

Morana Lončar
Končar – Digital d.o.o.
morana.loncar@koncar.hr

Lucija Babić Majcen
Končar – Digital d.o.o.
lucija.babic@koncar.hr

Marin Bačić
Končar – Digital d.o.o.
marin.bacic@koncar.hr

Hrvoje Keko
Končar – Digital d.o.o.
hrvoje.keko@koncar.hr

UPRAVLJANJE ORGANSKOM PROTOČNOM REDOKS BATERIJOM

SAŽETAK

Ovaj članak opisuje organsku protočnu redoks (engl. „*redox flow*“) bateriju pogodnu za rad na višim radnim temperaturama. Tehnologija protočnih redoks baterija nasljeđe je američkog svemirskog programa sa zadržavanjem performansi i nakon većeg broja ciklusa punjenja i pražnjenja. Baterija iz članka razvija se i gradi uz putnički terminal luke u Španjolskoj, na Ibizi, u sklopu projekta BALIHT iz programa Horizon 2020. Članak je prvenstveno usmjeren na tehnička rješenja sustava za upravljanje baterijom, odnosno opisuje *Battery Management System* (BMS). U članku se opisuje i rad baterije u sklopu energetskog sustava luke, gdje se za punjenje koristi energija iz fotonaponske elektrane, a tako uskladištena energija koristi se za punionicu električnih vozila te za potrebe napajanja zgrade putničkog terminala u luci. Ovaj tip baterije predstavlja sigurno rješenje za područja gdje je potrebno osigurati skladištenje električne energije s posebnim naglaskom na spremanje energije iz obnovljivih izvora energije te s vrlo malom opasnosti od zagađenja okoliša s obzirom na to da se radi o organskom elektrolitu zasnovanom na vodi.

Ključne riječi: protočna redoks baterija, organska baterija, sustav za upravljanje protočnom redoks baterijom, rad baterije na visokim temperaturama

ORGANIC REDOX-FLOW BATTERY MANAGEMENT SYSTEM

SUMMARY

This paper gives an overview of organic redox flow battery, suitable for operation at higher operating temperatures. The redox flow battery technology has been designed in the US space program and its main advantage is keeping the battery performance even after numerous charge and discharge cycles. The battery in this paper is being developed and built next to the passenger terminal of the port in Ibiza, Spain, as part of the Horizon 2020 BALIHT project. This paper is primarily focused on technical solutions managing the battery, i.e. the paper focuses on its Battery Management System (BMS). The paper also describes the operation of a battery that is charged from photovoltaic cells, while the stored energy is used for charging electric vehicles and for powering the passenger terminal building in the port. This battery type represents a safe solution for areas where it is necessary to ensure the storage of electrical energy with a special emphasis on storing energy from intermittent energy sources, such as solar power plants, with a very low risk of environmental pollution, given that it uses a water-based organic electrolyte.

Key words: redox flow battery, organic battery, redox flow battery management system, battery operation at higher temperatures

1. UVOD

Zadnjih desetljeća, europskim propisima se promovira sve veće korištenje obnovljivih izvora energije sa zajedničkim ciljem od 45% obnovljivih izvora energije u ukupnoj konačnoj bruto potrošnji do 2030. [1]. Nastavno na to, u elektroenergetskim sustavima se sve više pojavljuju manji, distribuirani obnovljivi izvori električne energije čije je ponašanje ovisno o izvoru energije koji nije upravljiv već ga se može samo predviđati, poput vjetra ili sunčevog zračenja. Čak i uz sve kvalitetnije tehnike predviđanja, veći udio takvih izvora povećava neizvjesnost u sustavu. Također krajnji kupci električne energije žele biti energetske neovisniji ili samodostatni što nas dovodi do novih potreba za skladištenjem električne energije budući da je maksimalna proizvodnja iz takvih izvora razmjerno slabo korelirana s maksimumom potrošnje. Sve to dovodi do novih zahtjeva za upravljanje elektroenergetskim sustavom.

