doi: 10,46793/EEE26-3.58V

Stručni rad
UDK 621.311.243:621.355

Projektovanje i realizacija sistema baterijskog skladišta električne energije snage 500 kW i kapaciteta 1075 kWh

Miodrag Vuković[*], Željko V. Despotović[**], Manojlo Šoškić[***], Stanko Vuković[*]

[*] Conseko d.o.o, Beograd, Srbija
[**] Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu,
[***] Naftna Industrija Srbije –NIS a.d., Novi Sad

Rezime **–** U radu su prikazani projektovanje i realizacija baterijskog skladišta električne energije, tzv. *Battery Energy Storage System* (BESS) snage 500kW i kapaciteta 1075kWh koje predstavlja deo sistema fotonaponske elektrane (FNE) Smederevo snage 3159 kWp (2450kW AC) koji je vlasništvo firme NIS a.d. Novi Sad. Predviđeni sistem baterijskog skladišta sastoji se od pet baterijskih modula pojedinačne snage 100 kW i kapaciteta 215 kWh, čime se postiže ukupan kapacitet litijumskih baterija (LiFePO4) od 1075 kWh. U okviru baterijskog skladišta je predviđen multi-level bidirekcioni energetski pretvarač koji obezbeđuje dvosmerni protok električne energije. Svi predviđeni moduli u sklopu sistema baterijskog skladišta poseduju sledeće sertifikate: CE -EMC, CE -LVD, IEC 62619, IEC 63056, CEI-016, UN 38.3, nCEI-021, što potvrđuje usklađenost sa međunarodnim standardima bezbednosti. Između ostalog, u radu su predstavljeni detalji topologije skladišta i prikaz konfiguracije koja je projektovana i prilagođena FNE Smederevo. Celokupan rad sistema BESS se upravlja putem *Energy Management System* (EMS) kontrolera, koji je u stalnoj komunikaciji sa kontrolerom solarne elektrane, NIS-ovom energetskom platformom za praćenje rada FNE, RTU jedinicom (daljinska stanica EDS-a) i SCADA sistemom operatora sistema.

Ključne reči – baterijsko skladište električne energije, fotonaponske elektrane, balansiranje, baterijski kontroler, energetska elektronika, energetski pretvarači

I UVOD

Intenzivni porast proizvodnje energije iz obnovljivih izvora (prevashodno sunca i vetra) pokrenuo je odgovarajuću potražnju za sistemima za skladištenje energije u baterijama (BESS) tzv. *Battery Energy Storage System*s (BESS). U cilju smanjenja potrošnje fosilnih goriva, novim ciljevima zemalja u vezi sa klimatskim promenama, nižim troškovima baterija i nagli porast proizvodnje solarne i energije vetra, potreba za sistemima za skladištenje nikada nije bila veća. Sistemi koji generišu i skladište energiju sve više postaju standard i većina predstojećih izgradnji skladišta energije sa dvosmernim (tzv. *bidirekcionim*) tokom energije biće prilagođena solarnim i vetroelektranama i koristiće se u slučajevima kada za to postoje zahtevi [1-5].

Energetska industrija je podeljena u tri ključne kategorije: rezidencijalna, komercijalna ili industrijska i komunalna. Principski prikaz ove podele i njena povezanost se obnovljivim izvorima energije (OIE) je dat na blok dijagramu na Slici 1.

Proizvodnja energije iz obnovljivih izvora beleži porast u svim ovim segmentima, što uslovljava povećanu potražnju za skladištenjem električne energije. Na primer, korišćenjem mikro-mreža, domaćinstva i preduzeća su počela da proizvode i skladište solarnu energiju kako bi uštedeli novac i obezbedili rezervno napajanje kada za tim ima potrebe [6]. Takođe, neke zemlje pružaju podsticaje za instaliranje solarnih panela kako bi se smanjilo opterećenje elektroenergetske mreže ili prelazak na električna vozila [7] kako bi se postigli ciljevi neto nulte emisije.

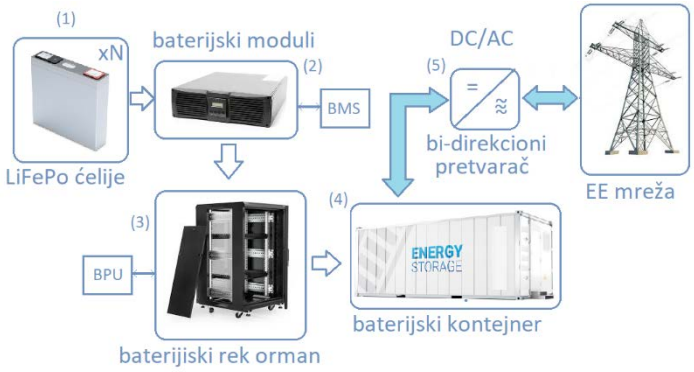
Iz perspektive velikih kompanija iz elektroenergetskog sektora i komunalnih usluga, BESS sistem nudi povećanje kapaciteta i niže troškove jer poseduje uskladištenu energiju dostupnu kada je potražnja velika [8-9]. Za razliku od tradicionalnih oblika proizvodnje, BESS sistemima nije potrebno dugo vreme za uključivanje ili isključivanje. Ova mogućnost je u značajnoj meri poboljšana upotrebom uređaja energetske elektronike i energetskih pretvaračkih sistema koji se razvijaju rapidno. Na ovaj način ovi sistemi nude brzo i pouzdano rešenje za balansiranje električnog sistema po potrebi [4], [9].



Slika 1. Principski blok dijagram tri ključna pravca energetske industrije i njihova povezanost sa OIE

Sistem za skladištenje energije u baterijama je veliki sistem baterija povezan na električnu mrežu. Principska blok šema jednog tipičnog sistema sa litijumskim baterijama kao osnovom

energetskog skladišta je data na Slici 2. Kao što se vidi sa ove slike glavne komponente ovog sistema su: (1) pojedinačne baterijske ćelije (standardno Li-jonske), koje se nalaze u baterijskom sistemu, pretvaraju hemijsku energiju u električnu energiju, (2) baterijski moduli koji se sastoje od ćelija raspoređenih u serijske i paralelne kombinacije; baterijski moduli takođe sadrže sistem za upravljanje baterijama tzv. *Module Battery Managemst System* (MBMS) koji prati i kontroliše rad ovih ćelija, (3) baterijski rek, koji sadrži nekoliko modula povezanih serijski i jedinicu za zaštitu baterije tzv. *Battery Protection Unit* (BPU), u praksi poznatu i kao rek kontroler baterije, (4) kontejner koji sadrži nekoliko rekova u paraleli i može imati dodatne komponente koje pomažu u upravljanju ili kontroli modula unutar kontejnera, (5) DC/AC energetski pretvarač, tzv. *Power Conversion System* (PCS) ili dvosmerni invertor koji pretvara jednosmerni (DC) napon proizveden na baterijama u naizmenični (AC) napon koji se isporučuje elektroenergetskoj mreži ili industrijskim i rezidencijalnim korisnicima. Takođe, ovaj pretvarački sistem puni baterije uzimajući energiju iz elektroenergetske mreže kada je to potrebno. Treba napomenuti da zaštitna jedinica BPU uključuje sistem za upravljanje baterijama (BMS) i prati napon, temperaturu i stanje napunjenosti baterije. Takođe reguliše cikluse punjenja i pražnjenja baterije.



Slika 2. Principski prikaz standardnog BESS

BESS obično sadrži i neke bezbednosne sisteme kao što su sistem za kontrolu požara, detektor dima i sistem za kontrolu temperature ili čak sisteme za hlađenje, grejanje, ventilaciju i klimatizaciju. Šta je uključeno zavisiće od toga šta je potrebno za održavanje bezbednog i efikasnog rada BESS-a.

Sistemi za skladištenje energije u baterijama (BESS) zahtevaju sveobuhvatnu strategiju zaštitnih kola. U okviru BESS-a, glavna područja zahtevnog projektovanja su zaštita od prekomernih struja, struje zemljospojeva, pojave luka i lučnog bljeska i prenaponske zaštite koje u ovim sistemima treba da obezbede zaštitu opreme i sistema od kratkotrajnih prolaznih prenapona.

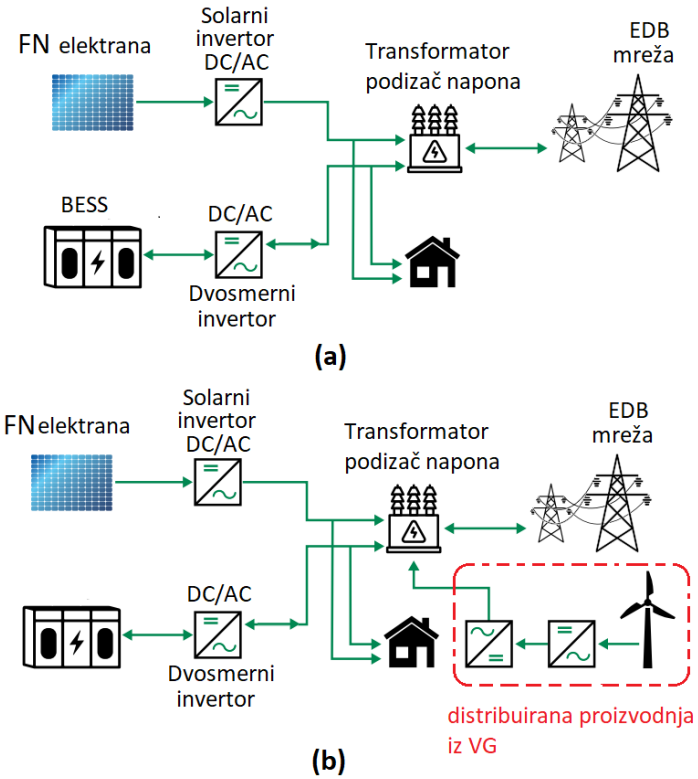
U ovom radu su prikazani rezultati projektovanja i realizacije baterijskog skladišta električne energije-BESS snage 500kW i kapaciteta 1075kWh. Baterijsko postrojenje predstavlja deo sistema u fotonaponske elektrane (FNE) Smederevo snage 3159 kWp (2450kW AC) koji je vlasništvo firme NIS a.d. Novi Sad.

