

DOI: [10.46793/CIGRE37.C6.05](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C6.05)**C6.05****HIBRIDNI ON/OFF-GRID SISTEMI NAPAЈANJA SA BATERIJSKIM SKLADIŠTEM
ELEKTRIČNE ENERGIJE****HYBRID ON/OFF-GRID POWER SUPPLY SYSTEMS WITH BATTERY ENERGY
STORAGE****Srdan Savić***

Kratak sadržaj: Jedan od najvećih izazova u ruralnim područjima je nedostatak pristupa elektrodistributivnom priključku. Najčešći razlozi su udaljenost i nepristupačan teren, što za posledicu ima ekonomski neisplativu investiciju izgradnje elektrodistributivne mreže. Na mnogim udaljenim lokacijama, česta je upotreba dizel električnog agregata kao izvora električne energije za napajanje potrošača. Troškovi u vidu potrošnje goriva i održavanja znaju biti vrlo visoki, a raspoloživost i kvalitet napajanja zadovoljavajući za opšte potrebe. Sa druge strane, određeni komercijalni i industrijski objekti priključeni na elektrodistributivnu mrežu zahtevaju visoku stabilnost i raspoloživost napajanja. U ovom slučaju, moguća je integracija hibridnog sistema napajanja sa elektrodistributivnom mrežom kao rezervnim izvorom. Upotreba hibridnog sistema napajanja donosi brojne prednosti, pre svega u pogledu redudanse i pouzdanosti u napajanju, a potom i u isplativosti, održavanju i na kraju smanjenju emisije CO₂. Mogućnost kombinacije dva ili više izvora napajanja i prilagođenja njegove izlazne snage i kapaciteta čine ga skalabilnim. Rad se prevashodno bavi principom funkcionisanja sistema, integracijom izvora električne energije i baterijskog skladišta, daljinskim nadzorom i upravljanjem u realnom vremenu. Razmotrene su prednosti i primene ovakvih sistema, kroz praktične primere tokom dosadašnje eksploatacije.

Ključne reči: *besprekidno ON/OFF-Grid napajanje, obnovljivi izvori energije, upravljanje u realnom vremenu, baterijski sistemi za skladištenje električne energije, fleksibilnost, hibridni sistemi napajanja*

Abstract: One of the biggest challenges in rural areas is the lack of access to electrical distribution connections. The most common reasons are distance and inaccessible terrain, which results in an economically unprofitable investment in the construction of electrical distribution network. In many remote locations, diesel generator sets are often used as a source of electricity to power consumers. Costs in the form of fuel consumption and maintenance can be very high, and the availability and quality of the power supply is satisfactory for general needs. On the other hand, certain commercial and industrial facilities connected to the electrical distribution network require high stability and availability of power supply. In this case, it is possible to integrate the hybrid power supply system with the electrical distribution network as a secondary

* Srdan Savić, ENEL PS d.o.o., srdjan.savic@enelps.com

(reserve) source. The use of a hybrid power system brings numerous advantages, first in terms of redundancy and reliability in power supply, and then in cost-effectiveness, maintenance and ultimately reduction of CO₂ emissions. The ability to combine two or more power sources and adjust its output power and capacity make it scalable. This topic primarily shows the principle of how system functions, integration of electricity sources and battery energy storage, remote monitoring and management in real-time. The advantages and applications of such systems are discussed, through practical examples during exploitation so far.

Key words: *uninterruptible ON/OFF-Grid power supply, renewable energy sources, real-time management, flexibility, hybrid power supply systems, BESS*

1 UVOD

Shodno energetskej tranziciji, potrebama korisnika i sve većoj potražnji, integracija različitih izvora električne energije kao i njeno skladištenje postaje nezaobilazna oblast u savremenoj energetici. Ovakav koncept povlači sa sobom mnogobrojne izazove, od kojih je najzahtevniji isporuka stabilnog besprekidnog napajanja u različitim situacijama i u različitim uslovima eksploatacije.

Intermitentna priroda obnovljivih izvora energije najčešće sprečava potpuno odbacivanje konvencionalnih izvora električne energije iz hibridnih sistema napajanja. Pored tražene stabilnosti i raspoloživosti napajanja, cilj je što veća redukcija učešća konvencionalnih izvora električne energije, prvenstveno zbog emisije CO₂ i ekonomske isplativosti. Redukcija učešća konvencionalnih izvora električne energije koji služe kao ispomoć obnovljivim izvorima energije ogleda se, kako u određenoj pravilnosti i cikličnom ponavljanju prirode obnovljivih izvora energije, tako i u naprednim softverskim algoritmima koji diktiraju rad celokupnog sistema.

Baterijsko skladište električne energije predstavlja jednu od najznačajnijih komponenti, bez koje sistem ne bi imao smisla. Baterijsko skladište igra ključnu ulogu i sa stanovišta redukcije korišćenja konvencionalnih izvora električne energije, obezbeđivanja besprekidnog napajanja potrošača i profitabilnosti celog sistema.

Kako bi sistem funkcionisao kao celina potrebno je uspostaviti komunikaciju i upravljanje između svake komponente i krajnjem korisniku omogućiti daljinski nadzor i upravljanje celokupnim sistemom kao i svakom komponentom sistema ponaosob. Komunikacija se uspostavlja preko hardverske opreme, određenih protokola i *Cloud* platformi.

Detaljnim sagledavanjem zahteva korisnika, načina primene i ulaznih podataka vrši se izbor proizvođača opreme i projektovanje sistema. Posebnu pažnju treba posvetiti izvođenju, konfigurisanju i puštanju sistema u rad, kako bi se eliminisali potencijalni problemi u toku eksploatacije. Sa mnoštvom prednosti, hibridni sistemi snage do 50kW i kapaciteta baterijskog skladišta do 100kWh stekli su široko područje primene u raznoraznim zahtevnim aplikacijama. Dalja poglavlja detaljno razmatraju koncept ovakvih sistema koji uključuje sledeće celine:

- izvore električne energije i njihovu klasifikaciju u hibridnim sistemima;
- dizajn, opšti princip rada i osnovne komponente hibridnih sistema;
- nadzor i upravljanje hibridnim sistemima u realnom vremenu;

Kroz praktične primere i iskustva u dosadašnjoj eksploataciji analizirani su specifični problemi i dati predlozi za rešavanje istih.

2 IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE I NJIHOVA KLASIFIKACIJA

Opšta klasifikacija izvora električne energije u hibridnim sistemima razmatra konvencionalne i nekonvencionalne izvore. Konvencionalnim izvorima smatraju se elektrodistributivna mreža i benzinski/dizel električni agregati, a nekonvencionalnim izvorima obnovljivi izvori energije. U hibridnim sistemima teži se što većem iskorišćenju energije sunca i vetra zbog raspoloživosti, očuvanja životne sredine i ekonomičnosti, te se oni primarno koriste za napajanje potrošača. Konvencionalni izvori koriste se u slučaju odsustva ili nedovoljno raspoloživog nekonvencionalnog resursa električne energije. Premda je cilj njihovo korišćenje svesti na minimum, ovakvi izvori imaju prednost u pogledu raspoloživosti.

Gledajući ukupnu godišnju proizvodnju, fotonaponski paneli daju najviše električne energije tokom letnjeg vremenskog perioda. Sa druge strane male vetroturbine angažovane su više tokom zimskog vremenskog perioda i tokom noćnog perioda. Oba izvora podložna su intermitentnom radu na dnevnom nivou usled promene vremenskih uslova. Njihovom integracijom ublažavaju se nejednakosti proizvodnje električne energije na dnevnom i godišnjem nivou.