Budući da većina svjetskog stanovništva (56%) [2] danas živi u urbanim područjima, postoje posebne potrebe koje takvi spremnici za električnu energiju moraju ispunjavati. Takva spremišta za električnu energiju u urbanim područjima, trebala bi biti sigurna za okoliš tj. ne bi trebala koristiti stvari opasne po okoliš u slučaju njihovog prodiranja u okoliš.

Uviđajući navedene potrebe, nastao je istraživačko razvojni (engl. RIA: *Research and Innovation Action*) projekt BALIHT [3] financiran u sklopu okvirnog programa EU za istraživanja i inovacije Obzor 2020. Cilj projekta BALIHT je razviti organsku protočnu redoks (engl. *redox flow*) bateriju (RFB) koja je pogodna za rad na višim radnim temperaturama, bez potrebe za rashladnim sustavom. Ta inovacija omogućuje BALIHT bateriji da bude energetske učinkovitija od postojećih organskih protočnih redoks baterija. Kako bi to dokazali, baterija će se instalirati i testirati u Španjolskoj na otoku Ibiza uz novu zgradu lučke uprave Baleara. Baterija je dio energetske sustava luke pa se puni s fotonaponskih ćelija elektrane u sklopu terminala, dok se uskladištena energija u bateriji koristi za napajanje punionice električnih vozila te za potrebe napajanja zgrada putničkog terminala u luci.

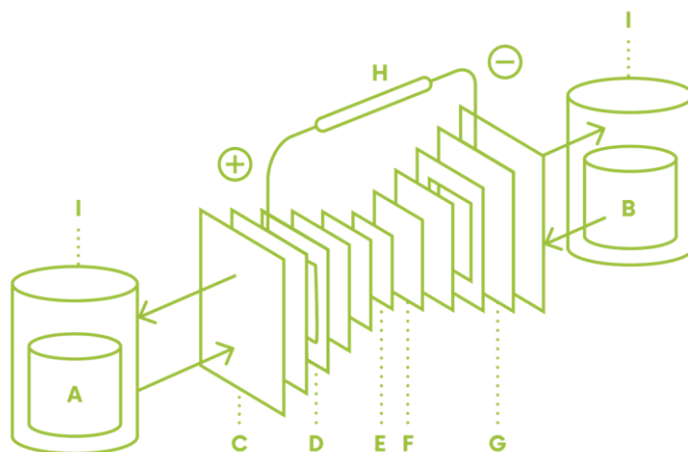
2. PROTOČNE REDOKS BATERIJE

2.1. Procesi u protočnim redoks baterijama

Koncept redoks protočnih baterija razvila je i primijenila američka svemirska agencija NASA još tijekom sedamdesetih godina prošlog stoljeća [4]. Redoks protočna baterija (RFB) je elektrokemijski uređaj za pohranu energije koji pretvara kemijsku energiju u električnu energiju kroz reverzibilne oksidacijske i redukcijske reakcije radnih tekućina (elektrolita).

Tijekom procesa redukcije elektroliti dobivaju elektrone dok oksidacijom gube elektrone. Obje kemijske reakcije moraju se odvijati odvojeno jedna od druge u anodnom i katodnom prostoru pretvarača energije. Pohranjena kemijska energija pretvara se u električnu kao rezultat procesa redukcije i oksidacije na površinama elektroda. Nasuprot tome, tijekom procesa punjenja električna energija se pohranjuje u bateriji, a redoks reakcija se odvija u suprotnom smjeru.

U redoks protočnoj bateriji nalazi se pozitivno nabijen elektrolit katolit (engl. *catholyte* ili *posolyte*) i negativno nabijen elektrolit anolit (engl. *anolyte* ili *negolyte*). Elektroliti (katolit i anolit) se tijekom procesa punjenja i pražnjenja neprekidno gibaju kroz segmente baterije. Najveća moguća količina energije tijekom punjenja ili pražnjenja ovisi, između ostalog, o volumenu elektrolita koji teče kroz segmente.