U okviru baterijskog skladišta je predviđen „*multi-level*“ dvosmerni energetski pretvarač koji obezbeđuje dvosmerni protok električne energije. Između ostalog, u radu su predstavljeni detalji topologije skladišta i prikaz konfiguracije koja je projektovana i prilagođena FNE Smederevo.

Projektom je predviđeno da se celokupan rad sistema BESS upravlja putem odgovarajućeg kontrolera, tzv. *Energy Management System* (EMS), za koji je predviđena komunikaciji sa kontrolerom FNE, NIS-ovom energetskom platformom za praćenje rada FNE, zatim sa RTU jedinicom (daljinska stanica EDS-a) i SCADA sistemom operatora sistema.

II Osnovne arhitekture BESS sistema

Postoje dva opšta načina na koja su komponente sistema za skladištenje energije povezane – ili naizmeničnom strujom (AC) ili jednosmernom strujom (DC). Razlika leži u putanji kojom električna energija prolazi nakon što se proizvede. Iako solarni paneli generišu jednosmernu struju, a solarne baterije skladište električnu energiju u jednosmernoj struji, krajnjim korisnicima je potrebna naizmenična električna energija[10]. Stoga, je elektroenergetsko pretvaranje neophodno i postoje različiti načini da se ono ostvari. U nastavku je dat kraći pregled dve osnovne arhitekture i dato kraće poređenje u pogledu prednosti i mana ovih sistema.



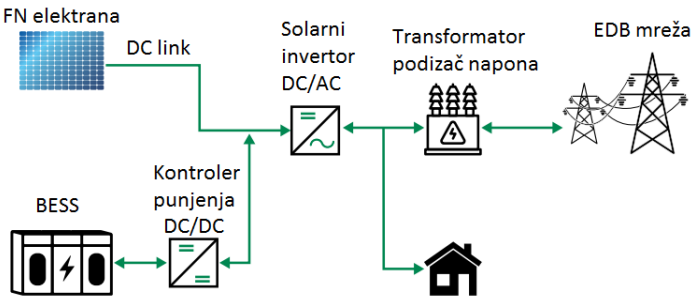
Slika 3. AC spregnuti fotonaponski sistem sa BESS; (a) bez AC distribuirane proizvodnje, (b) sa distribuiranom proizvodnjom na AC strani (vetrogenerator)

AC spregnuti sistem je prikazan na Slici 3. Na Slici 3(a) je prikazan sistem bez distribuirane proizvodnje na AC strani (odsustvo vetrogeneratorskih jedinica), dok je na Slici 3(b) prikazan sistem sa distribuiranom proizvodnjom na AC strani (predstavljenom vetrogeneratorskim sistemom),

Generalno, za oba prethodna slučaja, prikazani sistem na Slici 3, (koga čine FNE + BESS) sadrži dva DC/AC invertorska pretvarača: fotonaponski i bi-direkcioni (dvosmerni), pri čemu je ovaj drugi u kombinaciji sa baterijskim skladištem-BESS. Ovaj sistem nudi relativno visoku fleksibilnost, jednostavnu instalaciju, naročito za naknadne tzv. *retrofitne ugradnje*, odnosno idealan je za rekonstrukcije.

Naročito je ova arhitektura isplativa ako već postoji fotonaponski sistem. Takođe se može zadržati mrežni invertor u cilju uštede troškova. Sistem je manje efikasan jer se energija koju koriste baterije više puta konvertuje. Svaki nivo konverzije stvara i više gubitaka u sistemu. Tendencija proizvođača invertora je razvoj ovih modula sa visokim stepenom iskorišćenja (standardno iznad 96%).

Na Slici 4 je prikazana arhitektura DC spregnutog fotonaponskog sistema. Ovaj sistem je baziran na jednom invertoru za napajanje opterećenja, što je povoljno sa finansijskog aspekta (DC/DC kontroler punjenja je jeftiniji od invertora).



Slika 4. DC spregnuti fotonaponski sistem sa BESS

Manji broj DC/AC pretvarača (invertora) smanjuje troškove eksploatacije i održavanja. U ovom sistemu su iz ovog razloga manji gubici energije. Kraće kablovske trase između FNE i BESS doprinose smanjenju gubitaka. Ova arhitektura nije primerena za *retrofitne* sisteme (sisteme za rekonstrukciju). Potrebna je zamena postojećeg invertora, a u mnogim slučajevima je potrebno ostvariti rekonfiguraciju ožičenja fotonaponskih nizova, a i dobija se složenija instalacija sa postojećim fotonaponskim sistemom.

III Tehnički opis projektovanog BESS u sklopu FNE

U ovom poglavlju je dat opšti opis tehničkog rešenja baterijskog skladišta električne energije (BESS). Uz solarnu elektranu na istoj građevinskoj parceli, predviđeno je postavljanje baterijskog skladišta električne energije nazivne snage 500 kW i ukupnog skladišnog kapaciteta 1075 kWh. Sistem BESS je definisan na osnovu tehničkog zadatka Naručioca-NIS a.d. za nabavku, montažu i puštanje u rad baterijskog skladišta po principu „ključ u ruke“, kao podrške optimalnom radu solarne elektrane FNE Smederevo, instalisane snage 3118.5 kWp (2475 kW AC).

Na Slici 5 je prikazana topologija sistema BESS, 500kW/1075kWh.

Predviđeni sistem skladišta sastoji se od pet baterijskih modula tipa FLEX 215 AIO, pojedinačne snage 100 kW i kapaciteta 215 kWh, čime se postiže ukupan kapacitet od 1075 kWh, a izlazna snaga BESS sistema odgovara snazi mrežnog transformatora prividne snage od 500 kVA.

Svaki modul je smešten u samostalni čelični orman dimenzija 160 cm × 114 cm × 224 cm, sa stepenom zaštite IP55. Baterijski moduli su bazirani na litijum-gvožđe-fosfatnim ($LiFePO_4$) ćelijama.

Pored baterijskih modula, sistem obuhvata i energetski transformator nominalne snage 500 kVA, naponskog odnosa 400 V/800 V, frekvencije 50 Hz, sa spregom zvezda–zvezda Yy0. Transformator služi za prilagođavanje napona BESS modula na naponski nivo FNE i nalazi se u samostalnom kontejneru neposredno pored BESS modula.

Baterijsko skladište se fizički smešta u neposrednoj blizini kontejnerske transformatorske stanice FNE, na delu slobodne površine u okviru definisane građevinske parcele, u skladu sa ograničenjima infrastrukturnih koridora (gasovod, produktovod i sl.).

Svi moduli i oprema BESS sistema predviđeni u projektovano rešenje FNE biće priključeni na sabirnice 800 V u okviru transformatorske stanice 0,8 kV/10 kV, preko trofaznog energetskog transformatora 0,4kV /0,8kV, 50Hz.

Celokupan rad BESS sistema se upravlja putem EMS (*Energy Management System*) kontrolera proizvodnje Eniris (*SmartgridOne*), koji je u stalnoj komunikaciji sa:

- kontrolerom solarne elektrane,
- RTU jedinicom (daljinska stanica EDS), i
- SCADA sistemom operatora sistema.

EMS omogućava konfigurisanje više režima rada skladišta (punjenje/pražnjenje, kontrola snage i frekvencije, korekcija faktora snage), kao i prilagođavanje dinamičkom radu FNE i potrebama elektrodistributivne (EDB) mreže.