3 DIZAJN, OPŠTI PRINCIP RADA I OSNOVNE KOMPONENTE

3.1 Podela sistema prema načinu integracije i sinhronizacije sa elektrodistributivnom mrežom

Realizacija stabilnog napajanja nije moguća isključivo sa postojanjem nekonvencionalnih i konvencionalnih izvora električne energije. Vrlo učestano prebacivanje napajanja potrošača sa nekonvencionalnih izvora (usled njihove intermitentne prirode) na konvencionalne izvore izazivaju prekide u napajanju i skraćuju životni vek opreme. Efikasnost sistema se, između ostalog, ogleda u mogućnosti potpunog skladištenja i kasnijeg korišćenja proizvedenih viškova električne energije od strane nekonvencionalnih izvora. Integracijom baterijskog skladišta u sistem eliminišu se kratkotrajni prekidi u napajanju potrošača, omogućava skladištenje električne energije i povećava redundantnost sistema.

Najveći procenat sistema koji napajaju male objekte - telekomunikacione bazne stanice, meteorološke stanice, kuće i vikendice u ruralnim područjima nalazi se u samostalnom radnom režimu (*standalone mode* – OFF-Grid), koji nije priključen na elektrodistributivnu mrežu. Sistemi koji se pretežno koriste u komercijalnim i industrijskim objektima priključuju se na elektrodistributivnu mrežu i sa njom rade u paralelnom sinhronizovanom režimu (*grid connected mode* – ON-Grid). Na ovaj način otvara se mogućnost apsorbovanja ili injektiranja električne energije od strane hibridnog sistema. U zavisnosti od proizvođača opreme, postoji mogućnost ograničenja ON-Grid radnog režima na isključivo apsorbovanje električne energije iz elektrodistributivne mreže. Važno je napomenuti da određeni proizvođači nude opremu koja podržava oba radna režima i ostavljaju mogućnost izbora krajnjem korisniku. Po nestanku mrežnog napona vrši se automatsko fizičko odvajanje hibridnog ON-Grid sistema od elektrodistributivne mreže pomoću odgovarajućih uređaja i ON-Grid hibridni sistem prelazi u ostrvski radni režim. Po povratku mrežnog napona vrši se sinhronizacija hibridnog sistema sa elektrodistributivnom mrežom, te se nastavlja apsorbovanje/injektiranje električne energije od strane hibridnog sistema.

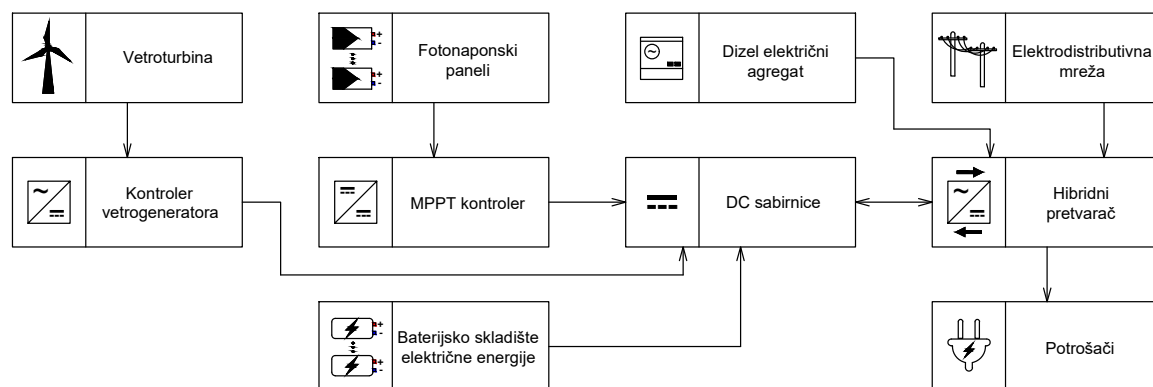
3.2 Optimalno projektovanje sistema

Prvi korak projektovanja podrazumeva analizu potencijala nekonvencionalnih izvora energije na predmetnom području instalacije hibridnog sistema. Na osnovu dobijenih meteoroloških podataka, konfiguracije terena, vrstom konvencionalnog napajanja, maksimalne jednovremene snage potrošača i dijagrama distribucije snage potrošača u vremenu viši se projektovanje najoptimalnije konfiguracije sistema u zavisnosti od potreba korisnika. Predimenzionisanje sistema izbegava se zbog ekonomske neisplativosti i robusnosti. Jedan od primera je predimenzionisani kapacitet baterijskog skladišta koje se pored maksimalnog angažovanja nekonvencionalnih izvora električne energije nikada neće u potpunosti napuniti. Sa druge strane, ukupan potencijal predimenzionisanog fotonaponskog generatora ne može se u potpunosti iskoristiti, jer baterijsko skladište nema dovoljan kapacitet da primi višak generisane električne energije. Nedovoljno dimenzionisanje sistema ima za posledicu neefikasan rad, ugrožavanje stabilnosti napajanja, pa čak i ekonomsku neisplativost. Izabrani benzinski/dizel električni agregat u posmatranom sistemu koji radi u preopterećenju primer je ugrožavanja stabilnosti napajanja. Ekonomska opravdanost može se ogledati u nedovoljnoj instaliranoj snazi nekonvencionalnog izvora električne energije, što za posledicu ima duži rad benzinskog/dizel električnog agregata i povećanu potrošnju goriva. U praksi se najčešće koriste dizel električni agregati zbog veće efikasnosti i izdržljivosti u odnosu na benzinske električne agregate.

3.3 Kategorizacija osnovnih komponenti i način funkcionisanja sistema

Opšti princip rada podrazumeva da se električna energija dobijena iz nekonvencionalnih izvora koristi za delimično ili potpuno pokrivanje potrošnje u vremenskim uslovima u kojima je moguće njeno generisanje. Razlika ili potpuno snabdevanje u slučajevima nedostatka energije iz nekonvencionalnih izvora ostvaruje se iz baterijskog skladišta koje dopunjavaju konvencionalni izvori u skladu sa podešenim algoritmom. Od trenutka uključenja, konvencionalni izvor treba da dopunjava baterijsko skladište i u isto vreme snabdeva potrošače. Po završetku dopunjavanja (koje treba da bude u razumno kratkom vremenskom periodu) prestaje potreba za angažovanjem konvencionalnog izvora. Ukoliko je trenutna proizvodnja nekonvencionalnog izvora veća od trenutne snage potrošača, višak proizvedene električne energije dopunjava baterijsko skladište.

Komponente koje sačinjavaju hibridni sistem napajanja mogu se podeliti u 4 grupe: izvori napajanja, energetske pretvarače, baterijsko skladište električne energije i nadzor i upravljanje celokupnim sistemom. Na slici 1 prikazana je energetska blok šema hibridnog sistema napajanja.



