–CROSS BOrder management of variable renewable energies and storage units enabling a transnational Wholesale market (Grant No. 773430).

8. LITERATURA

- [1] X. Zhou, H. Cui, Y. Ma and Z. Gao, "Research review on smart distribution grid," 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, pp. 575-580., 2016
- [2] N. Holjevac, T. Capuder, N. Zhang, I. Kuzle, C. Kang, „Corrective receding horizon scheduling of flexible distributed multi-energy microgrids“, Applied Energy, Vol 207, pp. 176-194, 2017
- [3] O. Ma and K. Cheung, „Demand Response and Energy Storage Integration Study“, U.S. Department of Energy (DOE), 2016
- [4] M. Zidar, P. S. Georgilakis, N. D. Hatzigiorgiariou, T. Capuder and D. Škrlec, "Review of energy storage allocation in power distribution networks: applications, methods and future research," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 10, no. 3, pp. 645-652, 18 2 2016.
- [5] EU Komisija paket direktiva: „Čista energija za sve. Europljane“ (COM(2016)860), 30.11.2016.
- [6] Elaborat optimalnog tehničkog rješenja priključenja na elektroenergetsku mrežu: Elektrana na bioplin BPP Bojana (2000 kW), FER, 2015.
- [7] M. Zidar, T. Capuder, D. Škrlec, „Optimiranje smještaja i veličine spremnika energije korištenjem metode stošca drugog reda“, HO CIRED 2016., Osijek, Croatia, 2016.