IV Tehnički opis baterijskog sistema

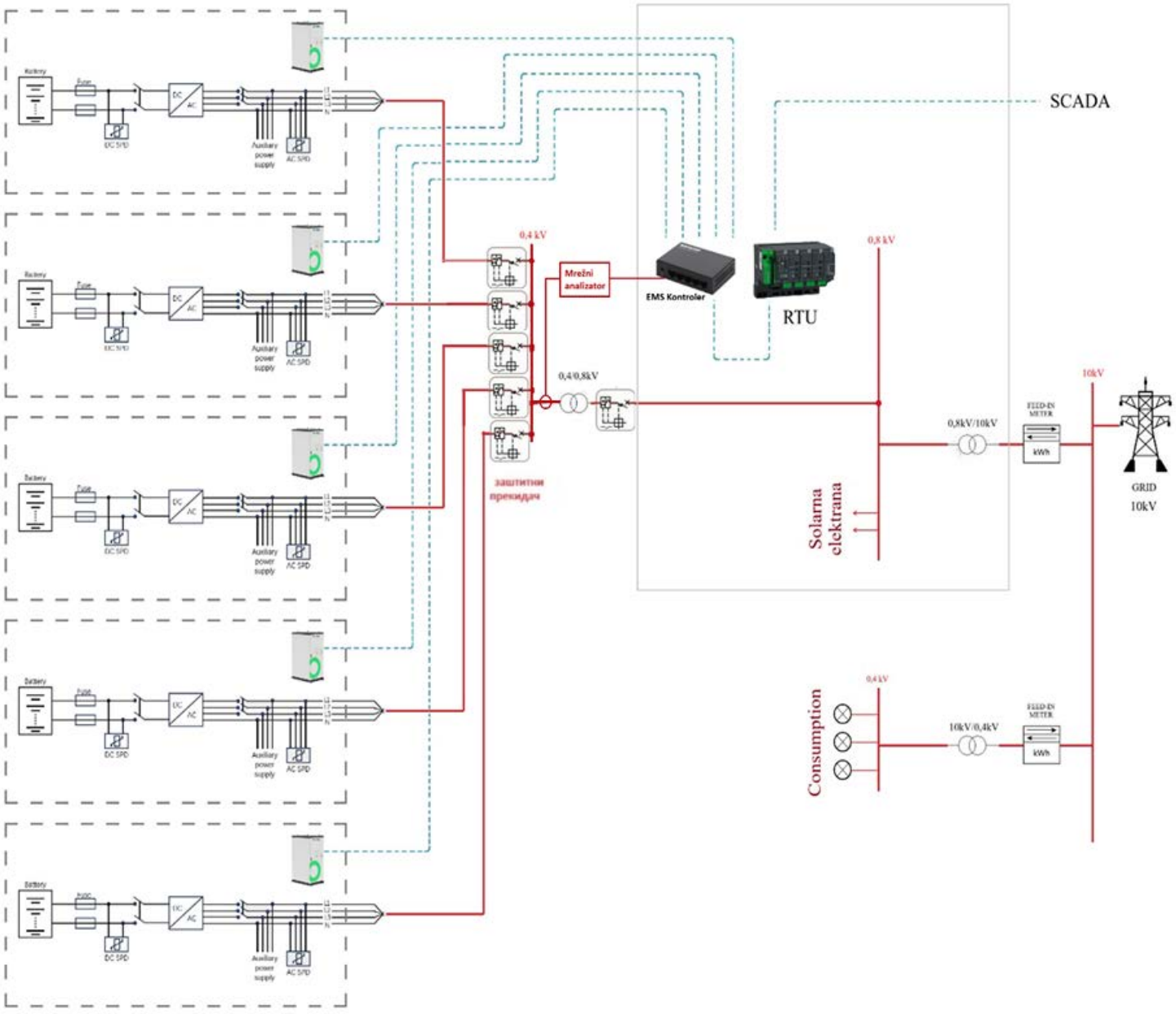
Baterijski moduli su povezani serijski i kombinovani su u rekovima. Serijska veza rezultuje višim naponom sistema. Paralelna veza nekoliko rekova povećava performanse i kapacitet skladištenja. Trofazni energetski pretvarač vrši dvosmernu konverziju energije (DC←→AC) i pored same baterije, presudan je za protok snage i performanse. Na Slici 6 je prikazan izgled projektovanog baterijskog rek ormana[13-14].

Svaki baterijski modul sadrži sledeće komponente:

- $LiFePO_4$ baterijske ćelije, kapaciteta 280 Ah, povezane u seriju od 15 jedinica u jedan visokonaponski string (800 Vdc),
- PCS (*Power Conversion System*) – dvosmerni AC/DC i DC/AC pretvarač koji omogućava punjenje i pražnjenje baterija,
- BMS (*Battery Management System*) – sistem za nadzor i upravljanje radom baterija, uključujući kontrolu napona, struje, temperature i statusa napunjenosti baterijskih modula,
- GPC (*Grid Power Control*) modul – komponenta za upravljanje energetskom interakcijom sa mrežom, odgovoran za stabilnost i usklađenost sa zahtevima mreže,
- Dvopolni i trofazni zaštitni prekidači sa zaštitom od

preopterećenja i kratkih spojeva na AC i DC stranama,
- FSS (*Fire Suppression System*) – automatizovani sistem za otkrivanje i gašenje požara pomoću aerosola unutar svakog ormana, aktiviran senzorima dima i temperature,
- Klima uređaj – sistem za kontrolu temperature u ormanu, sa vazdušnim hlađenjem.

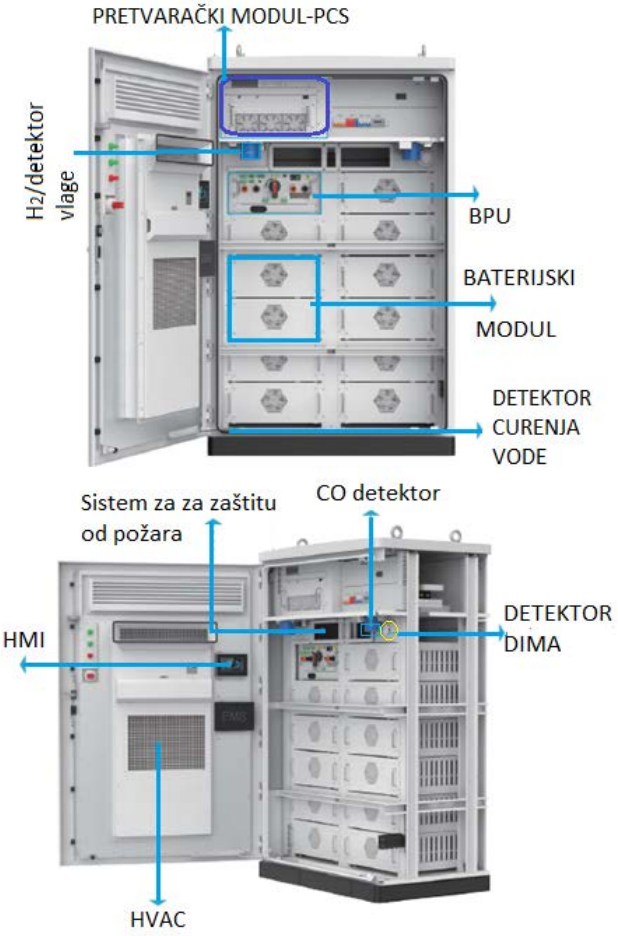
Svi projektovani moduli poseduju sledeće sertifikate: CE -EMC, CE -LVD, IEC 62619, IEC 63056, CEI-016, UN 38.3, CEI-021, što potvrđuje usklađenost sa međunarodnim standardima bezbednosti.



Slika 5. Topologija projektovanog BESS 500kW/1075 kWh, povezivanje na EEM i komunikacione veze u sistemu

Svaki baterijski modul kapaciteta 100 kW/215 kWh priključuje se na niskonaponsku sabirnicu napona 400 V preko kablova tipa XP00 4×95 mm², 1 kV, Cu koji se polažu u podzemne kablovske kanale u zaštitnoj PVC ili PEH cevi. Na strani transformatora, svaki od ovih vodova zaštićen je četvoropolnim kompakt prekidačem nazivne struje 200 A, a maksimalne radne struje 160 A, kao što je prikazano na Slici 5.

Svaka baterijska jedinica poseduje sopstveni dvosmerni energetski pretvarač (PCS – *Power Conversion System*), koji konvertuje jednosmernu struju u naizmeničnu (DC/AC) prilikom pražnjenja (invertorski režim), odnosno naizmeničnu u jednosmernu (AC/DC) prilikom punjenja (ispravljački režim). Kao ključna komponenta za upravljanje protokom energije, PCS ima presudnu ulogu u performansama i efikasnosti sistema.



Slika 6. Prikaz projektovanog rek ormana BESS[13-14]

Izlazni AC napon svakog PCS-a je 400 V, 50 Hz. Izlaz svih pet PCS jedinica paralelno se povezuje na niskonaponske sabirnice (0,4 kV), smeštene u ormanu energetskog transformatora 400 V/ 800 V, snage 500 kVA. Taj transformator služi za prilagođavanje naizmeničnog napona baterijskog sistema sa 400 V na 800 V, što je napon na koji je priključen srednjenaponski transformator 0,8 kV /10 kV u trafo-stanici solarne elektrane.

Na izlaznoj strani energetskog transformatora (sekundar 800 V), predviđena je zaštita priključnih kablova BESS-a tropolnim kompakt prekidačem sa prekostrujnom zaštitom nominalne struje 400 A, pri nazivnom naponu 800 V i frekvenciji 50 Hz.

BESS sistem je preko kablova XP00 1x240 mm², 1kV, Cu povezan sa sabirnicom 800 V na primarnoj strani transformatora 0,8 kV/10 kV. Na toj sabirnici se nalazi i priključak solarne elektrane snage 2475 kW, tako da su BESS i FNE direktno povezani paralelno na istu tačku u elektroenergetskom sistemu. Ovakva konfiguracija omogućava efikasnu razmenu energije i fleksibilno upravljanje energetskim tokovima preko EMS sistema.

Na Slici 7 je prikazan prednji izgled desnog dela baterijskog modula sa PCS i AC instalacijama. Na prednjem panelu se vide uređaji sa zaštitama i glavni prekidač. Treba napomenuti da su QF2 i QF3 su upareni preko „interlock“ zaštite.



Slika 7. Prikaz prednjeg izgleda baterijskog modula sa AC zaštitama (1) Glavni prekidač QF1 za AC vezu, (2) SCB1 automatski prekidač za odvodnik prenapona, (3) QF2 prekidač za napajanje sopstvene potrošnje (klime, BMS, osvetljenje i dr.), (4) SCB2 automatski za odvodnik prenapona sopstvene potrošnje, (5) QF3 kao rezerva i nije povezan sa bilo kojim instalacijama.