Slika 1: Energetska blok šema hibridnog sistema napajanja

3.4 Fotonaponski paneli i MPPT kontroleri

Fotonaponski panel/string na svome izlazu daje određenu snagu koja pre svega zavisi od iradijacije, nagibnog ugla samog fotonaponskog panela i položaja sunca. Navedeni parametri su promenljivog karaktera te su izlazna snaga i izlazni DC napon promenljive veličine. Svaki fotonaponski panel na svojoj strujno-naponskoj karakteristici ima optimalnu radnu tačku u kojoj je proizvod struje i napona maksimalan. Radi postizanja odgovarajućeg DC napona pogodnog za dalju upotrebu i „pronalaženja“ optimalne radne tačke, koriste se uređaji za praćenje tačke maksimalne snage tzv. MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) kontroleri. Praćenje maksimalne tačke snage fotonaponskog panela/stringa postiže se određenim algoritmom koji upravlja DC-DC pretvaračem (*buck-boost* konvertorom). MPPT kontroleri na svom izlazu daju DC napon (12/24/48V) pogodan za napajanje određenih DC potrošača i punjenje baterijskog skladišta. Zaštitne funkcije - zaštita od kratkog spoja, previsokog ulaznog napona, previsoke radne temperature, itd. integrisane su u sam pretvarač. Rad MPPT kontrolera u paralelnom režimu je moguć i česta je pojava u hibridnim sistemima. DC izlaz MPPT kontrolera priključuje se na glavne DC sabirnice (*DC bus*).

3.5 Mala vetroturbina i kontroler vetrogeneratora

Male vetroturbine takođe poseduju kontroler koji AC napon na izlazu vetrogeneratora pretvara u prilagođen DC napon pogodan za punjenje baterijskog skladišta (12/24/48V). Kontroler male vetroturbine opremljen je funkcijama poput zaštite od kratkog spoja, prenapona, previsoke radne temperature, itd. Broj obrtaja male vetroturbine i izlazna snaga vetrogeneratora zavise od inteziteta vetra. Slučaj nemogućnosti plasiranja generisane snage (primer male snage potrošača i potpuno napunjenog baterijskog skladišta – u samostalnom radnom režimu hibridnog sistema) usled velikog inteziteta vetra, donosi rizik od „samouništenja“ vetroturbine. Kako bi se to izbeglo primenjuje se tehnika „dinamičkog kočenja“ koja podrazumeva disipiranje viška generisane električne energije preko rezistivnog opterećenja koje je priključeno na sam kontroler vetrogeneratora (na njegovim posebnim ulazima). DC izlaz kontrolera vetrogeneratora priključuje se na glavne DC sabirnice (*DC bus*).

3.6 Hibridni pretvarač

Dobijenim DC naponom sa MPPT kontrolera i kontrolera vetrogeneratora moguće je puniti baterijsko skladište i napojiti određene DC potrošače koji rade na ovakvom naponu. Međutim, kako velika većina potrošača radi na AC naponu (400V trofazno / 230V monofazno), potrebno je pomoću odgovarajućeg uređaja – DC/AC pretvarača (invertora) izvršiti konverziju napona. Dopunjavanje baterijskog skladišta u slučajevima odsustva nekonvencionalnog izvora energije konvencionalnim izvorom viši se pomoću AC/DC pretvarača (ispravljača). Današnja tehnologija energetske elektronike donela je mogućnost integracije invertorske i ispravljačke funkcije u jedan uređaj koji se naziva bidirekcionalni (hibridni) pretvarač. Na AC ulaz hibridnog pretvarača priključuju se elektrodistributivna mreža ili dizel električni agregat (u daljem tekstu DEA). U zavisnosti od proizvođača moguća je varijanta priključenja oba konvencionalna izvora istovremeno, te drugi (DEA) predstavlja rezervu u slučaju ispada prvog (elektrodistributivna mreža). DC izlaz hibridnog pretvarača priključuje se na glavne DC sabirnice (*DC bus*). Uključenjem i isključenjem ispravljačke sekcije upravlja se punjenjem baterijskog skladišta u zavisnosti od podešenih uslova/pragova punjenja.

Sa stanovišta napajanja potrošača, hibridni pretvarač može raditi u invertorskom ili „*bypass*“ radnom režimu. Invertorski radni režim podrazumeva pretvaranje DC napona (sa glavnih DC sabirnica) u monofazni ili trofazni sistem AC napona. „*Bypass*“ radni režim podrazumeva

deaktiviranje invertorskog radnog režima i kruto spajanje AC ulaza za AC izlazom po zadatoj komandi ili uslovu prisustva napona na AC ulazu. Kruto spajanje AC ulaza sa AC izlazom vrši se pomoću automatskog transfer prekidača (*Automatic Transfer Switch – ATS*) koji se nalazi u samom hibridnom pretvaraču. U ovom slučaju, napajanje potrošača vrši se direktno sa elektrodistributivne mreže ili DEA. Paralelno „bypass“ radnom režimu aktivira se ispravljački radni režim i dopunjava baterijsko skladište. Po promeni komande ili nestanka napona na AC ulazu, hibridni pretvarač se vraća na invertorski radni režim. Iz ovoga se izvodi zaključak da hibridni pretvarač daje besprekidan AC napon, tj. ponaša se kao *Uninterruptible Power Supply (UPS)*. Neki proizvođači opreme odlučuju se za objedinjenje invertorske i ispravljačke funkcije u jedan uređaj formirajući bidirekcionalni AC/DC pretvarač. Iz ovoga sledi da nije moguće istovremeni rad hibridnog pretvarača u invertorskom i ispravljačkom režimu. Kvalitet napona isporučenog potrošačima zavisi direktno od konvencionalnih izvora i kvaliteta hibridnog pretvarača koji radi u invertorskom radnom režimu. U „bypass“ radnom režimu, potrošači dobijaju direktan napon sa elektrodistributivne mreže ili DEA, koji može varirati. U invertorskom radnom režimu, potrošači dobijaju napon direktno sa DC/AC pretvarača, koji je stabilniji i „čistiji“ (bez varijacija i harmonika) u odnosu na napon sa elektrodistributivne mreže i DEA. Hibridni pretvarač opremljen je zaštitnim funkcijama poput zaštite od kratkog spoja, preopterećenja, dubokog pražnjenja baterijskih jedinica, itd.

Potrebno je napomenuti da se u samom hibridnom pretvaraču nalazi relej za spajanje/odvajanje nultog i zaštitnog provodnika. Funkcija releja je obezbeđivanje pravilnog rada zaštitnog uređaja diferencijalne struje (koji se instalira na AC izlazu) spajajući nulti i zaštitni provodnik kada se hibridni pretvarač nalazi u invertorskom radnom režimu. Po dobijanju AC napona na ulazu hibridnog pretvarača, relej se deaktivira i odvaja nulti i zaštitni provodnik.

Hibridni pretvarači proizvode se u monofaznim i trofaznim varijantama. U zavisnosti od proizvođača opreme, moguće je formiranje trofaznog sistema napajanja od tri monofazne jedinice, a moguće je paralelno povezivanje više monofaznih ili trofaznih jedinica. Vrednost maksimalne moguće izlazne snage u slučaju paralelne konfiguracije diktira proizvođač opreme. Neki proizvođači opreme nude tzv. *All-In-One* rešenje, gde se u jednom uređaju nalaze MPPT kontroler i hibridni pretvarač. Prednosti ovakvog rešenja su jednostavnost i ušteda prostora, ali u slučaju kvara jedne od komponenti potrebno je zameniti ceo uređaj.

3.7 Baterijsko skladište električne energije

Formiranje baterijskog skladišta podrazumeva vezivanje baterijskih jedinica u rednu i/ili paralelnu vezu. Kapacitet i tip baterijskih jedinica biraju se u skladu sa snagom potrošača, kapacitetom nekonvencionalnih izvora električne energije i ekonomskom analizom sistema. Litijum-jonske (*Li-Ion*) i litijum-gvožđe-fosfatne (*LiFePO₄*) baterijske jedinice predstavljaju najčešći izbor prvenstveno zbog naprednijih karakteristika u odnosu na ranije korišćene olovne baterije.