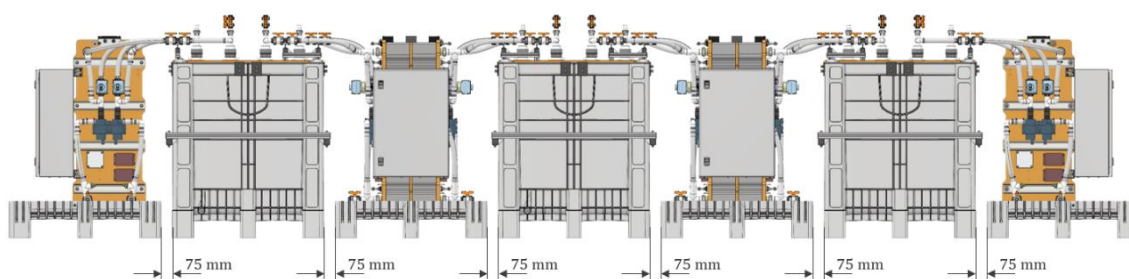


Slika 1. Shematski prikaz redoks protočne baterije: A- katolit, B- anolit, C- okvir ćelije, D- termalno otporni plastični okviri, E- tanka membrana stabilna do 65°C, F – visoko učinkovite elektrode na bazi ugljika, G – strujni konektori, H – Sustav upravljanja baterijom, I- fleksibilni spremnici

2.2. Opći podaci o BALIHT bateriji

Projekt BALIHT se bavi razvojem organske redoks protočne baterije snage 100 kW i ukupnog kapaciteta 200 kWh. Baterija je dizajnirana tako da se može potpuno napuniti ili isprazniti unutar 2 sata. Jedna od specifičnosti ove protočne baterije je da se njezini elektroliti, odnosno katolit i anolit, mogu proizvesti iz organskih izvora. Baterija je dizajnirana za rad u toplim okruženjima i bit će smještena u Španjolskoj u novoj luci trajektnog terminala Ibize. Baterija će biti spojena na mrežu i lokalni fotonaponski sustav koji će puniti bateriju, a uskladištena energija će se koristiti za potrebe punionice električnih vozila i za potrebe luke.

Razvijena baterija sastoji se od 12 segmenata, a svaki segment povezan je s jednim parom spremnika. Segmenti i spremnici postavljeni su na palete koje na dnu imaju integriranu posudu za sakupljanje elektrolita ukoliko dođe do kvara. Cijeli sustav je težak oko 6 tona.



Slika 2. Prikaz BALIHT baterije

3. SUSTAV UPRAVLJANJA PROTOČNOM REDOKS BATERIJOM

3.1. Zahtjevi sustava za upravljanje redoks protočnom baterijom

Sustav upravljanja protočnom redoks baterijom (engl. Battery Management System - BMS) je sustav za automatizaciju i upravljanje procesa unutar punjive baterije. Za zaštitu pojedinačnih baterijskih ćelija i cijele baterije od egzotermnih reakcija potreban je elektronički sigurnosni sklop. Najvažniji zadatak BMS-a je ispunjavanje sigurnosnih funkcija na takav način da ćelije u baterijskom sustavu ne rade izvan svojih navedenih ograničenja (naponi, temperature i struje ne smiju biti izvan normalnih pogonskih uvjeta). Ovaj skup specifikacijskih ograničenja za ćelije često se naziva područjem sigurnog rada (engl. Safe Operation Area - SOA).

Općenito, BMS sustav redoks protočne baterije predstavlja analogni i/ili digitalni elektronički uređaj koji se sastoji od hardverskih i softverskih komponenti koje ispunjavaju sljedeće bitne zahtjeve:

- Prikupljanje podataka
- Obrada i pohrana podataka
- Upravljanje temperaturom baterije
- Upravljanje tlakovima elektrolita baterije
- Upravljanje brzinom protoka elektrolita
- Upravljanje sigurnošću
- Komunikacija s vanjskim uređajima.