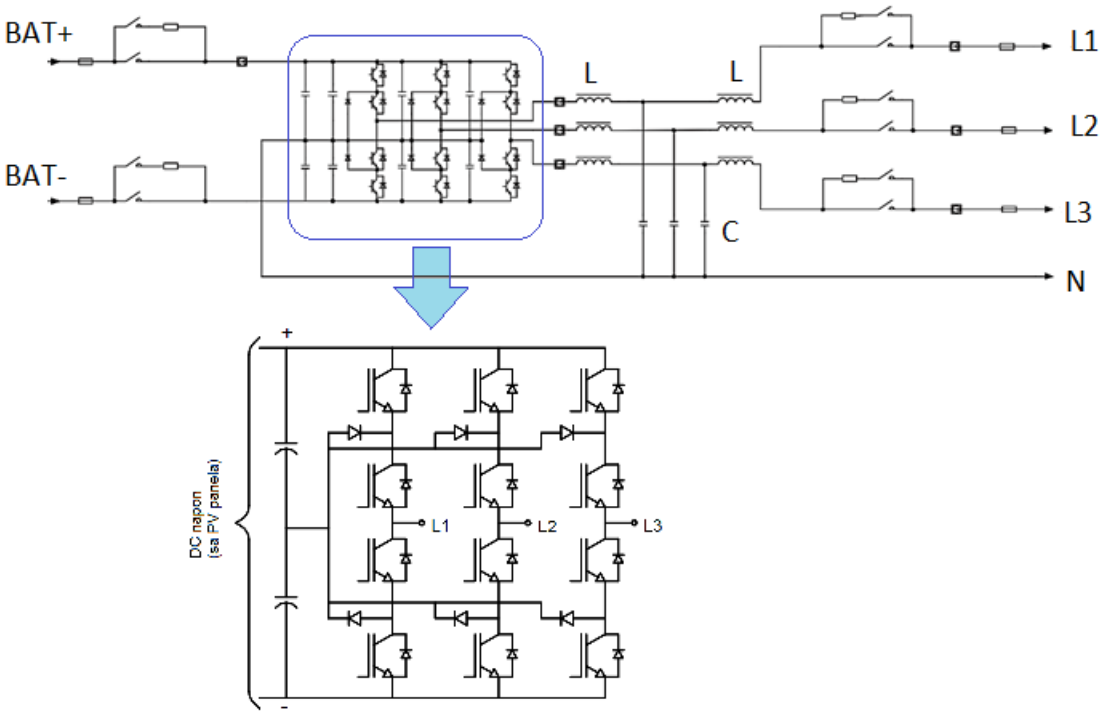
V BIDIREKCIONI ENERGETSKI PRETVARAČ

Energetski pretvarač u sistemu za skladištenje energije, tzv. PCS (*Power Conversion System*), kao što pokazuje Slika 8, je baziran IGBT topologiji sa tri nivoa i fiksiranom neutralnom tačkim (tzv. *„three-level neutral point clamped“*-3L NPC topologija) i može da kontroliše proces punjenja i pražnjenja baterije i da konvertuje naizmenični (AC) napon u jednosmerni (DC) i obrnuto. PCS se dakle sastoji od dvosmernog AC/DC konvertora, LCL filtra, drajvera za pobudu IGBT tranzistora i pripadajuće kontrolne jedinice. PCS kontrolna jedinica prima kontrolne instrukcije preko komunikacionog interfejsa, puni ili prazni bateriju i podešava aktivnu snagu i reaktivnu snagu na izlazu pretvarača.

PCS kontrolna jedinica energetskog pretvarača za skladištenje energije komunicira sa BMS-om preko CAN interfejsa kako bi dobila informacije o statusu baterije, ostvarila zaštitno punjenje i pražnjenje baterije i osigurala bezbedan rad baterije. Istovremeno, PCS komunicira sa sistemom za upravljanje energijom EMS preko RS485 interfejsa kako bi ostvarila smanjenje vršnih napajanja i popunjavanje „propada“, regulaciju vršnih napajanja i frekventnu regulaciju, virtuelno povećanje kapaciteta i rezervno *Off-grid* napajanje.

Energetski pretvarač za skladištenje energije takođe podržava više režima punjenja i pražnjenja kao što su režimi: konstantni napon, konstantna struja i *„floating“* punjenje.

Osnovne tehničke karakteristike IGBT pretvarača sa tri nivoa (jednog PCS modula) prema AC mrežnoj strani su: izlazni napon 3x230 V, 400 V, 50 Hz (+15%/-10%), nominalna izlazna snaga 105 kW, maksimalna izlazna snaga 116 kW, maksimalna izlazna struja 170 A, faktor snage ≥0,98, faktor izobličenja izlazne struje pri nominalnoj snazi THDi ≤3%, DC komponenta inherentno sadržana u izlaznoj struji ≤0,5%.



Slika 8. Prikaz topologije bidirekcionog energetskog pretvarača sa AC zaštitama

Tehničke karakteristike na DC strani: opseg radnog napona je u opsegu 615–950 Vdc, maksimalna snaga i struja u režimu kada dvosmerni pretvarač radi kao punjač su 105kW i 170A, respektivno.

Dvosmerni energetski pretvarač je sertifikovan prema sledećim normama: TUV CE-EMC EN 61000-6-2:2019; EN 61000-6-4:2019, TUV CE-LVD EN 62477-1, TUV EN50549-1.

Prikazana 3L NPC na Slici 8 se odlikuje relativno visokom efikasnošću na prekidačkoj učestanosti (tipično 10kHz-20kHz), relativno jednostavnom kontrolom, redukovanim brojem DC izvora. Ova topologija je podesna za „*fault-tolerant*“ primene strujne regulacije. Upotreba neutralnih spregnutih dioda može rešiti pitanje balansiranja napona i neujednačenih gubitaka i napona između IGBT prekidača i neutralne tačke [11-12].

Mane ove topologije su kompleksnost kola za balansiranje napona, nejednaka raspodela gubitaka između IGBT prekidača na donjoj i gornjoj strani polumosta, kao i porast broja primenjenih dioda sa porastom nivoa invertora (za nivoe > 3).

U Tabeli 1 su dati pregledno prekidački statusi prekidačkih elemenata (IGBT prekidača i dioda) za jednu fazu topologije invertora sa tri nivoa (jedna vertikala trofaznog 3L NPC mosta) koja je data na Slici 9. Posmatrani su prekidači Q1-Q4 i diode D1-D2.

Tabela 1. Prekidački statusi za topologiju 3L NPC

IGBT	$V_{out}=+V_{dc}/2$	$V_{out}= V_N=$ ref 0	$V_{out}= -V_{dc}/2$
Q1	ON	OFF	OFF
Q2	ON	ON	OFF
Q3	OFF	ON	ON
Q4	OFF	OFF	ON

Na Slici 9 su prikazane sekvence uključivanja prekidačkih elementa (IGBT prekidača i NPC dioda) u skladu sa statusima koji su prikazani u Tabeli 1. Prikazane sekvence uključenja se odnose na jednu fazu trofaznog izlaza dvosmernog invertora (vertikala 1 IGBT invertorskog trofaznog mosta).

Na Slici 10 su dati karakteristični talasni oblici napona za ovu topologiju. Na Slici 10(a) su prikazani talasni oblici faznih napona V_{L1-N}, V_{L2-N}, V_{L3-N} u odnosu na neutralnu tačku N u DC-međukolu dvosmernog invertora, dok su na Slici 10(b) prikazani talasni oblici međufaznih napona V_{L1-L2}, V_{L1-L3}, V_{L2-L3}..

VI NAČIN RADA BESS

Sistem baterijskog skladišta električne energije (BESS) je direktno povezan na elektroenergetski sistem FNE, sa ciljem optimizacije korišćenja proizvedene energije, stabilizacije rada mreže i omogućavanja različitih režima eksploatacije.

BESS sistem omogućava rad u više operativnih režima, u zavisnosti od potreba elektrane i zahteva distributivnog sistema.

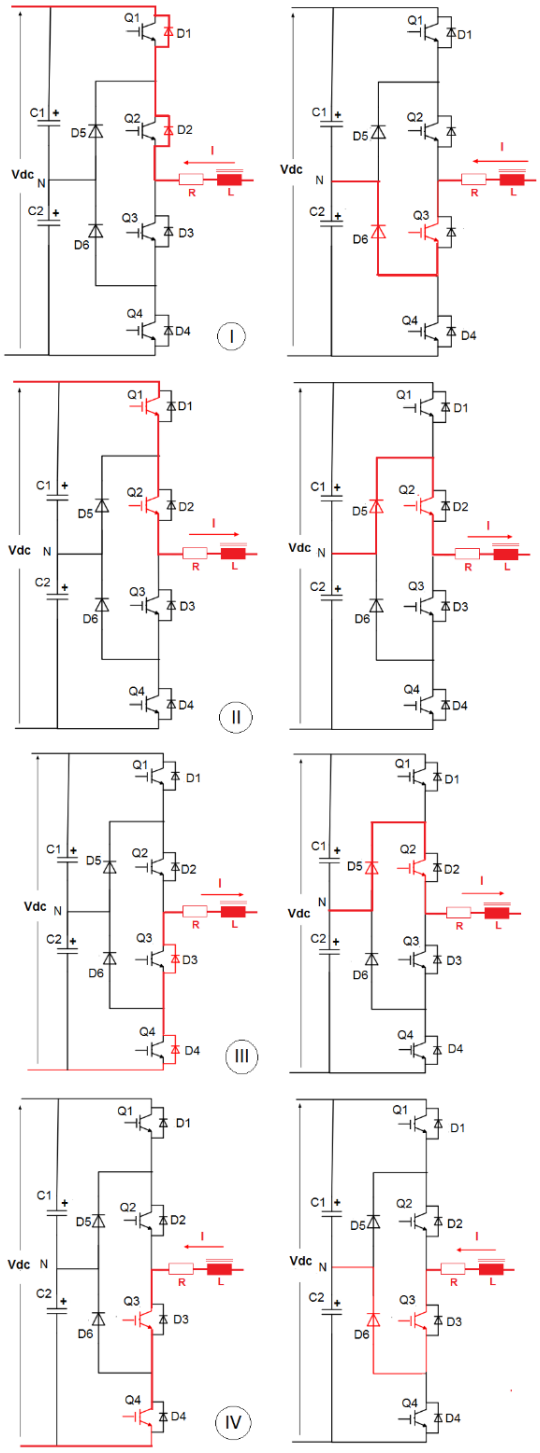
Punjenje baterija (režim AC/DC) - ispravljački režim je predviđen isključivo iz proizvodnje solarne elektrane. Energija se posredstvom opisanog 3L NPC pretvarača usmerava ka baterijama u periodu kada je proizvodnja FNE veća od trenutne potrošnje ili kada je potrebno „skladištiti“ višak energije za kasniju upotrebu.