Izlaznim DC naponom MPPT kontrolera i hibridnog pretvarača diktira sistem za upravljanje baterijskim skladištem - *Battery Management System* (u daljem tekstu BMS) koji je sastavni deo litijumskih baterija. BMS omogućava optimalno punjenje i pražnjenje baterijske jedinice u sprečavajući duboko pražnjenje, prepunjavanje, rad sa preniskim i previsokim radnim temperaturama, prevelike struje punjenja i previsokog napona punjenja. Baterijsko skladište može se istovremeno puniti preko hibridnog pretvarača (ispravljački radni režim), kontrolera vetrogeneratora i MPPT kontrolera.

3.8 Elektrodistributivna mreža i dizel električni agregat

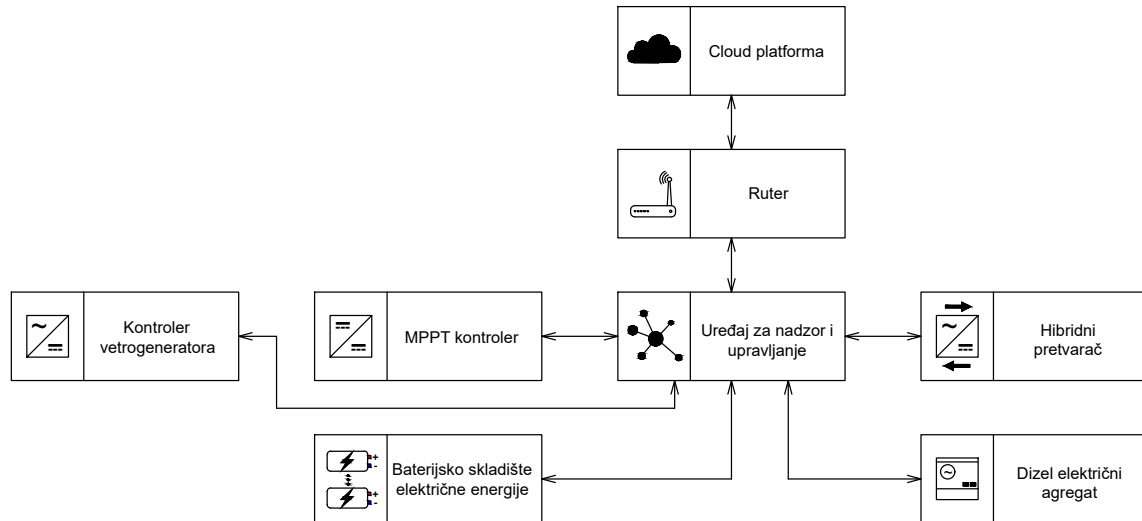
Priključenje konvencionalnih izvora električne energije vrši se na hibridnom pretvaraču. Kako se elektrodistributivna mreža smatra „krutim izvorom“, potrebno je izvršiti pravilan izbor preseka kablova, zaštitnih elemenata od razvodnog ormana do ulaza na hibridni pretvarač (ovo takođe važi i za DEA) i proveriti mogućnost priključenja na razvodni orman sa stanovišta zbirne snage potrošača i snage punjenja baterijskog skladišta. Pri odabiru DEA potrebno je poznavati podatke o maksimalnoj istovremenoj snazi potrošača i maksimalnoj snazi punjenja baterijskog skladišta (koja zavisi od snage punjenja hibridnog pretvarača i BMS parametara baterijskog skladišta). Zbog postizanja stabilnosti, optimalnog životnog veka DEA i potrošnje goriva, zbir ukupne snage potrošača i snage punjenja baterijskog skladišta ne bi trebalo da prelazi 80% njegove maksimalne izlazne snage u kontinualnom radnom režimu. Kod oba konvencionalna izvora zahteva se da parametri ulaznih napona (efektivne vrednosti i frekvencija) budu u propisanim granicama. U zavisnosti od stanja elektrodistributivne mreže u seoskim i ruralnim područjima, efektivna vrednost napona može drastično varirati i izlaziti iz propisanih granica. Ukoliko hibridni pretvarač radi u „bypass“ radnom režimu, to za posledicu ima napajanje potrošača nestabilnim naponom. Kao rešenje nameće se zamena hibridnog pretvarača posebnim uređajima – ispravljačem i invertorom, gde bi se potrošači direktno napajali sa invertora i nezavisno od konvencionalnih izvora.

3.9 Sprečavanje preopterećenja

Dodavanjem novih potrošača i povećavanjem njihove ukupne maksimalne trenutne snage, a uz to i zadržavanje istih kapaciteta izvora električne energije i izlazne snage hibridnog pretvarača dovodi do problema napajanja potrošača u trenucima njihovog maksimalnog angažovanja. U zavisnosti od proizvođača hibridnog pretvarača, otvara se mogućnost tzv. „asistencije“ u napajanju pri povećanoj potrošnji. U slučaju preopterećenja (strujnog ili temperaturnog) u invertorskom radnom režimu, hibridni pretvarač prebacuje se u „bypass“ radni režim. Radi sprečavanja preopterećenja DEA gde hibridni pretvarač radi u „bypass“ i ispravljačkom radnom režimu, bidirekcionalno pretvaračko kolo prebacuje se u invertorski radni režim sinhronizujući se sa frekvencijom DEA i uzimajući nedostajuću količinu električne energije iz baterijskog skladišta za napajanje potrošača. Ovaj režim može trajati sve dok se ne javi strujno preopterećenje ATS-a u hibridnom pretvaraču i dok postoji raspoloživa energija u baterijskom skladištu.

4 NADZOR I UPRAVLJANJE U REALNOM VREMENU

Nadzor i upravljanje u realnom vremenu podrazumeva internu komunikaciju i upravljanje između glavnih komponenti sistema, kao i eksterni nadzor i upravljanje celokupnog sistema od strane korisnika. Nadzor i upravljanje u realnom vremenu vrši se pomoću specijalnog uređaja sa zadatkom komunikacionog objedinjavanja svih komponenti sistema i njihovih protokola. Uređaj pokreće posebno napravljen operativni sistem prilagođen ovim potrebama. Radi lakše integracije, kompatibilnosti i jednostavnosti upravljanja česta praksa je biranje glavnih komponenti - MPPT kontrolera, kontrolera vetrogeneratora, hibridnih pretvarača, baterijskog skladišta i uređaja za nadzor i upravljanje od istog proizvođača. Određeni proizvođači uređaja za nadzor i upravljanje pružaju mogućnost komunikacione integracije opreme drugih proizvođača MPPT kontrolera, kontrolera vetrogeneratora, hibridnih pretvarača i baterijskih skladišta. Takođe, određeni proizvođači uređaja za nadzor i upravljanje ostavljaju mogućnost korisniku da sam prilagodi određenu komponentu drugog proizvođača, tj. da je komunikaciono integriše kroz programiranje. Na slici 2 prikazana je komunikaciona blok šema hibridnog sistema.



Slika 2: Komunikaciona blok šema hibridnog sistema napajanja

4.1 Međusobna zavisnost komponenti i interno upravljanje

Pod internim upravljanjem podrazumeva se međusobna razmena informacija i parametara između glavnih komponenti sistema u realnom vremenu, tj. formiranje njihove međusobne zavisnosti. Svaka glavna komponenta sistema može imati svoj zaseban komunikacioni protokol. Najčešće se u ovu svrhu koriste serijski protokoli poput RS232, RS485, USB, CAN i Modbus ili se pak proizvođači komponenti odlučuju za svoje jedinstvene protokole koji se zasnivaju na prethodno pobrojanim serijskim varijantama. Određivanje faze punjenja (*bulk*, *apsorption* i *float*) i regulacija vrednosti napona i struje punjenja na MPPT kontroleru, kontroleru vetrogeneratora i hibridnom pretvaraču od strane BMS-a jedan je od primera internog upravljanja.