Glavna funkcija sustava za upravljanje baterijom je kontrola crpki koje istovremeno pokreću katolit i anolit, odnosno izvršavaju punjenje ili pražnjenje baterije. Drugim riječima, u redoks protočnim baterijama glavni učinski član odnosno aktuator kojim se kontrolira rad baterije su – crpke za pokretanje elektrolita. One su najčešće pogonjene kroz frekvencijski pretvarač. U trenutku prestanka rada crpki baterija zadržava razinu punjenja koju je imala u tom trenutku.

Postoje određena ograničenja i zahtjevi za različite mjerne vrijednosti koje treba ispuniti tijekom rada baterije. BMS komunicira u jednom smjeru sa sensorima i aktuatorima (kontroleri crpki, crpke, ventili itd.) a u drugom smjeru sa sustavom upravljanja energijom (engl. *Energy Management System* - EMS). BMS može raditi i neovisno, no za koordinirani rad unutar sustava potrebni su mu unosi zadanih vrijednosti iz EMS-a.

BMS ima zadatak kontrolirati unutarnje procese baterije, primati i izvršavati zadane vrijednosti od EMS-a. U praktičnom smislu, EMS šalje naredbe BMS-u koji zatim u skladu s tim kontrolira proces punjenja ili pražnjenja baterije. Koordinacija proizvodnje i potrošnje električne energije glavna je zadaća EMS-a, tako da uz postavljanje zadanih vrijednosti BMS-u (dakle, bateriji) on djeluje i prikuplja podatke i iz fotonaponske elektrane, punionica za električna vozila i drugih izvora unutar luke na Ibizi.

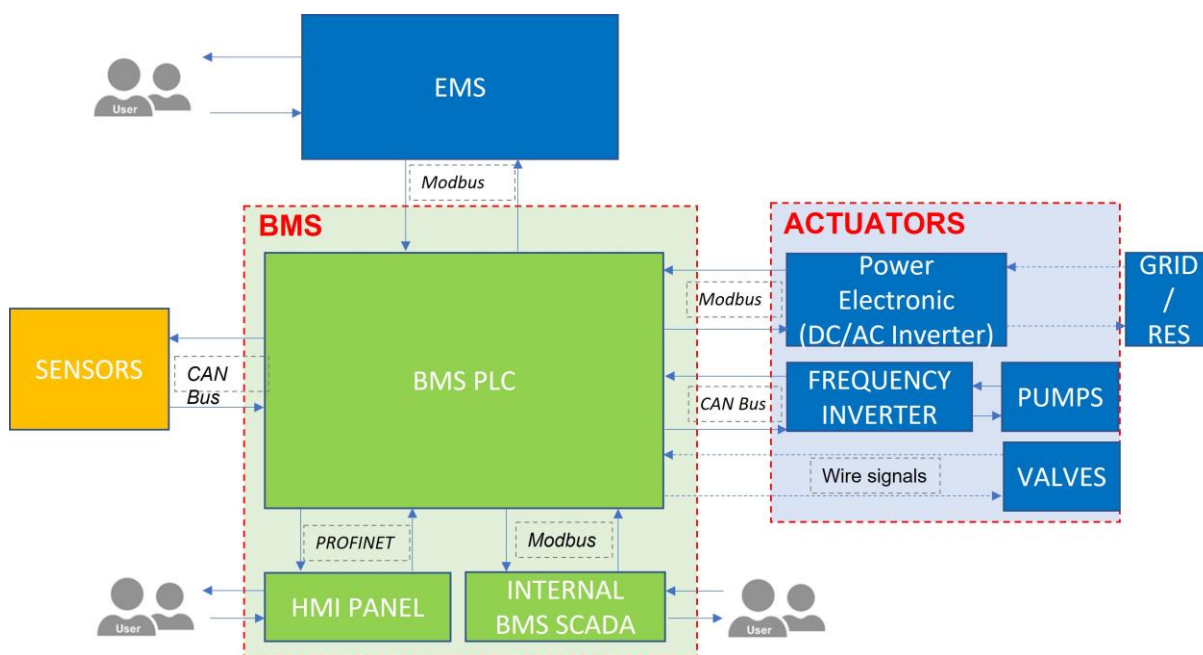
3.2. BALIHT BMS

Za potrebe projekta BALIHT, BMS je dizajniran kako bi ispunio sve zahtjeve na projektu, što uključuje sljedeće značajke:

