Broj rada: R3-05
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-05_181

IMPLEMENTACIJA JEDINSTVENOG UPRAVLJAČKOG SISTEMA ZA POSTROJENJE, SOLARNU ELEKTRANU I SKLADIŠTE ELEKTRIČNE ENERGIJE

IMPLEMENTATION OF JOINT CONTROL SYSTEM FOR SUBSTATION, PHOTOVOLTAIC POWER PLANT AND BATERY ENERGY STORAGE SYSTEM

Aleksandar MARJANOVIĆ*, Siemens doo Beograd, Elektrotehnički fakultet; Univerzitet u Beogradu, Srbija
Uroš NJEGOVAN, Siemens Energy doo Beograd, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija,
Prof. dr Zoran STOJANOVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija
Prof. dr Željko ĐURIŠIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Moderni elektroenergetski sistemi u 21. veku se zasnivaju na sve većoj potrebi društva za električnom energijom ali i na energetskoj tranziciji koja podrazumeva zadovoljenje što većeg dela potrošnje električne energije iz obnovljivih izvora. Upravo iz tih razloga, svedoci smo velikog broja solarnih elektrana najrazličitije veličine koje su u poslednjih par godina priključene ili su u fazi priključenja na elektroenergetski sistem. Distributivnu mrežu u navedenim okolnostima ne karakteriše radijalan tok energije za koji je prvobitno dizajnirana ka potrošačima već ona postaje aktivna sa sve značajnijim proizvodnim jedinicama na srednjem i niskom naponskom nivou. Operatori distributivnog sistema u takvim, znatno kompleksnijim, pogonskim režimima proširuju postojeće pravilnike o radu sistema tzv "Grid Code" i propisuju tehničke zahteve za priključenje. Tehnički zahtevi znatno variraju od operatora do operatora ali im je zajedničko da postaju složeniji kako se povećava broj zahteva za priključenje i povezanih elektrana jer se javlja potreba za različitim režimima rada ali i kontrolnim mehanizmima za održavanje sistemskih parametara u strogim granicama. U cilju ispunjenja propisanih tehničkih zahteva, fotonaponske elektrane, koje su i najčešće priključene na srednji napon, tipično koriste zaseban uređaj - kontroler koji za cilj ima da omogući razmenu podataka u realnom vremenu sa nadređenim dispečerskim centrom i u kome su implementirani algoritmi za upravljanje proizvodnim jedinica elektrane u cilju ispunjenja propisanih tehničkih uslova. U ovom radu opisan je objedinjen koncept upravljanja rasklopnom opremom, invertorima i skladištem električne energije koji je implementiran u jedinstven kontroler i pušten u rad u solarnoj elektrani nominalne snage 10 MW. Dat je pregled zahtevanih funkcionalnosti od strane operatora distributivnog sistema kao i krajnjeg korisnika uz specifične radne režime invertora (instalisane snage 10 MW) i skladišta električne energije (instalisane snage 8.9 MW) kao i osvrt na rezultate sprovedenih testova i ogleda usaglašenosti sa tehničkim zahtevima.

Ključne reči: Upravljanje fotonaponskim elektranama, Skladišta elektricne energije, SCADA

* Aleksandar Marjanovic, aleksandar.marjanovic@siemens.com

ABSTRACT

Modern power systems in the 21st century are based on the growing need for electricity, as well as on the energy transition, which primarily entails meeting as much of electricity consumption as possible from renewable energy sources. For these reasons, we are witnessing a large number of solar power plants of various sizes that have, in recent years, been connected or are in the process of being connected to the power system. Under these circumstances, the distribution network is no longer characterized by a radial flow of energy from the transmission system to consumers. Instead it becomes active, with increasingly significant generating units at medium and low-voltage levels. Distribution system operators, in such considerably more complex operating regimes, expand the existing system operation regulations, the so-called "Grid Code," and prescribe technical requirements for connection. These technical requirements vary significantly from operator to operator, but they share the common feature of becoming more complex as the number of connection requests and associated power plants increases, due to the need for different operating modes and control mechanisms to maintain system parameters within strictly defined limits. To meet the prescribed technical requirements, photovoltaic power plants most often connected at medium voltage typically use a separate device - controller, whose purpose is to enable real-time data exchange with the supervisory dispatch center. Within this controller, algorithms are implemented to control the generating units of the power plant in order to fulfill the prescribed technical conditions. This paper describes a concept for control of switchgear, inverters, and energy storage, implemented in a single controller and commissioned in a solar power plant with a nominal capacity of 10 MW. An overview is provided of the functionalities required by the distribution system operator as well as the end user, along with specific operating modes of the inverters (installed capacity of 10 MWp) and the energy storage system (installed capacity of 8.9 MWp), with reference to the results of conducted tests and proofs of compliance with technical requirements.