4.2 Daljinski nadzor i upravljanje

Unapređene komunikacione tehnologije i moderne platforme omogućile su lak daljinski pristup i jednostavno upravljanje elektronskim uređajima u realnom vremenu. Uspostavljanje eksterne veze sa korisnikom sistema obavlja se putem internet veze i Cloud platforme napravljene od strane proizvođača uređaja za nadzor i upravljanje. Uređaj za nadzor i upravljanje prikuplja podatke sa uređaja i šalje na Cloud platformu kojoj pristupa korisnik sistema. Razmena podataka između korisnika i Cloud platforme obavlja dvosmerno, u realnom vremenu. Korisniku je omogućeno i upravljanje sistema, kao i upravljanje svakom komponentom ponaosob. Ovo uključuje promenu stanja komponenti (uključenje/isključenje), menjanje određenih parametara komponenti (primer: promena uslova za uključanje/isključenje DEA), ažuriranje operativnog sistema i firmvera opreme, itd. Upravljanje se odvija u realnom vremenu, tj. promene nad sistemom izvršavaju se trenutno, osim u specijalnim slučajevima.

4.3 Cloud platforma i softverske aplikacije

Radi ostvarenja veze sa Cloud platformom potrebno je povezati uređaj za nadzor i upravljanje na odgovarajući mrežni ruter koji ima pristup internetu. Veza između rutera i uređaja za nadzor i upravljanje može biti žična putem *UTP/STP* kabla (*Ethernet* veza) ili bežična putem *Wi-Fi* veze. Kontroler DEA povezuje se na mrežni ruter putem navedenih načina za umrežavanje kako

bi se ostvarila komunikacija sa Cloud platformom njegovog proizvođača. Paralelno, DEA se na ovaj način integriše u sam sistem i pridružuje međusobnom internom upravljanju.

Proizvođači opreme često se odlučuju za podršku pristupa uređajima preko *Bluetooth* tehnologije, putem posebne *Android/iOS* aplikacije za mobilne telefone. Uspostavljanje direktne komunikacije uređaja sa računarom moguća je putem serijskih protokola, serijskih uređaja za konverziju (ukoliko se ona zahteva) i *Windows/Linux* aplikacije. Ovo može biti vrlo korisno u slučajevima prekida internet veze i istovremenom potrebom za proverom sistema ili promenom određenog parametra nekog od uređaja.

5 PODRUČJA PRIMENE I PREDNOSTI KORIŠĆENJA

Opšta prednost svakog sistema napajanja koji uključuje obnovljive izvore energije jeste smanjenje emisije CO₂. Količina emitovanja štetnih gasova zavisi od ukupnog učinka nekonvencionalnih izvora u proizvodnji električne energije, snage potrošača, efikasnosti celokupnog sistema i algoritma upravljanja (koji jednim delom zavisi od korisnika, tj. njegovih potreba). Fleksibilnost, tj. mogućnost nadogradnje hibridnog sistema podrazumeva povećavanje snage nekonvencionalnih izvora električne energije, povećanje izlazne snage sistema i povećanje kapaciteta baterijskog skladišta. Višestruki izvori električne energije obezbeđuju redudansu u odsustvu jednog ili više izvora, pa samim tim i veću pouzdanost u napajanju potrošača.

Hibridni sistemi prvenstveno su našli primenu u sredinama gde ne postoji mogućnost izgradnje elektrodistributivnog priključka ili gde to nije ekonomski isplativo. Takav primer predstavlja napajanje baznih stanica mobilnih operatera zarad pokrivanja signalom određenog područja, napajanje meteoroloških stanica, stanica emisije tehnike i veze i benzinskih stanica. Nasuprot, njihova integracija sa elektrodistributivnim sistemom korisniku otvara mnogobrojne nove mogućnosti - smanjenje računa električne energije kroz njenu prodaju u višim tarifama i njeno preuzimanje u nižim tarifama (ukoliko je to neophodno) kao i smanjenje preuzimanja velike količine električne energije iz elektrodistributivnog sistema u periodima vršnog opterećenja (tzv. *Peak Shaving*). Ove funkcije mogu se naći i kod većih sistema za skladištenje električne energije.

Napredak fotonaponske i baterijske tehnologije, kao i energetske elektronike pozitivno su uticali na rad i upravljanje hibridnih sistema proširujući fleksibilnost i područja primene. Globalni rast proizvodnje i prodaje fotonaponskih panela poslednjih godina je eksponencijalan. Upotreba fotonaponske tehnologije evoluirala je od tržišta malih aplikacija do toga da postanu uobičajen i vrlo pristupačan izvor električne energije širom sveta. Nove topologije energetskih pretvarača dovele su do drastično poboljšane efikasnosti (95-99%), smanjujući tako toplotnu disipaciju i sopstvenu potrošnju hibridnog sistema. Litijum-jonske i litijum-gvožđe-fosfatne baterije, za razliku od svojih olovni prethodnika, nude veću gustinu energije po jedinici zapremine, efikasnost, duži životni vek i brže punjenje i pražnjenje. U poređenju sa energijom sunca, energija vetra još uvek nije našla široku primenu u hibridnim sistemima, a glavni razlozi tome su gabariti same vetroturbine, ekonomska isplativost, upitan kvalitet izrade (nekih proizvođača) i podrška proizvođača u integraciji sa ostalim komponentama sistema.

6 PRAKTIČNI PRIMERI I ISKUSTVA U DOSADAŠNJOJ EKSPLOATACIJI

6.1 Opis posmatranih hibridnih sistema

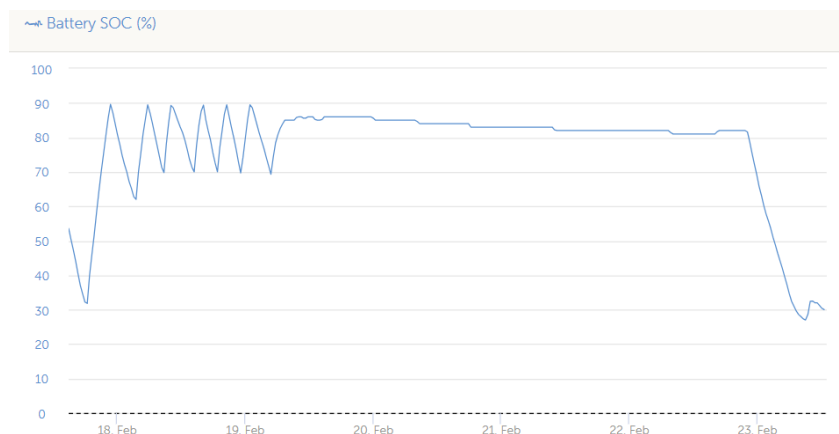
Od početka puštanja u rad praćeno je ponašanje osam OFF-Grid hibridnih sistema za potrebe napajanja baznih stanica jednog mobilnog operatera na različitim lokacijama u ruralnim područjima. U ovakvoj vrsti aplikacije strogo se zahteva stabilan i besprekidan izvor napajanja, tj. raspoloživost sistema mora biti maksimalna moguća. Sistemi su koncipirani bez vetroturbina, a pogledu razlike instalisane snage solarnih generatora (u proseku 12kWp) na svakoj od lokacija postoji minorna razlika. Radi postizanja veće proizvodnje solarnog generatora u zimskom vremenskom periodu (posebno u slučaju pokrivanja fotonaponskih panela snežnim pokrivačem) na određenim baznim stanicama jedan deo fotonaponskih panela vertikalno je montiran na antenski stub. Srednja snaga potrošača svake bazne stanice je individualna i kreće se u opsegu od 1,5kW do 4,5kW. Sistem napajanja je monofazni, te su hibridni pretvarači i DEA takođe monofazni. Potrebno je naglasiti da su za baterijska skladišta korišćene baterije dva različita proizvođača, dok su ostale glavne komponente sistema - MPPT kontroleri, hibridni pretvarači, uređaji za nadzor i upravljanje od istog proizvođača. Baterijska skladišta kao i DEA u potpunosti su komunikaciono kompatibilni sa uređajima za nadzor i upravljanje. Sve komponente jednog sistema smeštene su u jedan rek odgovarajućeg stepena zaštite u skladu sa izloženošću spoljnim uticajima. Iz ekonomskih razloga i radi smanjenja sopstvene potrošnje sistema, na zahtev Investitora u reku je instalirano samo ventilatorsko hlađenje (bez grejnog tela) i rek ne poseduje nikakvu termičku izolaciju.