Pražnjenje baterija (režim DC/AC) - invertorski režim je omogućen u nekoliko režima, kao što su:

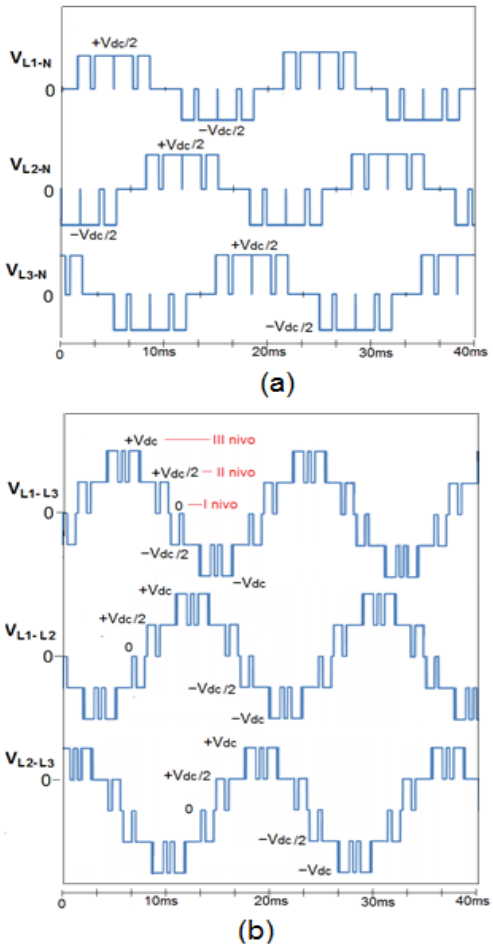
- *Renewable Power Arbitrage* – isporuka energije u mrežu u trenucima kad je to najisplativije,
- *Power Factor Correction* – održavanja faktora snage u dozvoljenim granicama (korekcija faktora snage),

- *Capacity Compensation* – kompenzacija kapaciteta,
- *Frequency Regulation* – održavanje frekvencije mreže u stabilnim granicama (npr. punjenje kada je frekvencija > 50 Hz, pražnjenje kada je < 50 Hz).

Radom sistema upravlja EMS kontroler (*Energy Management System*), koji je u komunikaciji sa kontrolerom FNE i RTU jedinicom (daljinskom stanicom). EMS obezbeđuje rad po zadatom režimu i komunikaciju sa SCADA sistemom.



Slika 9. Sekvence I,II,III i IV uključenja prekidačkih elemenata (dioda i IGBT prekidača) za induktivno opterećenje [11-12]



Slika 10. Talasni oblici i spektri harmonika faznih napona i jednog međufaznog napona za topologiju invertora sa tri nivoa (3L NPC); (a) talasni oblici tri fazna napona, (b) talasni oblici tri međufazna napona [11-12]

Sistem zaštite

BESS je opremljen sa više nivoa zaštita počev od pojedinačnih komponenti do celokupnog sistema. Zaštite se realizuju unutar svakog modula, u ormanima za priključenje i na nivou priključka ka elektroenergetskom sistemu.

Unutar svakog FLEX 215 AIO modula predviđene su sledeće zaštite:

- prekostrujna i kratkospojna zaštita na DC strani koja je realizovana automatskim dvopolnim zaštitnim prekidačima,
- prekostrujna i kratkospojna zaštita na AC strani koja je realizovana tropolnim prekidačima sa termičkim magnetnim okidačem,
- zaštita od prenapona sa ugrađenim odvodnicima prenapona na AC i DC stranama,
- termička zaštita je bazirana na temperaturnim senzorima koji nadgledaju radne uslove, uz mogućnost automatskog isključenja u slučaju prelaska graničnih vrednosti,
- protivpožarna zaštita (*Fire Suppression System-FSS*) je bazirana na automatskom sistemom za detekciju i gašenje požara pomoću aerosolne gasne supresije, a aktiviranje sistema se bazira na senzorima dima i temperature,

- BMS (Battery Management System), obezbeđuje neprekidan nadzor nad naponima, strujama i temperaturom pojedinačnih ćelija i kompletnog baterijskog reka.

Sistem komunikacija

Svi uređaji u sistemu su povezani preko integrisane komunikacione mreže, koja omogućava kontrolu, nadzor i prikupljanje podataka u realnom vremenu. Komunikacija se realizuje putem Modbus TCP/IP protokola. Ključne komponente komunikacione arhitekture:

- EMS kontroler (*Eniris SmartgridOne*), koji predstavlja centralnu upravljačku jedinicu BESS-a. Obezbeđuje rad po definisanim režimima, kao i prijem i izvršenje komandi sa SCADA sistema,
- SCADA interfejs omogućava daljinski nadzor, upravljanje i evidenciju parametara rada preko RTU jedinice,
- RTU (daljinska stanica EDS) uspostavlja komunikaciju između BESS sistema, kontrolera FNE i distributivnog sistema,
- komunikacioni orman u transformatorskoj stanici sadrži glavni mrežni *switch* preko koga se povezuju EMS, RTU i kontroler solarne elektrane.

Ovakva komunikaciona arhitektura omogućava BESS sistemu da u realnom vremenu reaguje na uslove u mreži, koordiniše rad sa FNE i ispunjava tehničke zahteve operatera sistema.

U pogledu komunikacija između daljinske stanice i predviđenog EMS kontrolera, kao i kontrolera za FNE, predviđeno je povezivanje ovih uređaja na zajedničkom *switch*-u, gde će se komunikacija sa kontrolerom solarne elektrane, kao i RTU, odvijati putem Modbus TCP/IP protokola.

Unutar transformatorske stanice 0,8 kV/10 kV predviđen je komunikacioni rek za glavni komunikacioni *switch* u okviru transformatorske stanice, a koji bi kao čvorište za komunikaciju RTU (smešten kod ormana mernog mesta), kontroler elektrane i kontroler BESS sistema.

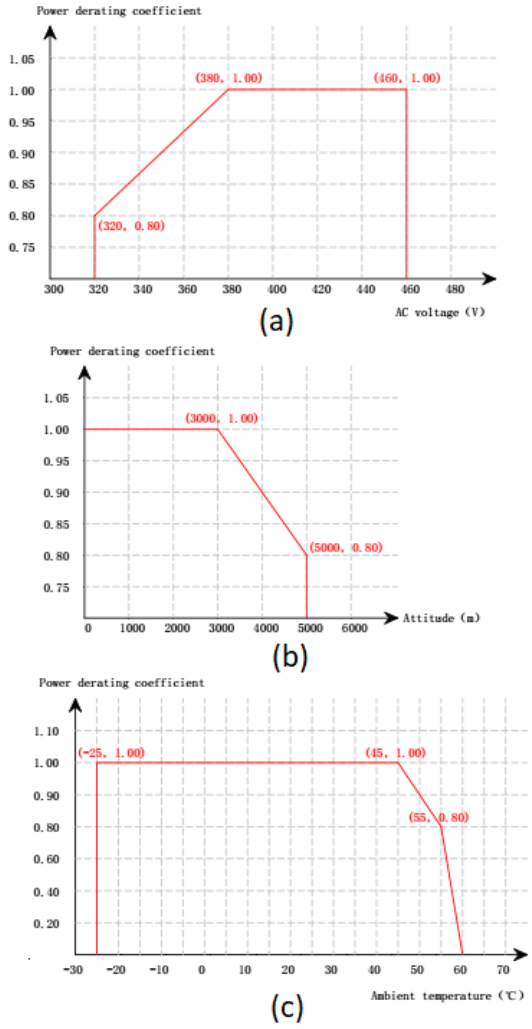
VII VERIFIKACIJA PERFORMANSI BESS

U ovom poglavlju su dati rezultati verifikacije performansi BESS koje su bile ključne u projektovanju i i izboru elektroenergetske opreme.

Na Slici 11 su prikazane krive korekcionog koeficijenta snage (*Power Derating Factor - PDF*) dvosmernog energetskog pretvarača PCS u zavisnosti od naizmeničnog napona, nadmorske visine i temperature okoline.

PCS u sklopu BESS radi punom snagom i punom strujom do određenog mrežnog napona, maksimalne temperature okoline ili čak i nadmorske visine. Kada mrežni napon i (ili) temperatura okoline pređu granične vrednosti oni nastavljaju da rade sa smanjenim nominalnim vrednostima kako bi sprečili oštećenje poluprovodničkih i mehaničkih komponenti. Slično važi i za nadmorsku visinu, pogotovu za nadmorske visine iznad 3000m.