Keywords: Photovoltaic plant control, BESS control, SCADA

UVOD

Elektroenergetski sistem koji danas koristimo razvijan je prema višedecenijskom konceptu da se najveći deo proizvodnje električne energije obavlja u velikim proizvodnim jedinicama koje su priključene na prenosnu mrežu. Distributivna mreža je planirana i razvijana za priključenje potrošača i njihovo pouzdano napajanje električnom energijom, a ne za integraciju elektrana. Povezivanje fotonaponskih elektrana, a neretko i drugih obnovljivih izvora energije, na mrežu srednjeg i niskog napona, donosi mnoge izazove za operatore distributivnog sistema. Osnovni tehnički izazovi leže u intermitentnosti i neupravljivosti proizvodnje kao i u različitim scenarijima tokova snaga i naponskih prilika usled čega je sve teže održati radne parametre sistema u uskim propisanim granicama za bezbedan i pouzdan rad. Prethodnih decenija se intenzivno radilo na razvoju i unapređenju tehnologija za skladištenje električne energije kao jednog od potencijalnih rešenja za navedene nedostatke. Skladišta električne energije veće instalisane snage mogu obezbediti ravnomerniji rad obnovljivih izvora ali i omogućiti pomeranja maksimuma proizvodnje i ublažavanja vršnih opterećenja. Komercijalna i rezidencijalna skladišta se pokazuju kao finansijski isplativa posebno u uslovima dinamičkog tarifiranja električne energije i velikih raspona u ceni na berzi električne energije kakve su trenutno prisutne u našem regionu i u Evropi. Posebno značajan scenario u poslednjih godinu dana je kombinacija fotonaponskih elektrana i baterijskih skladišta električne energije u tzv.

hibridne elektrane, čime se obezbeđuju dodatne funkcionalnosti i mogućnosti veće optimizacije rada sa aspekta injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga u tački priključenja na elektroenergetski sistem. Osnovna karakteristika baterijskih skladišta električne energije je njihova upravljivost i mogućnost izuzetno brzog povećanja odate odnosno apsorbovane aktivne i reaktivne snage. Jedan od najčešće teorijski demonstriranih primera je primarna kontrola frekvencije pomoću baterijskog skladišta koja se postiže korišćenjem veoma brzog kontrolera koji prema predefinisanoj krivoj ili formuli varira aktivnu snagu razmene skladišta sa mrežom. Činjenica da su baterijski paketi sa uskladištenom električnom energijom povezani na mrežu preko energetskih pretvarača rezultuje specifičnim pogonskim dijagramom sa mogućnošću rada u sva četiri kvadranta koji podseća na pun krug ili pravougaonik sa zaobljenim ivicama što otvara mogućnost korišćenja baterijskog skladišta u funkciji lokalne regulacije napona gde se, slično kao i kod regulacije frekvencije, u algoritmu kontrolera računa postavna vrednost za reaktivnu snagu skladišta u odnosu na devijaciju izmerenog napona u mreži [1]. Tehničke mogućnosti koje otvara korišćenje fotonaponskih elektrana zajedno sa baterijskim sistemima za skladištenje električne energije uslovljene su i propisanim pravilima o radu i tehničkim uslovima za priključenje takvih objekata [1]. U prvom poglavlju rada opisana je hibridna elektrana sa svojim celinama i tehničkim karakteristikama koja je izgrađena i puštena u rad. Zahtevi operatora sistema kao i krajnjeg korisnika podrazumevali su implementaciju složenog i specifičnog sistema upravljanja na kome su autori radili. Uspešno testiranje po funkcionalnostima kao i postignuti rezultati prikazani su u drugom poglavlju koji daje uvid u tok i izgled testa usaglašenosti jednog takvog objekta.

1 PREDMETNA ELEKTRANA

U uvodu je dat kratak pregled operativnih mogućnosti koje mogu imati fotonaponske elektrane i baterijska skladišta električne energije. Preduslov je da sam dizajn, odnosno arhitektura elektrane, omogućava složeno upravljanje svim proizvodnim jedinicama, i fotonaponskim i baterijskim invertorima, u realnom vremenu. Kombinovana hibridna elektrana se može podeliti na 3 celine: proizvodne jedinice sa pripadajućim jednosmernim kolima, energetska mreža elektrane sa komunikacionom infrastrukturom i sabirno razvodno postrojenje za predaju električne energije sa pripadajućim kontrolerom i upravljačkim SCADA sistemom.