6.2 Problem radne temperature baterijskog skladišta

Zimski period sa sobom donosi vremenske uslove koji mogu značajno uticati na funkcionisanje određenih komponenti sistema. Angažovanje solarnog generatora je tada minimalno, a rad DEA značajno povećan. Intervali točenja goriva i redovnih servisa takođe su uvećani.

Nepostojanje grejnog tela u rek ormanu i izolacije na stranicama rek ormana za posledicu ima drastično smanjenje radne temperature baterijskih jedinica (tokom zimskog perioda) koja može dostići donju kritičnu vrednost pri kojoj BMS sprečava punjenje. Potrošnja goriva je u tom slučaju povećana, a potencijal sunčeve energije u potpunosti neiskorišćen. Delimično rešenje predstavlja punjenje baterijskog skladišta radi održavanja radne temperature baterijskih jedinica u određenom opsegu. Tokom punjenja baterijskog skladišta povećava se radna temperatura baterijskih jedinica usled generisanja internih toplotnih gubitaka i toplotne disipacije pretvaračkih uređaja. Kada radna temperatura baterijske jedinice padne na zadatu vrednost (donji prag) DEA se uključuje, a hibridni pretvarač prebacuje se u *bypass* i ispravljački radni režim i puni baterijsko skladište. Po dostizanju zadate vrednosti radne temperature (gornji prag) DEA se isključuje, a hibridni pretvarač prebacuje u invertorski radni režim. Vrlo niska vrednost ambijentalne temperature tokom dužeg vremenskog perioda ne dozvoljava zagrevanje baterijskog skladišta sopstvenim toplotnim gubicima i toplotnom disipacijom pretvaračkih uređaja, te se dostiže donja kritična vrednost radne temperature. U ovom slučaju angažovanje DEA je konstantno i traje sve dok ambijentalna temperatura ne poraste i zajedno sa toplotnim gubicima u pretvaračkim uređajima ne zagreje baterijske jedinice iznad kritične vrednosti. Na slici 3 prikazano je stanje SoC (*State of Charge*) parametra u zavisnosti od angažovanja DEA (slika 5) pri niskim radnim temperaturama (slika 4) radi „samozagrevanja“ baterijskog skladišta. Vrednosti parametara maksimalne struje punjenja/praznjenja i maksimalnog napona punjenja baterijskog skladišta u zavisnosti od njegove radne temperature prikazane su na slici 6. Pretvarački uređaji (hibridni pretvarači i MPPT kontroleri) nisu imali problema sa

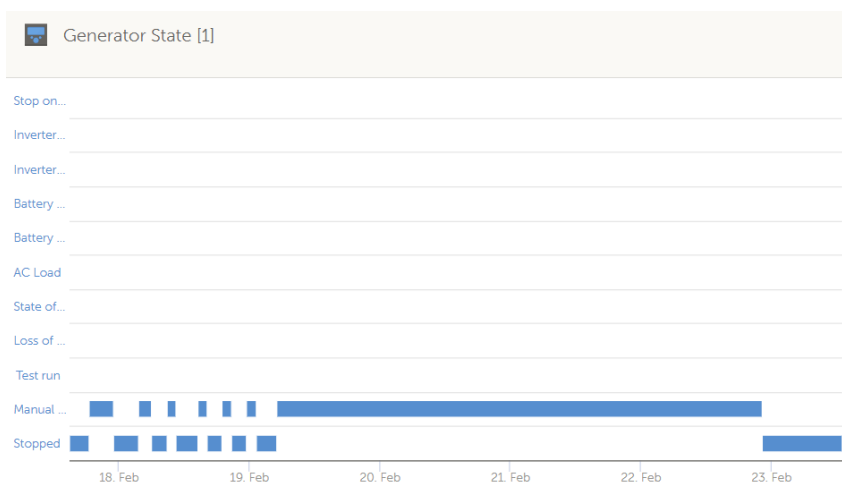
funkcionisanjem pri niskim radnim temperaturama. Pouzdanost u napajanju potrošača u ovom periodu nije bila ugrožena.



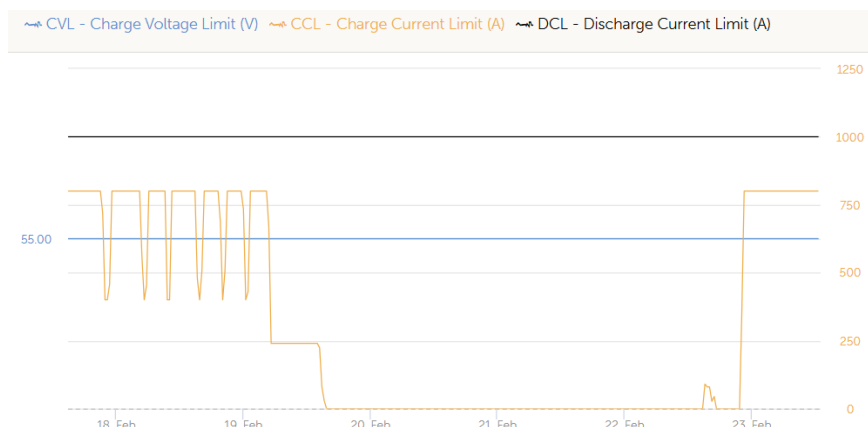
Slika 3: Vrednosti SoC parametra u zavisnosti od angažovanja DEA



Slika 4: Radna temperatura baterijskog skladišta



Slika 5: Promena stanja DEA u zavisnosti od radne temperature baterijskog skladišta



Slika 6: CVL (*Charge Voltage Limit*), CCL (*Charge Current Limit*) i DCL (*Discharge Current Limit*) parametri u zavisnosti od radne temperature baterijskog skladišta

Nasuprot, letnji period donosi povećane radne temperature opreme, ali i značajne uštede goriva. Ventilatorsko hlađenje pokazalo se kao optimalno rešenje u sprečavanju rada opreme sa znatno povišenim radnim temperaturama. Pouzdanost u napajanju potrošača nije bila ugrožena, niti je zabeleženo smanjenje performansi rada opreme u sistemu.

Instalacija aktivnog hlađenja preporučljiva je u oba slučaja, prvenstveno zbog produžavanja životnog veka baterijskog skladišta i pretvaračkih uređaja, kao i optimalnog korišćenja (ne)konvencionalnih izvora u zimskom periodu.