- BMS koristi robusnu industrijsku opremu koja može podnijeti teške okolišne uvjete budući da se predviđa da BALIHT baterija radi u toplim okruženjima. To uključuje PLC (Siemens serije ET200SP) kao središnji upravljački uređaj pogodan za rad u proširenom temperaturnom rasponu (-20°C do +60°C).

- BMS je dizajniran da bude skalabilan kako bi se mogao lako prilagoditi baterijama s drugim zahtjevima i specifikacijama tj. drukčijim energetske potrebama (npr. baterijama s većom ili nižom snagom i kapacitetom)
- BALIHT BMS zasnovan je na PROZA NET SCADA sustavu razvijenim u KONČAR-u, koja podržava rad opreme različitih proizvođača i posebno je prilagođen za uporabu u redoks protočnim baterijama.

Sljedeća slika 3. prikazuje kako BMS komunicira s ostalim baterijskim sustavima.



Slika 3. BMS shema podatkovne komunikacije

BMS se sastoji od hardverskih i softverskih komponenti. Hardverski dijelovi su:

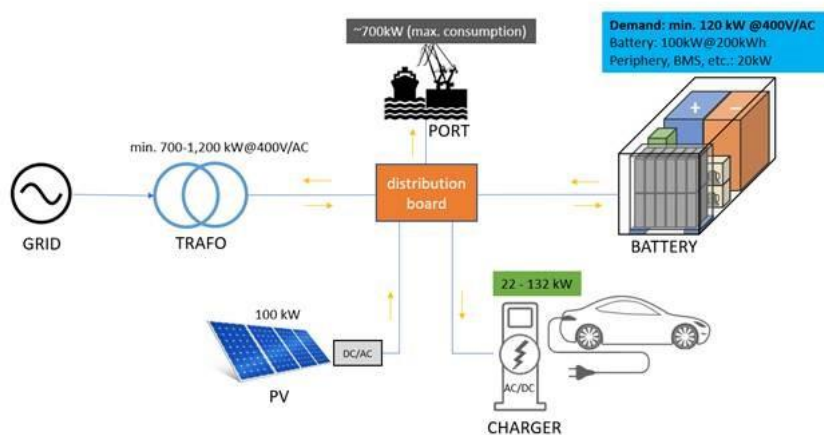
- PLC i moduli
- Serversko računalo i monitori
- Korisničko sučelje čovjek – stroj (engl. *Human Machine Interface* – HMI)

Softverske komponente su:

- KONČAR PROZA NET SCADA sustav s posebnim prilagodbama za ovu primjenu,
- programski algoritam PLC-a te
- komunikacijski protokoli.

3.3. Opis rada BALIHT baterije i sustava upravljanja baterijom

Organska redoks protočna baterija snage 100kW i kapaciteta 200kWh bit će dio energetske mikromreže luke u Ibizi. S jedne strane, baterija će se puniti iz fotonaponskih panela koji se postavljaju na parking luke, a po potrebi će se puniti i iz elektroenergetske mreže. S druge strane, energija uskladištena u bateriji će se koristiti na punionicama električnih vozila koje su smještene u luci te za potrebe potrošnje same luke, odnosno nove zgrade putničkog terminala. Cilj je postići najveći stupanj energetske samodostatnosti, maksimalnim iskorištavanjem lokalnih izvora. Zadaća je baterije pritom premostiti činjenicu da veća potrošnja vremenski ne koincidira s proizvodnjom.