1.1 Proizvodne jedinice

Fotonaponski deo elektrane sastoji se od solarnih panela na konstrukcijama na zemlji međusobno povezanim u stringove (nizove) koji su povezani na 84 invertora pojedinačne snage na naizmeničnoj strani od 120 kW. Ukupna instalisana snaga fotonaponske elektrane iznosi 10,08 MW. U invertorima su integrisane zaštitne funkcije nadzora stringova, prekostrujne zaštite, kao i zaštite od prenapona i obrnutog smera DC struje. Naizmenični radni napon na izlazu iz invertora je 400 V. Invertori su komunikaciono grupisani na 8 komunikacionih koncentratora – "*Smart Loggera*", putem kojih se obavlja komunikacija sa kontrolerom. Fotonaponski sistem je podeljen u 4 grupe snage po 1,32 MW (11 invertora) i 4 grupe snage po 1,2 MW (10 invertora). Baterijski deo elektrane sastoji se od 48 baterijskih paketa izrađenih u litijum-fosfat-gvožđe tehnologiji. Pojedinačne snage paketa iznose 213 kW i povezane su na dvosmerne invertore visoke efikasnosti i gustine snage. Radni naponi invertora su 1500V sa jednosmerne strane i 0,8 kV sa naizmenične strane. Ukupna snaga baterijskog skladišta iznosi 8,9 MW dok je kapacitet 17,8 MWh. Baterijski paketi i invertori su grupisani u 4 celine, svaka snage od 2,25 MW i kapaciteta 4,5MWh. Svaka od grupa poseduje po jedan komunikacioni koncentrator – "*Smart Logger*" preko koga se obavlja komunikacija sa kontrolerom.

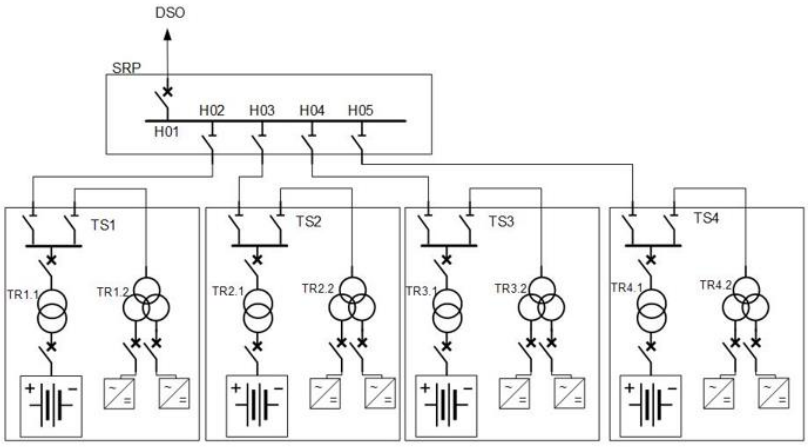
1.2 Energetska mreža

Naizmenična kola fotonaponskih invertora su povezana na 4 transformatorske stanice 35/0,4/0,4 kV, svaka snage 2,5 MVA označeni kao TR1.2, TR2.2, TR3.2 i TR4.2 na slici 1. Postrojenja od rasklopne opreme poseduju po upravljivi vazdušni prekidač na niskonaponskoj 0,4 kV strani transformatora dok je 35 kV strana direktno kablom povezana na susedno postrojenje.

Postrojenja baterijskog skladišta čine četiri transformatorske stanice 35/0,8 kV, označeni kao TR1.1, TR2.1, TR3.1 i TR4.1 na slici 1. Pripadajuće srednjenaponsko postrojenje 35 kV služi za priključenje lokalnog transformatora baterijskog skladišta, ali i kao ulaz-izlaz veza za izvodne kablove 35 kV. Na taj način se na jednom kraju omogućava povezivanje sabirnog razvodnog postrojenja elektrane a na drugom transformatorska stanica fotonaponskih invertora, kao što je prikazano na slici 1. Svako od postrojenja se sastoji od dve izvodne ćelije sa rastavljačima i uzemljivačima i jednom transformatorskom ćelijom sa prekidačem, tropoložajnim rastavljačem/uzemljivačem, strujnim transformatorima i odgovarajućim uređajem za zaštitu transformatora. Komunikaciona infrastruktura između osam komunikacionih koncentratora fotonaponskih invertora i četiri od baterijskog skladišta je izvedena monomodnim optičkim vlaknima u topologiji zvezda na centralni mrežni svič u ormanu kontrolera.