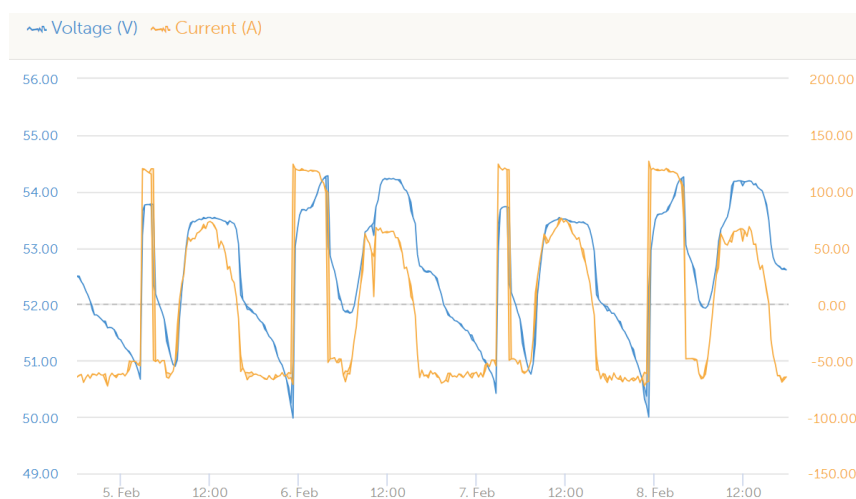
6.3 Problem preciznosti BMS algoritma

Na praćenim hibridnim sistemima algoritam promene radnog režima DEA podešen je tako da se njegovo uključenje ostvaruje kada SoC baterijskog skladišta padne na 25%, a isključenje kada se SoC dostigne 55%. Ovim se omogućava potencijalno punjenje preostalih 45% kapaciteta od strane solarnog generatora u slučajevima poboljšanja vremenskih uslova ili početka svitanja. Posmatran je rad BMS sistema dva različita proizvođača.

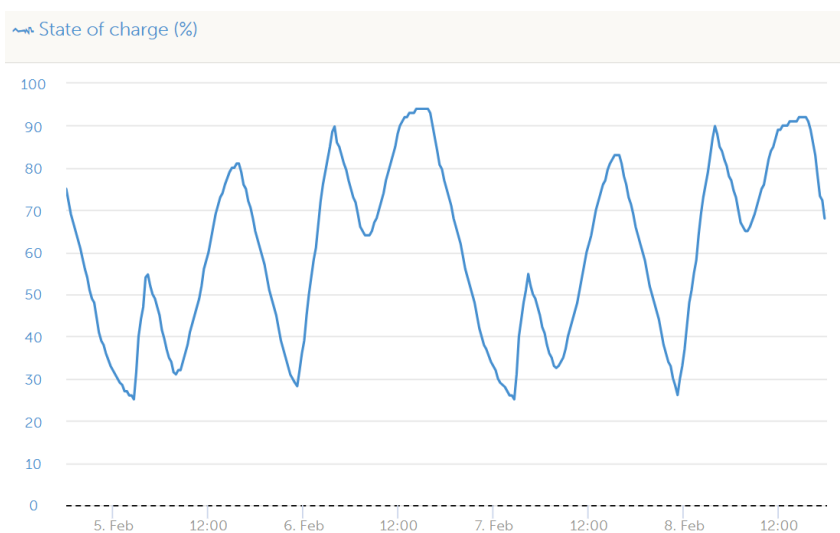
Zimski period donosi kraće i manje sunčane dane, te postoje vrlo male šanse potpunog punjenja baterijskog skladišta od strane solarnog generatora u skladu sa podešenim algoritmom punjenja. Sa druge strane, kapacitet baterijskog skladišta zavisi od radne temperature baterijskih jedinica i smanjuje se sa smanjenjem radne temperature. Uprkos ovim činjenicama, granice promene radnog režima DEA u zimskom periodu nisu prepodešavane. Unošenje greške pri proračunu SoC parametra u odnosu na radne uslove i parametre od strane BMS algoritma na dnevnom nivou može se smatrati zanemarljivim. Međutim, nemogućnost potpunog punjenja baterijskog skladišta u dužem vremenskom periodu, kao i promena radne temperature baterija u zavisnosti od ambijentalne temperature mogu dovesti do akumulacije dnevnih grešaka koje za posledicu imaju odstupanje vrednosti SoC parametra od stvarne. Kao primer može se uzeti napon na DC sabirnicama posle pražnjenja potpuno punog baterijskog skladišta do 25% SoC i napon na DC sabirnicama pri konstantnom punjenju i pražnjenju (nekoliko ciklusa) baterijskog skladišta od 25% SoC do određene vrednosti koja u većini slučajeva ne prelazi 65% SoC tokom zimskog perioda. Snaga potrošača bazne stanice može se smatrati konstantnom u toku dana. U prvom slučaju napon na DC sabirnicama bez angažovanja MPPT kontrolera koji bi taj napon povećali (noćni period) je oko 51V. U drugom slučaju napon na DC sabirnicama bez angažovanja MPPT kontrolera koji bi taj napon povećali je oko 48V, što predstavlja granicu dubokog pražnjenja baterijskog skladišta, te se invertorski radni režim hibridnog pretvarača prekida radi zaštite

baterijskog skladišta od prekomernog pražnjenja tj. potrošači ostaju bez napajanja. Radi rešavanja problema, algoritam je podešen tako da se, između ostalog, DEA uključuje kada napon na DC sabirnicama opadne na 50 V i radi sve dok se SoC baterijskog skladišta ne dostigne 90%. Potpuno punjenje baterijskog skladišta je poželjno, ali struja punjenja drastično opada u granicama 90-100% SoC što za posledicu ima duži rad DEA. Na slikama 7 i 8 prikazan je dijagram distribucije napona i struje baterijskog skladišta i vrednosti SoC parametra tokom posmatranog vremenskog perioda, a na slici 9 prikazane su promene stanja DEA u zavisnosti od dostizanja donjeg praga napona i gornjeg praga SoC parametra. Vrednosti radne temperature baterijskog skladišta u posmatranom vremenskom periodu prikazane su na slici 10.

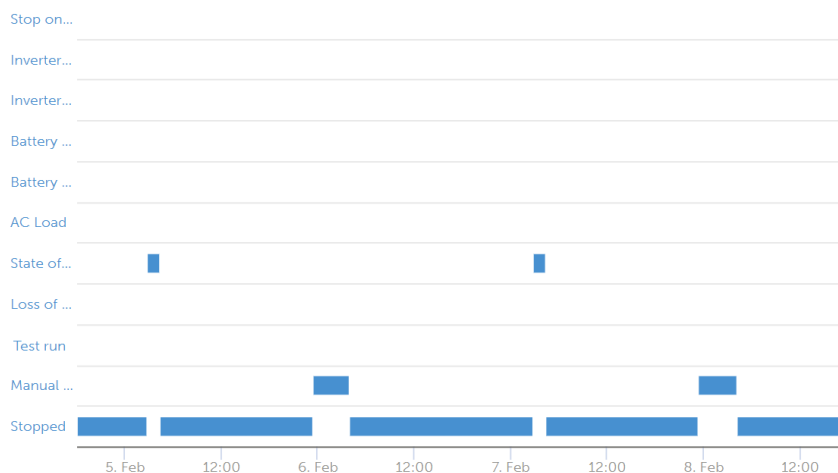
Tokom letnjeg perioda nisu zabeležena odstupanja parametara koji bi ugrozili napajanje potrošača. Razlog tome je skoro svakodnevno potpuno punjenje baterijskog skladišta od strane solarnog generatora, čime se sprečava akumulacija dnevnih grešaka BMS-a.