Slika 4. Scenarij rada BALIHT baterije

BMS prikuplja ulazne podatke s izvora podataka izravno s baterije i to u prvom redu, s unutrašnjih senzora te EMS-u šalje relevantan dio prikupljenih i izvedenih (izračunatih) podataka. BMS je upravljački sustav baterije, dok je EMS koordinacijski sustav više razine, cijele mikromreže. Stoga EMS prikuplja podatke i od sustava luke gdje se nalazi mikromreža, ali i od relevantnih vanjskih sustava: vremenska prognoza, proizvodnja s fotonaponskih panela, potrošnja lučkih terminala, druge predviđene i aktualne podatke o proizvodnji i potrošnji. U pogledu baterije, EMS za odlučivanje primarno traži sljedeće podatke: status rada baterije odnosno nalazi li se u punjenju ili pražnjenju i s kojom snagom, potom trenutno stanje napunjenosti baterije (engl. State Of Charge – SOC) te maksimalni trenutno mogući kapacitet baterije kojeg BMS određuje ovisno o trenutnim radnim uvjetima baterije.

Temeljem svih prikupljenih podataka, EMS izračunava treba li baterija biti u načinu punjenja ili pražnjenja te izračunava potrošnju energije na temelju optimizacijskih algoritama. Nakon izračuna, EMS šalje zadanu vrijednost BMS-u koja se sastoji od informacije da li se baterija treba puniti ili prazniti i kojom snagom.

U skladu s tim, dva su glavna stanja baterije koja BMS prepoznaje:

1. Punjenje (iz električne mreže ili iz fotonaponskih ćelija)
2. Pražnjenje tj. opskrba energijom iz baterije za potrebe punionice električnih vozila (engl. *electric vehicle* – EV) ili lučkog terminala.

Na temelju signala zadane vrijednosti (engl. *set point*) primljenog od strane EMS-a, BMS prosljeđuje zahtjev za snagom regulatorima crpki odnosno frekvencijskim pretvaračima. Baterija može svoj status promijeniti iz stanja punjenja u stanje pražnjenja u hodu, tijekom rada – odnosno nije potrebno isključiti bateriju da bi se promijenio njen način rada. Na temelju primljenih signala iz BMS-a, regulatori crpki mijenjaju brzinu crpki koje pokreću elektrolit (katolit i anolit). U isto vrijeme BMS vodi brigu o

sigurnosti i kontinuirano nadzire podatke primljene od različite baterijske opreme (kontroleri pumpi, AC/DC pretvarač, ventili, senzori itd.) te po potrebi postavlja odgovarajuće signale.

Postoje tri vrste sigurnosnih događaja/signala:

1. Signali događaja
2. Signali upozorenja
3. Signali kvara

Događaji predstavljaju sve primljene signale dok baterija radi u normalnim radnim uvjetima. Signali upozorenja predstavljaju sve podatke dobivene iz sustava baterije koji ukazuju na neuobičajeno ponašanje ali se kontinuirani rad baterije ne prekida. Međutim, ukoliko se zaprime signali upozorenja potrebna je reakcija operatera baterije. Signali kvara predstavljaju sve podatke primljene od baterije koji uzrokuju automatsko zaustavljanje rada baterije. To se postiže zaustavljanjem crpki i zatvaranjem ventila. Svi navedeni signali pojavljuju se u kronološkom popisu alarma i događaja u SCADA i HMI panelu. Predstavljani su u različitim bojama koje su prikazane u tablici I. i zahtijevaju različite radnje operatera baterije.

Tablica I. Klase signala u popisu alarma i događaja

Tip signala	Boja u kronološkom popisu alarma i događaja	Zahtijeva li prihvatanje signala djelovanje operatera
Signal događaj	Bijelo	NE
Signal upozorenja	Žuto	DA
Signali isključenja	Crveno	DA

U skladu sa sigurnosnim načelima, kod izrade baterije predviđen je i način rada kad iz bilo kog razloga nije moguće upravljati baterijom pomoću SCADA poslužitelja. Baterijom se u tom slučaju može upravljati s HMI operativnog panela. Sukladno načelu da upravljanje bliže procesu ima viši prioritet od onog udaljenijeg od procesa, tako i HMI panel ima identične radne funkcije kao i SCADA poslužitelj, ali HMI ima viši operativni prioritet od SCADA.