1.3 Sabirno razvodno postrojenje

Sabirno rasklopno postrojenje, označeno kao SRP na slici 1, projektovano je za prihvat 35 kV kablovskih vodova elektrane. Iz njega polazi povezni vod 35 kV za priključenje elektrane na distributivnu mrežu uvođenjem u obližnju primarnu transformatorsku stanicu pod nadležnošću operatora distributivnog sistema. Postrojenje je povezano sa nesekcionisanim sabirnicama, sadrži ukupno 5 ćelija, gde je prva vodno-merna prekidačka ćelija za priključenje na mrežu, a preostale 4 rastavljačke ćelije služe za priključenje TS 35/0,8 kV. Vodno-merna ćelija opremljena je i mikroprocesorskim zaštitnim uređajem (MPZU) sa specificiranim zaštitnim funkcijama i podešenjima u skladu sa propisanim tehničkim zahtevima za priključenje. Ćelija H01 opremljena je i mernim uređajem čije izmerene električne veličine kontroler sakuplja komunikacionim putem i koristi kao referentne vrednosti odnosno povratnu spregu prilikom regulacije elektrane. Merni uređaj se ne koristi za evaluaciju kvaliteta el. energije.



Slika 1. Jednopolna šema elektrane

2 IMPLEMENTACIJA I TESTIRANJE OBJEDINJENOG SISTEMA UPRAVLJANJA

Sistem zaštite i upravljanja dizajniran je da ispuni pre svega tehničke zahteve i radne parametre elektrane propisane od strane operatora distributivnog sistema, a potom i funkcionalne operativne zahteve korisnika elektrane. Sistem se sastoji od industrijskog kontrolera u kome su alocirane sve komunikacione i kontrolne funkcije, operatorske radne stanice sa SCADA sistemom, sistema za vremensku sinhronizaciju i komunikacionog sistema. Komunikacioni sistem obezbeđuje kontrolisanu i selektivnu razmenu podataka sa proizvodnim jedinicama u elektrani (baterijskim i fotonaponskim invertorima), uređajima u transformatorskim stanicama (zaštitni releji i merni uređaji), nadređenim dispečerskim centrom operatora distributivnog sistema kao i daljinskim upravljačkim centrom korisnika elektrane.

Osnovni tehnički zahtevi za monitoring i upravljanje fotonaponskom elektranom, koji su propisani od operatora distributivnog sistema, obuhvataju prenošenje predefinisanih signala i merenja iz elektrane ka nadređenom dispečerskom centru operatora distributivnog sistema. Potrebno je da obezbede prijem komandi za prekidač u izvodnoj ćeliji sabirnog razvodnog postrojenja H01, kao i postavnih vrednosti za aktivnu snagu, reaktivnu snagu i faktor snage. Usvojena konvencija za referentne smerove postavnih veličina je generatorska što znači da proizvodnja aktivne odnosno reaktivne snage ima pozitivan predznak. Nadležni operator za dati region nije propisao nikakve dodatne funkcionalne zahteve koji se tiču baterijskog skladišta osim izdatih limita aktivne snage preuzimanja (40 kW) i predaje (9,99MW) u tački priključenja. Iz tog razloga se za postizanje postavnih vrednosti u prikazanom testiranju koristi isključivo dostupna energija Sunčevog zračenja, a baterijski podsistem je neaktivan dok je nadležnost upravljanja kod operatora. Celokupni zahtevi su funkcionalno testirani na samoj elektrani tokom probnog rada u vidu testa usklađenosti u prisustvu predstavnika investitora i operatora distributivnog sistema. Kroz ispitivanje komandi i postavnih vrednosti testirana je i komandna sekvenca koja zahteva aktivaciju datog režima kao i povratak u nominalni radni režim, proizvodnju maksimalne aktivne snage uz nultu proizvodnju reaktivne snage, nakon deaktivacije upravljanja od strane dispečerskog centra.