Sa prikazanog dijagrama na Slici 11(a) se uočava da je u opsegu naizmeničnog napona 380–460 Vac koeficijent K_{pdfV}=1. U najnepovoljnijem slučaju za naizmenični napon 320 Vac ovaj faktor ima minimalnu vrednost K_{pdf_min} = 0,8. Na Slici 11(b) je prikazana zavisnost koeficijenta PDF u funkciji nadmorske visine. Do 3000 m se ne uzima korekcija snage, ali iznad tih vrednosti, na primer za nadmorsku visinu 4000m korekcioni koeficijent je 0,9. Na Slici 11(c) je dat prikaz korekcionog koeficijenta snage u funkciji ambijentalne temperature. U opsegu -25–45°C korekcioni faktor K_{pdfT} =1, dok za temperature iznad +45°C ovaj koeficijent opada. Tako na primer za +55 °C (gornja granična temperatura) ovaj koeficijent iznosi 0,8.

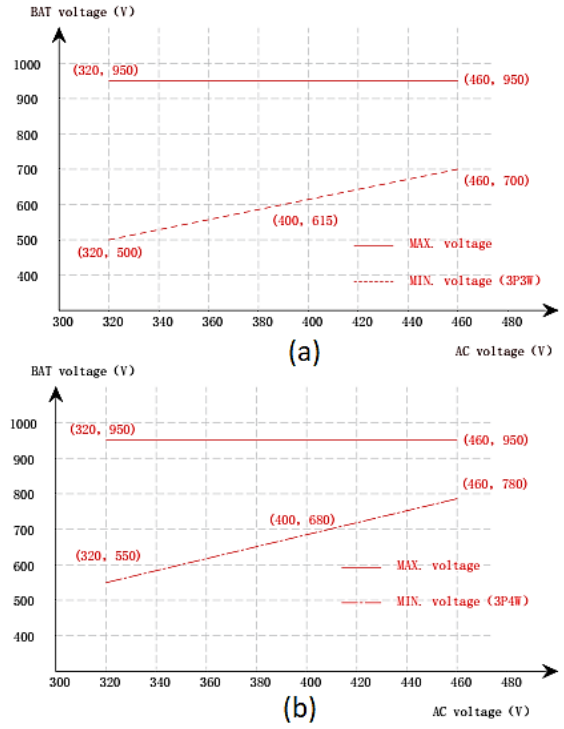


Slika 11. Krive koeficijenta snage PDF za PCS; (a) u funkciji naizmeničnog napona, (b) u funkciji nadmorske visine, (c) u funkciji temperature okoline [15]

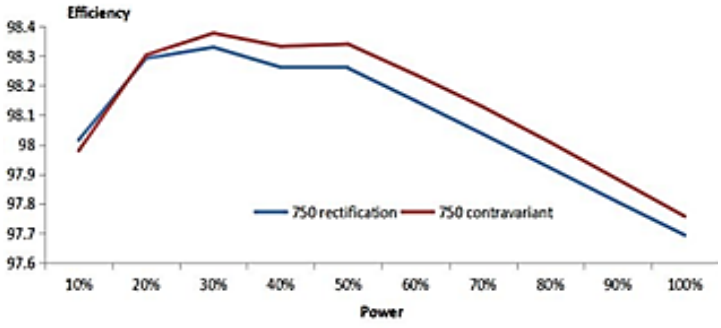
Slika 12 prikazuje krive opsega napona baterije koje odgovaraju različitim AC naponima za PCS modul u trofaznom trožičnom sistemu-3P3W i trofaznom četvorožičnom sistemu-3P4W situacijama. Grafik promene napona baterije u zavisnosti od AC napona za trofazni trožični sistem je prikazan na Slici 12(a). Uočava se da je pri maksimalnom AC naponu u opsegu 320Vac-460Vac, DC maksimalni baterijski napon 950Vdc. Za minimalni napon u 3P3W sistemu i za mrežni napona 320Vac baterijski napon je 500Vdc, dok je za 460Vac baterijski naponn 700Vdc. Slično važi i za trofazni četvorožični sistem -3P4W, za koga su prikazane karakteristike na Slici 12(b), kod koga se vidi da je

opseg DC napona 550Vdc-780Vdc, dok je njegova maksimalna vrednost 950Vdc.

Na Slici 13 je predstavljen dijagram efikasnosti PCS modula (dvosmernog IGBT pretvarača) u zavisnosti od snage, a za vrednosti DC napona 750Vdc u režimu ispravljača AC/DC (plavi dijagram) i u invertorskom režimu DC/AC (crveni dijagram). Dijagram je dobijen merenjem za trofazno ožičenje sa četiri provodnika 3P4W, koje je primenjeno i u ovom projektu. Uočava se da je najveći stepen iskorišćenja najveći u opsegu snaga 20–50% od nominalne i njegove vrednosti su oko 98,3–98,4%. Takođe se može uočiti da je efikasnost neznatno veća (0.1%-0.2%) u invertorskom režimu u odnosu na ispravljački režim. Efikasnost pri punoj snazi je oko 97,7–97,8%.



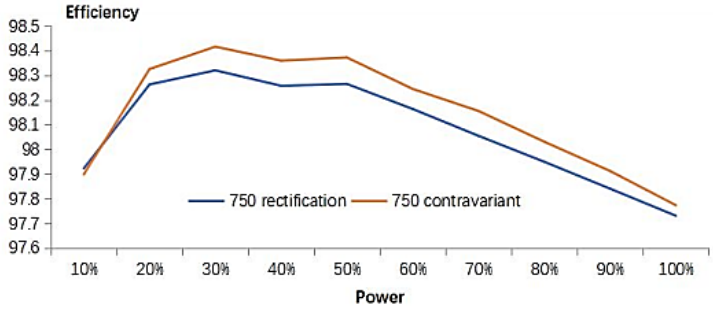
Slika 12. Krive opsega promena napona baterije u BESS za dve konfiguracija AC mrežnog napona; (a) trofazni trožični sistem 3P3W, (b) za trofazni četvorožični sistem 3P4W[15]



Slika 13. Efikasnost PCS modula za slučaj AC/DC i DC/AC režima rada i 3P4W sistem ožičenja [15]

Slika 14 prikazuje dijagram efikasnosti PCS modula (dvosmernog IGBT pretvarača) u zavisnosti od snage, a za vrednosti DC napona 750 Vdc u režimu ispravljača AC/DC (plavi dijagram) i u invertorskom režimu DC/AC (crveni dijagram). Dijagram je meren za trofazno ožičenje sa tri provodnika -3P3W. Uočava se da je najveći stepen iskorišćenja najveći u opsegu snaga 20–50% od nominalne. Efikasnost pri punoj snazi 100% je oko 97,7–97,8%.

U ovom slučaju nešto je veća razlika stepena iskorišćenja za AC/DC i DC/AC režim. Njena vrednost se kreće od 0,2–0,4%.



Slika 14. Efikasnost PCS modula za slučaj AC/DC i DC/AC režima rada i 3P3W sistem ožičenja[15]

Analiza ukupnog harmonijskog izobličenja struje THDi

U okviru ovog projekta izvršena je analiza ukupnog harmonijskog izobličenja struje (THDi – *Total Harmonic Distortion*) za BESS, koje se priključuje na niskonaponsku stranu TS 0,4/0,8 kV. Pri ovoj analizi je pretpostavljeno da je na sabirnice 0,8 kV, 50Hz priključen isključivo baterijski sistem BESS 500kW i nije razmatran uticaj harmonika koji potiču iz FNE koja je preko solarnih invertora priključena na sabirnice 0,8 kV, 50Hz.

Baterijsko skladište koje čini 5 zasebnih baterijskih sistema je izvedeno preko dvosmernog pretvarača – PCS proizvođača POWEROAD nominalne snage 100 kW, ukupno 500 kW, koji omogućava razmenu energije između DC sabirnice i AC mreže.

U radu invertora u sklopu dvosmernog pretvarača javljaju se viši harmonici struje usled impulsnog (PWM) upravljanja, pa je potrebno izvršiti procenu i proračun ukupnog harmonijskog izobličenja. Ukupno harmonijsko izobličenje je izračunato uz uvažavanje svih pet baterijskih sistema zajedno. Metodologija proračuna *THD*i je bazirana na relaciji:

$$THD_I = \sqrt{\frac{I_2^2+I_3^2+I_4^2+\cdots+I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \qquad (1)$$

gde su:

- I_1 – efektivna vrednost osnovne (fundamentalne) komponente struje (na učestanosti 50 Hz),
- $I_2, I_3, \ldots, I_n$ – efektivne vrednosti viših harmonika do n-tog reda.

Proračun je izvršen na osnovu mernih podataka proizvođača invertora i rezultata simulacije u softveru za analizu kvaliteta električne energije.

U analizi su razmatrani harmonici do 50. reda (tj. do učestanosti 2500 Hz). U okviru projekta su za svaku od faza L1, L2, L3 u Tabeli 2 prikazane, a potom toga i analizirane vrednosti pojedinačnih harmonika struja, njihove kvadratne vrednosti kao i

procentualni udeo svakog od harmonika u odnosu na nominalnu struju invertora od 151 A.

Za sistem baterijskog skladišta BESS 500 kW proizvođača POWEROAD pregledno su prikazani rezultati testiranja za svaku od fazu invertora (L1, L2, L3) na grafikonima na Slici 15. Testovi su dobijeni u invertorskom režimu, odnosno režimu pražnjenja baterijskog skladišta i pri nominalnoj faznoj struji od 151A, odnosno pri opterećenju na AC strani od 100% Pn.