Preko HMI panela se mogu izvoditi sljedeće funkcije:

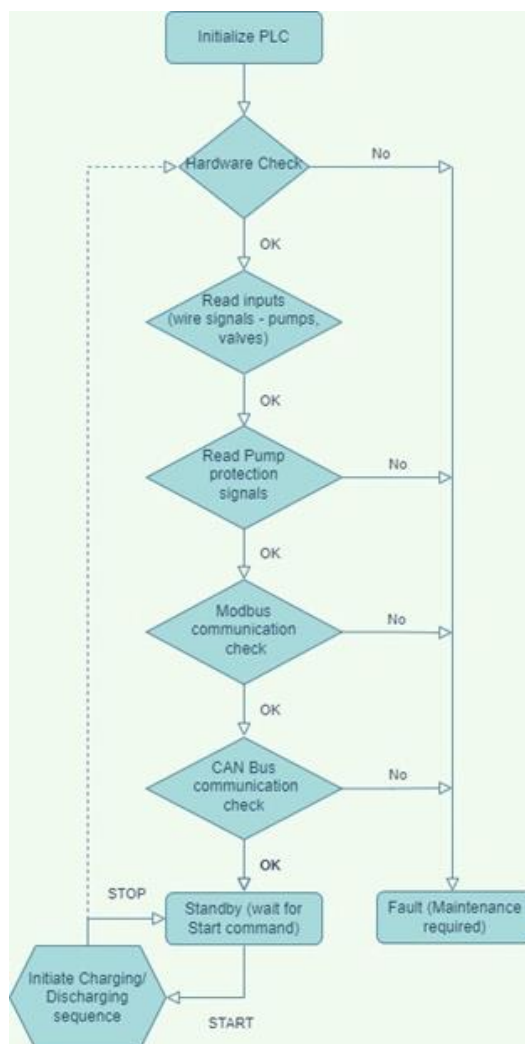
- nadzor baterije,
- rad baterije (zaustavljanje baterije zbog sigurnosnih razloga).

SCADA sustav radi na poslužiteljskom računaru koje se nalazi u kontrolnoj sobi, a HMI panel se nalazi na zidu pokraj baterije. Baterijom se stoga može upravljati s obje lokacije.

Glavna komponenta BMS-a je programabilni logički kontroler (PLC), uređaj odgovoran za prikupljanje podataka od senzora, pumpi, ventila i drugih mjernih instrumenata i kontrolu procesa punjenja i pražnjenja baterije. Hardverska struktura PLC-a se sastoji od:

- CPU (Central processing unit) – mikroprocesor koji pokreće program pohranjen u CPU memoriji. Program izvodi matematičke operacije, upravlja radom pumpi i ventila, brine o interakciji ostalih dijelova PLC uređaja, izvršava programe koje je odredio korisnik, nadzire ulaze i na temelju programskog koda postavlja izlaze.
- Ulazni i izlazni moduli (mogu biti digitalni ili analogni).
- Memorijska kartica (u memorijskoj kartici je korisnički program).
- Komunikacijski moduli (odgovorni za komunikaciju s nekim senzorima, kontrolerima crpki, SCADA i EMS sustavom te AC/DC pretvaračem).