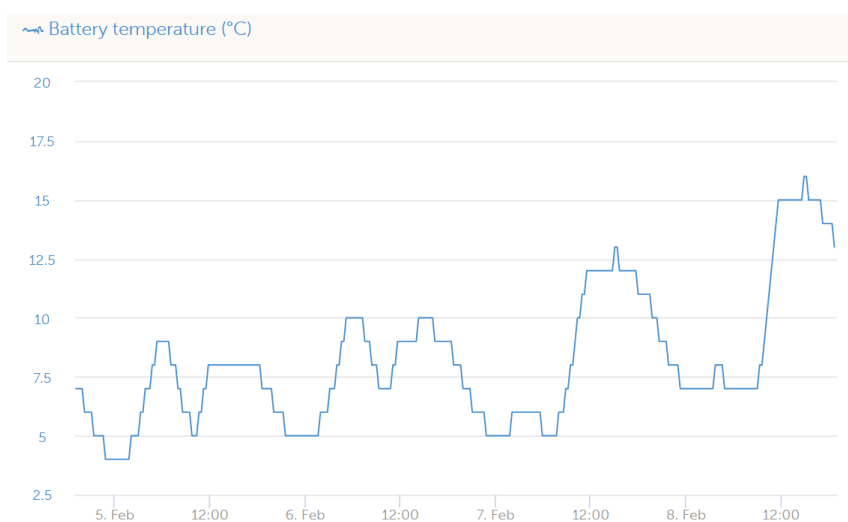
Slika 7: Vrednosti napona i struje tokom posmatranog vremenskog perioda



Slika 8: Vrednosti SoC parametra tokom posmatranog vremenskog perioda



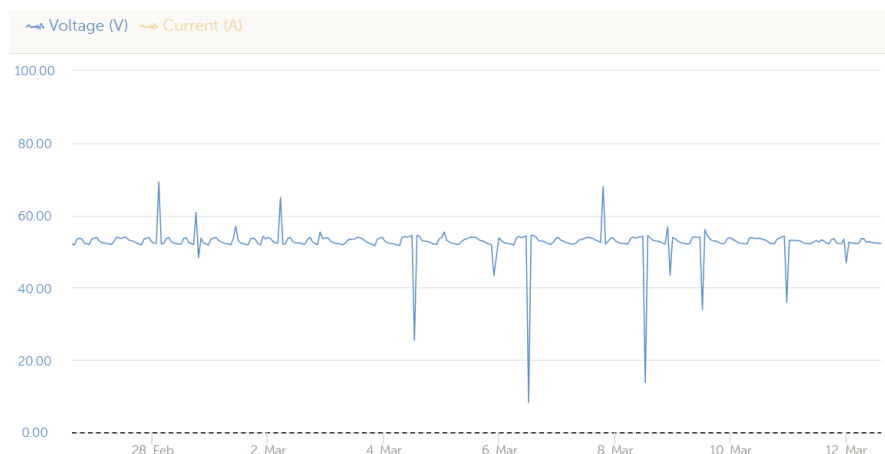
Slika 9: Promene stanja DEA u zavisnosti od dostizanja donjeg praga napona i gornjeg praga SoC parametra



Slika 10: Vrednosti radne temperature baterijskog skladišta

6.4 Problem netačnih očitavanja BMS-a i prosleđivanje informacije

Tokom posmatranog perioda zabeležen je problem prosleđivanja netačnih informacija od strane BMS-a jednog od proizvođača ka ostalim uređajima u vrlo kratkom vremenskom periodu (reda milisekundi). Shodno konceptu sistema, rad pretvaračkih uređaja zavisi od informacija dobijenih od BMS-a. Problem se dešavao vrlo retko, ali je ugrožavao rad celokupnog sistema. Isključivanje hibridnog pretvarača po dobijanju netačne informacije o trenutnoj vrednosti napona na baterijskom skladištu (npr. 8VDC) radi zaštite baterijskih jedinica od dubokog pražnjenja ostavljalo je potrošače bez napajanja. Problem je rešen zabranom prosleđivanja informacije o trenutnoj vrednosti napona sa BMS-a, te se u tom slučaju validne informacije dobijaju sa internih mernih senzora u pretvaračkim uređajima. Na slici 11 prikazan je primer netačnih očitavanja napona od strane BMS-a.



Slika 11: Vrednosti netačnog očitavanja parametra napona od strane BMS-a

6.5 Problem nestabilnosti rada DEA

Nove verzije firmvera donose sa sobom ispravke određenih problema, kao i nove funkcije koje se pre svega odnose na proširenu mogućnost upravljanja komponentama. Ažuriranje firmvera obično pokreće korisnik u zavisnosti od vrste problema koji utiču na stabilno funkcionisanje sistema, kao i potrebe za novim funkcijama. Tokom perioda testiranja nisu zabeleženi novi problemi koje bi nova verzija firmvera mogla potencijalno uvesti u sistem i ugrozila stabilno rad sistema. Na dva praćena hibridna sistema javio se problem nestabilnosti rada DEA, tj. variranje broja obrtaja, a samim tim i izlazne frekvencije. Ispitivanjem i proverom svih električnih veza, kao i zamenom DEA i hibridnih pretvarača problem nije rešen, te je hibridni pretvarač prebačen u odgovarajući radni režim prilagođen za rad sa „slabim izvorima napajanja“. Ovo za posledicu ima narušavanje faktora snage DEA - spuštanje sa „1“ na „0,95“ induktivno i smanjenu izlaznu struju u pretvaračkom radnom režimu za 30%. Treba napomenuti da se problem javio kod različitih proizvođača baterijskih jedinica, čime je baterijsko skladište izuzeto kao potencijalni uzročnik. MPPT kontroleri su tokom svih testiranja bili isključeni i nisu imali uticaja na rad DEA. Izlaskom nove verzije firmvera hibridnog pretvarača u potpunosti je rešen problem nestabilnog rada DEA.

7 ZAKLJUČAK

Ubrzano tehnološko napredovanje u oblastima fotonaponske, pretvaračke i baterijske tehnologije značajno je poboljšalo pouzdanost, fleksibilnost i efikasnost hibridnih sistema. Smanjenjem troškova proizvodnje omogućena je veća pristupačnost opreme na tržištu. Kao primer može se istaći bifacijalna fotonaponska tehnologija koja je donela poboljšanu efikasnost i uvećanje snage fotonaponskog panela i to bez povećanja njegovih fizičkih dimenzija i cene u odnosu na monofacijalne fotonaponske panele. Upotrebom novih tehnika konverzije električne energije u energetskej elektronici popela je efikasnost pretvaračkih uređaja na vrlo visok nivo. Naglašava se primena natrijum-jonskih baterija kao alternativa litijum-jonskim i litijum-gvožđe-fosfatnim baterijama nudeći veću gustinu električne energije po jedinici zapremine, bolje performanse i duži životni vek. Razvoj IT tehnologije dao je veliki značaj u integraciji komponenti različitih proizvođača opreme i doneo moderan upravljački interfejs Cloud platformi omogućujući lakše upravljanje sistemom.

Shodno razvoju tehnologije, inovacijama, izazovima i ekonomskoj isplativosti, hibridni sistemi napajanja nalaze sve veću primenu u mnogim zahtevnim aplikacijama u kojima se podrazumevaju stabilnost i pouzdanost napajanja potrošača.