Tabela 2. Tabelarni prikaz merenja harmonijskog sastava AC napona BESS

	Faza L1				Faza L2				Faza L3			
No	In [A]	In^2 [A^2]	[%]		In [A]	In^2 [A^2]	[%]		In [A]	In^2 [A^2]	[%]	
3	1.5	2.25	0.9934	1.4901	1.5	2.25	0.9934	1.4901	1.5	2.25	0.9934	1.4901
4	0.242	0.0586	0.1603	0.1603	0.188	0.0353	0.1245	0.1245	0.087	0.0076	0.0576	0.0576
5	0.356	0.1267	0.2358	0.2358	0.29	0.0841	0.1921	0.1921	0.207	0.0428	0.1371	0.1371
6	0.108	0.0117	0.0715	0.0715	0.132	0.0174	0.0874	0.0874	0.119	0.0142	0.0788	0.0788
7	0.456	0.2079	0.302	0.302	0.25	0.0625	0.1656	0.1656	0.578	0.3341	0.3828	0.3828
8	0.099	0.0098	0.0656	0.0656	0.09	0.0081	0.0596	0.0596	0.093	0.0086	0.0616	0.0616
9	0.429	0.184	0.2841	0.2841	0.29	0.0841	0.1921	0.1921	0.388	0.1505	0.257	0.257
10	0.089	0.0079	0.0589	0.0589	0.084	0.0071	0.0556	0.0556	0.085	0.0072	0.0563	0.0563
11	0.905	0.819	0.5993	0.5993	0.914	0.8354	0.6053	0.6053	0.879	0.7726	0.5821	0.5821
12	0.098	0.0096	0.0649	0.0649	0.099	0.0098	0.0656	0.0656	0.083	0.0069	0.055	0.055
13	0.632	0.3994	0.4185	0.4185	0.611	0.3733	0.4046	0.4046	0.653	0.4264	0.4325	0.4325
14	0.065	0.0042	0.043	0.043	0.071	0.005	0.047	0.047	0.064	0.0041	0.0424	0.0424
15	0.434	0.1884	0.2874	0.2874	0.433	0.1875	0.2868	0.2868	0.433	0.1875	0.2868	0.2868
16	0.062	0.0038	0.0411	0.0411	0.073	0.0053	0.0483	0.0483	0.066	0.0044	0.0437	0.0437
17	0.406	0.1648	0.2689	0.2689	0.42	0.1764	0.2781	0.2781	0.367	0.1347	0.243	0.243
18	0.093	0.0086	0.0616	0.0616	0.084	0.0071	0.0556	0.0556	0.081	0.0066	0.0536	0.0536
19	0.292	0.0853	0.1934	0.1934	0.314	0.0986	0.2079	0.2079	0.349	0.1218	0.2311	0.2311
20	0.063	0.004	0.0417	0.0417	0.068	0.0046	0.045	0.045	0.08	0.0064	0.053	0.053
21	0.168	0.0282	0.1113	0.1113	0.208	0.0433	0.1377	0.1377	0.22	0.0484	0.1457	0.1457
22	0.075	0.0056	0.0497	0.0497	0.092	0.0085	0.0609	0.0609	0.066	0.0044	0.0437	0.0437
23	0.15	0.0225	0.0993	0.0993	0.151	0.0228	0.1	0.1	0.153	0.0234	0.1013	0.1013
24	0.263	0.0692	0.1742	0.1742	0.232	0.0538	0.1536	0.1536	0.162	0.0262	0.1073	0.1073
25	0.15	0.0225	0.0993	0.0993	0.143	0.0204	0.0947	0.0947	0.122	0.0149	0.0808	0.0808
26	0.102	0.0104	0.0675	0.0675	0.092	0.0085	0.0609	0.0609	0.069	0.0048	0.0457	0.0457
27	0.186	0.0346	0.1232	0.1232	0.25	0.0625	0.1656	0.1656	0.198	0.0392	0.1311	0.1311
28	0.088	0.0077	0.0583	0.0583	0.097	0.0094	0.0642	0.0642	0.069	0.0048	0.0457	0.0457
29	0.306	0.0936	0.2026	0.2026	0.49	0.2401	0.3245	0.3245	0.455	0.207	0.3013	0.3013
30	0.094	0.0088	0.0623	0.0623	0.102	0.0104	0.0675	0.0675	0.076	0.0058	0.0503	0.0503
31	0.228	0.052	0.151	0.151	0.428	0.1832	0.2834	0.2834	0.423	0.1789	0.2801	0.2801
32	0.056	0.0031	0.0371	0.0371	0.067	0.0045	0.0444	0.0444	0.057	0.0032	0.0377	0.0377
33	0.106	0.0112	0.0702	0.0702	0.179	0.032	0.1185	0.1185	0.186	0.0346	0.1232	0.1232
34	0.037	0.0014	0.0245	0.0245	0.042	0.0018	0.0278	0.0278	0.039	0.0015	0.0258	0.0258
35	0.109	0.0119	0.0722	0.0722	0.116	0.0135	0.0768	0.0768	0.107	0.0114	0.0709	0.0709
36	0.032	0.001	0.0212	0.0212	0.034	0.0012	0.0225	0.0225	0.031	0.001	0.0205	0.0205
37	0.093	0.0086	0.0616	0.0616	0.09	0.0081	0.0596	0.0596	0.083	0.0069	0.055	0.055
38	0.028	0.0008	0.0185	0.0185	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.028	0.0008	0.0185	0.0185
39	0.054	0.0029	0.0358	0.0358	0.066	0.0044	0.0437	0.0437	0.078	0.0061	0.0517	0.0517
40	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.024	0.0006	0.0159	0.0159
41	0.07	0.0049	0.0464	0.0464	0.07	0.0049	0.0464	0.0464	0.071	0.005	0.047	0.047
42	0.029	0.0008	0.0192	0.0192	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.023	0.0005	0.0152	0.0152
43	0.073	0.0053	0.0483	0.0483	0.067	0.0045	0.0444	0.0444	0.07	0.0049	0.0464	0.0464
44	0.024	0.0006	0.0159	0.0159	0.024	0.0006	0.0159	0.0159	0.023	0.0005	0.0152	0.0152
45	0.052	0.0027	0.0344	0.0344	0.062	0.0038	0.0411	0.0411	0.068	0.0046	0.045	0.045
46	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.024	0.0006	0.0159	0.0159	0.023	0.0005	0.0152	0.0152
47	0.062	0.0038	0.0411	0.0411	0.06	0.0036	0.0397	0.0397	0.062	0.0038	0.0411	0.0411
48	0.03	0.0009	0.0199	0.0199	0.025	0.0006	0.0166	0.0166	0.024	0.0006	0.0159	0.0159
49	0.064	0.0041	0.0424	0.0424	0.061	0.0037	0.0404	0.0404	0.063	0.004	0.0417	0.0417
50	0.025	0.0006	0.0166	0.0166	0.023	0.0005	0.0152	0.0152	0.021	0.0004	0.0139	0.0139

Prema standardima SRPS EN 50160, dozvoljeni nivo ukupnog harmonijskog izobličenja (*Total Harmonik Distortion* - THD) struje u tački priključenja priključenja za sisteme ovog naponskog nivoa mora biti manji od 5 %.

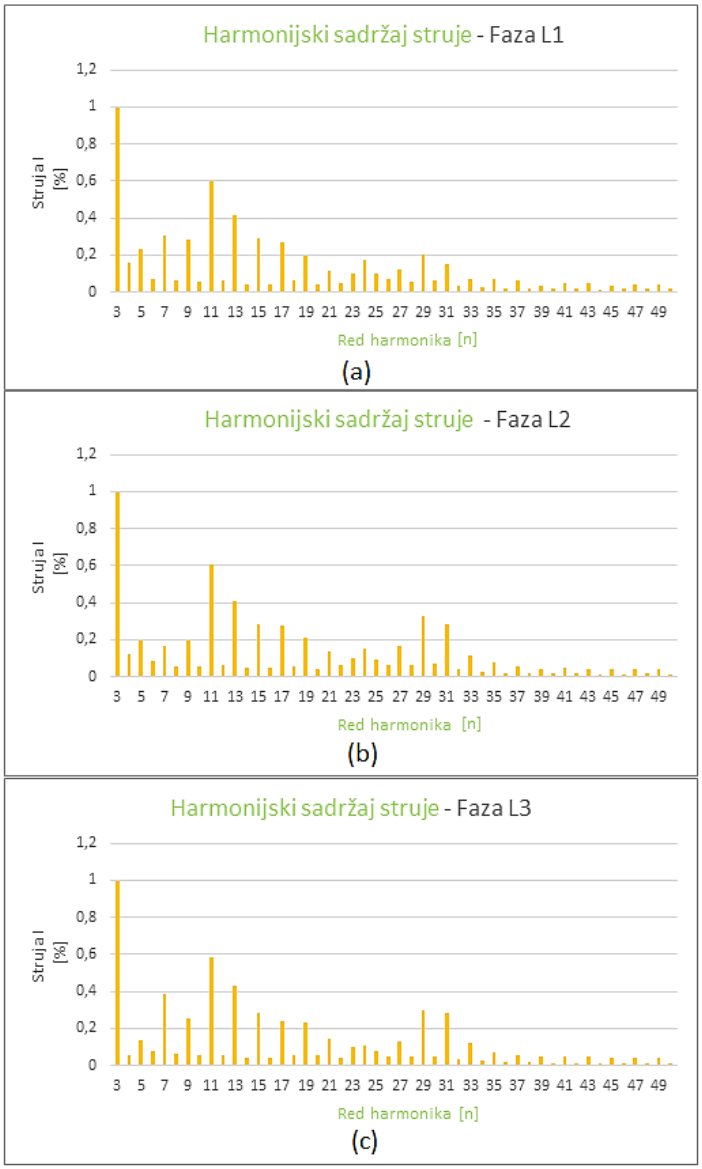
Izračunata vrednost THD struje za predmetni BESS sistem snage 500 kW/1075 kWh uz uvažavanje svih pet baterijskih sistema (svaki snage 100kW) je iznosila 2,22 %, što je u granicama propisanih vrednosti. Tabelarni prikaz THD po fazama i ukupni THD celokupnog BESS sistema su dati u Tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati ukupnog THD po fazama kao i ukupni za kompletan BESS

L1	THD [%]	2,285	< 5%
L2	THD [%]	2,181	< 5%
L3	THD [%]	2,194	< 5%
Ukupni THD		2,22	< 5%

VIII ZAKLJUČAK

U radu je su predstavljeni rezultati projektovanja baterijskog sistema za skladištenje električne energije 500 kW/1075 kWh u sklopu FNE izlazne snage 2045 kW. Cilj rada je bio da se predstave neka praktična projektantska iskustva u projektovanju prvog baterijskog skladišta značajnijeg kapaciteta na domaćim prostorima. Ulaskom u ovu investiciju kompanija NIS a.d.-Novi Sad je pokazala posvećenost u smanjenju emisija CO_2. Nosilac idejnog projekta, projekta za građevinsku dozvolu i projekta za izvođenje, a ujedno realizator i implementator na ovom projektu je firma je Conseko d.o.o iz Beograda.