PLC komunicira sa SCADA i AC/DC pretvaračem preko Modbus TCP komunikacijskog protokola, s HMI panelom preko Profineta, dok se komunikacija s kontrolerima pumpi odvija putem CANbus komunikacijskog protokola (J1939). Stoga PLC ima tri modula komunikacijskog sučelja – Modbus, Profinet i CANbus. PLC koji se koristi za Battery Management System (BMS) za projekt BALIHT je SIEMENS (s CPU-om iz serije ET 200SP). Njegov skalabilni dizajn omogućuje prilagođavanje konfiguracije do 32 modula proširenja (BMS Slaves) i do 64 I/O modula koji se mogu naknadno dodati što omogućuje modularnost samog sustava. Za potrebe baterije u sklopu projekta BALIHT iskorištena su 4 modula proširenja (BMS Slaves). Vizualizacija osnovnog algoritma toka inicijalizacije PLC-a može se vidjeti na slici 5.



Slika 5. Algoritam toka inicijalizacije PLC-a

Nakon inicijalizacije, sljedeći korak je provjera hardvera PLC-a. Nakon toga se provjeravaju ulazni signali izravno ožičeni na ulaze PLC-a, potom signali sa zaštite crpki, a zatim Modbus komunikacija s uređajima koji komuniciraju tim protokolom te konačno CAN Bus komunikacija s uređajima koji komuniciraju po tom komunikacijskom protokolu. Sve se navedene provjere također rade periodički što je na prethodnom dijagramu toka označeno točkastom linijom. Ako rezultat bilo koje od navedenih provjera nije u redu, sustav prelazi u stanje greške koje se otklanja intervencijom. Prođu li sve provjere s pozitivnim rezultatom, BMS prelazi u stanje čekanja za komandu početka rada. Iz pogona se u stanje čekanja vraća slanjem signala za zaustavljanje.

4. ZAKLJUČAK

U članku su prikazane osnovne karakteristike redoks protočne baterije i sustava za upravljanje, razvijenima kroz znanstveno-istraživački projekt BALIHT. Prikazane su osnovne karakteristike takvih baterija i konkretna implementacija sustava za upravljanje razvijena ovim projektom. Posebnost i baterije i sustava za upravljanje razvijenih ovim projektom u prvom je redu modularnost. Zbog modularnog dizajna baterija je široko prilagodljiva što značajno proširuje mogućnosti primjene i baterije i njenog upravljačkog sustava. Do sada razvijene redoks protočne baterije većeg energetskog kapaciteta tipično rade do radne temperature od 40°C, a kako se baterije dodatno u pogonu zagrijevaju, u sklopu baterija bilo je nužno ugrađivati sustav hlađenja kako ne bi došlo do degradacije elektrolita ili nepravilnog rada baterije. To je, osim povećane razine kompleksnosti cijelog sustava, značilo i veću potrošnju električne energije u samoj bateriji. Među najvećim prednostima baterije razvijene projektom BALIHT je mogućnost njenog rada na temperaturama i do 60°C bez dodatno ugrađenog sustava hlađenja. Time se snižava razina

kompleksnosti sustava pa sukladno tome i cijena, a izostanak potrebe za sustavom za hlađenje donosi i značajnu uštedu u potrošnji energije u odnosu na trenutno razvijene organske redoks protočne baterije. U trenutku završetka ovog članka, baterija se nalazila u tvorničkom ispitivanju, a instalacija i testiranje na Ibizi planirani su tijekom ljeta 2023.

5. ZAHVALE I IZJAVE O POTPORI IZ FONDOVA EU

Saznanja, rješenja i sustavi prikazani člankom vezani su za projekt BALIHT, financiran je kao RIA – istraživačko-inovacijski projekt (engl. *Research and Innovation Action*) kroz EU program Obzor 2020 usmjeren na istraživanje i inovacije, kroz ugovor o dodjeli bespovratnih sredstava potpore (engl. *Grant Agreement*) broj 875637.

6. LITERATURA

- [1] „REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe“. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en
- [2] „Overview“, *World Bank*. <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview>
- [3] BALIHT consortium, „BALIHT project web page“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://baliht.eu/about/>
- [4] „Giant Batteries Deliver Renewable Energy When It’s Needed | NASA Spinoff“. <https://spinoff.nasa.gov/Giant-Batteries-Deliver-Renewable-Energy>