Slika 15. Prikaz harmonijskog sadržaja izlaznih faznih struja PCS modula baterijskog skladišta 500 kW/1075 kWh proizvodnje POWEROAD pri izlaznoj snazi 100% Pn u režimu pražnjenja

Procena očekivane efikasnosti od BESS uzima u obzir da će se baterijskoj skladište koristiti za pomoćnu uslugu regulacije frekvencije. Periodi godine u kojima se može očekivati da će se koristiti usluga regulacije, t.j. usluga stabilizacije mreže kada je mreža podopterećena, što uzrokuje rast frekvencije, odnosno kada je mreža preopterećena (niža frekvencija mreže), na primer

tokom večernjih časova gotovo tokom čitave godine, ili jutarnjih časova u radnim danima, pretpostavlja da će se za pomoćne usluge baterijsko skladište koristiti 300 dana u godini, odnosno za 300 ciklusa godišnje.

Tokom korišćenja baterije, odnosno njenog prolaska kroz velike brojeve punjenja i pražnjenja dolazi do postepenog degradacije kapaciteta baterije, koji je na godišnjem nivou oko 1,25 %, ukoliko baterija prolazi jedan ciklus dnevno. Pored toga, tehnički kapacitet baterije nije istovremeno i iskoristivi kapacitet. Ukoliko se pretpostavi da je efikasnost ciklusa punjenja i pražnjenja koja uzima u obzir gubitke energije na baterijama (ali i samim energetskim transformatorima) 90% RTE, kao i da se neće prazniti svih 100% kapaciteta već 88% od raspoloživog kapaciteta dubine pražnjenja, radi produženja veka baterija, za prosečnu dnevna iskorišćenost i pod pretpostavkom 300 ciklusa godišnje (za regulacione usluge) dobija se godišnja energija 255,42 MWh. To znači da je procenjeno smanjenje emisija na godišnjem nivou oko 280,7 tCO_2.

Zahvalnica

Publikovanje i objava ovog rada su najvećim delom finansirani od strane firme Conseko d.o.o iz Beograda, koja je bila projektantska i izvođačka firma BESS 800Vdc/500kW/1075kWh sklopu integralnog sistema FNE elektrane 2045kWac, a za potrebe kompanije NIS a.d.-Novi Sad, kao Investitora projekta BESS i vlasnika kompletnog sistema. Jednim delom finansiranje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, za period 2026. (Ugovor pod evidencionim brojem 451-03-33/2026-03/200034).

Literatura

[1] Mohamad, F., Teh, J., Lai, C.M., Chen, L.R. Development of Energy Storage Systems for Power Network Reliability: A Review, Energies, Energies, Vol. 11, No. 9, pp. 2278, 2018. https://doi.org/10.3390/en11092278

[2] Zhang, Y., Campana, P.E., Lundblad, A., Yan, J. Comparative study of hydrogen storage and battery storage in grid connected photovoltaic system: Storage sizing and rule-based operation, Applied Energy, Vol, 201, pp. 397-411, 2017. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.123

[3] Oliveira Farias, H.E., Neves Canha, L. Battery energy storage systems (BESS) overview of key market technologies, in Proc. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA), Lima, Peru, pp. 1-5, 18-21 September 2018. https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2018.8511796

[4] IEEE Guide for Design, Operation, and Maintenance of Battery Energy Storage Systems, both Stationary and Mobile, and Applications Integrated with Electric Power Systems, in: Li, X. (ed.) *IEEE Std 2030.2.1-2019*, pp. 1-45, 2019. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8930450

[5] Chavhan, S., Mohale,V., Kumbhar, M. A Review of recent advancements and challenges in battery energy storage system (BESS), in Proc. *1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics, and Smart Systems* (ISTEMS), Dehradun, India, pp. 1-6, 26-27 April 2024. https://doi.org/10.1109/ISTEMS60181.2024.10560221

[6] Vuković, M., Despotović, Ž. V. Primena baterijskih sistema kod solarnih elektrana, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 27.No. 3, pp. 56-23, 2025. https://doi.org/10,46793/EEE25-3.56V

[7] Đerić, M., Despotović, Ž.V, Kostić, M., Ilić, U. Eksploataciona ispitivanja brzih punjačkih stanica za E-automobile snaga 120 kW i 240 kW, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 27, No. 3, pp. 73-83, 2025. https://doi.org/10,46793/EEE25-3.73D

[8] Padmanabhan, N., Bhattacharya, K., Ahmed, M. Battery energy storage systems in energy and reserve markets, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 35, No. 1, 2020. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2936131

[9] Zagoras, N., Balasubramaniam, K., Karagiannidis, I., Makram, E.B. Battery Energy Storage Systems, in Proc. *2015 North American Power Symposium* (NAPS), Charlotte, NC, USA, pp. 1-6, 04-06 October 2015. https://doi.org/10.1109/NAPS.2015.7335215

[10] Vukovic, M., Despotovic, Z.V. Practical aspects of the application of battery storage in photovoltaic power systems, SPECIAL SESSION: New considerations of power systems flexibility: case study of Southeast Europe, in Proc. *20th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* (SDEWES), Dubrovnik, 05-10 October 2025.

[11] Despotović, Ž.V. Uticaj uređaja energetske elektronike PV elektrana na kvalitet isporuke električne energije u distributivnu mrežu, in Proc. *37. Savetovanje CIGRE* Srbija 2025, Kopaonik, 26-30 Maj 2025. https://doi.org/10,46793/CIGRE37.B4.03

[12] Despotović, Ž.V. Exploitation problems in the operation of photovoltaic power plants, in Proc. *International Conference POWER PLANTS 2025*, Zlatibor, 04-07 November 2025.

[13] Poweroad Renewable Energy Co., Ltd. Environmental, Social and Governance (ESG) Report, https://poweroad.com/wp-content/uploads/2025/09/POWEROAD-2024-ESG-Report.pdf [pristupljeno 15.02.2026]

[14] POWEROAD FLEX 215 AIO - All-in-one Air Cooling Outdoor Cabinet ESS https://poweroad.com/wp-content/uploads/2025/12/FLEX-215-AIO-All-in-one-ESS_Flyer.pdf [pristupljeno 15.02.2026]

[15] Technical specification EPCS-series PCS module, Document version 01-(20231102) release date 2023-11-02, https://enjoypowers.com/wp-content/uploads/2023/06/Enjoypowers-EPCS-for-BESS-Technical-Specification-V.2.4.pdf [pristupljeno 15.02.2026]

Autori

Miodrag Vuković – Dr , Conseko.d.o.o, Beograd, Srbija, m.vukovic@conseko.rs, ORCID 0000-0003-0158-192X
Željko V.Despotović- Dr, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Srbija, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID 0000-0003-2977-6710 **(koresponding autor)**
Manojlo Šoškić-Dipl.el.inž., NIS a.d.-Novi Sad, Srbija, manojlo.soskic@nis.rs, ORCID 0009-0000-6155-112X
Stanko Vuković – Master el. inž., Conseko.d.o.o, Beograd, Srbija, stanko.vukovic@conseko.rs, ORCID 0009-0007-5709-7295

Design and Implementation of Battery Energy Storage System with 500 kW Power and 1075 kWh Capacity

Abstract – The paper presents the design and implementation of the battery energy storage system (BESS) with a power of 500 kW and a capacity of 1075 kWh, which is part of the system of the photovoltaic power plant Smederevo with a power of 3159 kWp (2450 kW AC), which is owned by the company NIS a.d. Novi Sad. The planned BESS consists of five battery modules of the individual power type of 100kW and a capacity of 215kWh, which achieves a total lithium battery

(LiFePO4) capacity of 1075kWh. Within the BESS, a multi-level bidirectional power converter is provided, which ensures a bi-directional flow of electricity. All intended modules within the BESS have the following certificates: CE-EMC, CE-LVD, IEC 62619, IEC 63056, CEI-016, UN 38.3, nCEI-021, which confirms compliance with international safety standards. Among other things, the paper presents the details of the warehouse topology and the configuration that was designed and adapted to photovoltaic power plant Smederevo. The entire operation of the BESS system is managed by the EMS (Energy Management System) controller, which is in constant communication with the controller of the PV power plant, system for monitoring of photovoltaic power plant for NIS, the RTU unit (remote station EDS) and the SCADA system of the system operator.

Index Terms – Battery energy storage system, Photovoltaic power plants, Balancing energy, Battery controller, Power electronics, Power converters

Rad primljen: 12.03.2026., prihvaćen: 01.09.2026.