2.1 Test usklađenosti - kontrola aktivne snage elektrane

Ovaj test obuhvata proveru reagovanja elektrane na zadatu vrednost odate aktivne snage u tački priključenja. Radnu tačku je potrebno postići postepeno, propisanim gradijentom (~20 kW/s) i zadržati sa adekvatnom preciznošću dok to omogućava iradijacija. Elektrana je u trenutku zadavanja prve postavne vrednosti radila sa aktivnom snagom od 4,98 MW u izvodnoj ćeliji H01. Smanjenje proizvodnje na 1,98 MW, prikazano na slici 2, postiže se u 12:38, a postavna vrednost od 2 MW je primljena u 12:32. U narednoj sekvenci zadata je postavna vrednost od 3 MW koju kontroler održava 2 minuta, nakon čega se nadređeni dispečerski centar deaktivira i elektrana postepeno povećava snagu na maksimalnu raspoloživu vrednost. Plava linija na slici 2. označava postavnu vrednost za aktivnu snagu dok crna linija predstavlja merenje aktivne snage iz mernog uređaja u izvodnoj ćeliji H01.



Slika 2. Dijagram testiranja odziva na referencu aktivne snage elektrane

2.2 Test usklađenosti - upravljanje reaktivnom snagom elektrane

Naredni test je provera odziva elektrane na zadatu vrednost odate ili preuzete reaktivne snage u tački priključenja. Radnu tačku je potrebno postići postepeno, propisanim gradijentom (~30 kVAr/s) i zadržati sa adekvatnom preciznošću ali u svakom trenutku uzimajući u obzir limite u pogledu dozvoljene prividne snage invertora. Elektrana je u trenutku zadavanja prve postavne vrednosti za reaktivnu snagu radila sa nultom proizvodnjom reaktivne snage u invertorima, gde se iz priključne ćelije preuzima određena vrednost reaktivne snage sopstvene potrošnje (~200 kVAr). Prva postavna vrednost je u režimu generisanja reaktivne snage, gde operator zahteva da se u tački priključenja odnosno u ćeliji H01 predaje u mrežu 0,8 MVAr. Kontroler postepeno povećava proizvodnju reaktivne snage u svakom od invertora i postiže i održava vrednost od 0,79 MVAr dok zbirna postavna vrednost u invertorima dostiže 0,88 MVAr. Razlika, odnosno višak od ~0,09 MVAr predstavlja reaktivnu snagu izgubljenu u energetskoj mreži elektrane koju je potrebno kompenzovati dodatnom proizvodnjom u invertorima kako bi se postigla zahtevana vrednost u tački priključenja.

U narednom koraku, operator postavlja radnu tačku od 0,7 MVAr u režimu apsorbovanja reaktivne snage, a ukupna zadata vrednost reaktivne snage od strane kontrolera ka invertorima iznosi -0,59 MVAr. Razlika odnosno manjak u ovom slučaju potiče od činjenice da sopstvena potrošnja elektrane apsorbuje približno 100 kVAr te je i manje reaktivne snage potrebno u invertorima. Ljubičasta linija na slici 3. označava ukupnu komandnu vrednost izračunatu od strane kontrolera i distribuiranu invertorima dok crvena linija predstavlja merenje reaktivne snage iz mernog uređaja u izvodnoj ćeliji H01.



Slika 3. Dijagram testiranja odziva na referencu reaktivne snage elektrane

2.3 Test usklađenosti - kontrola faktora snage elektrane

Naredni test predstavlja proveru reagovanja elektrane na zadatu vrednost faktora snage u tački priključenja. Potrebnu reaktivnu snagu da se zadati faktor postigne kontroler preračunava veoma brzo i u odnosu na trenutnu vrednost faktora snage postepeno je skalira koristeći kontrolu po povratnoj petlji – merenju faktora snage u izvodnoj ćeliji H01. Treba napomenuti da se u svakom momentu uzimaju u obzir i specificirani gradijenti reaktivne snage kao i definisani limiti invertora. Elektrana je u trenutku zadavanja prve postavne vrednosti radila sa nultom proizvodnjom reaktivne snage, odnosno sa faktorom snage približnom -1, gde se iz priključne ćelije preuzima određena vrednost reaktivne snage sopstvene potrošnje (-0,18 MVAr). Prva postavna vrednost za faktor snage iznosi 0,98. Uz proizvodnju aktivne snage od ~5 MW u datom trenutku, kontroler izračunava da elektrana treba da predaje u mrežu ~1 MVAr za postizanje date radne tačke i u odnosu na početnu vrednost reaktivne snage u ćeliji H01 od -0.18 MVAr postepeno podiže proizvodnju reaktivne snage u invertorima prateći odziv sistema i zadati gradijent ali korigujući i eventualnu promenu aktivne snage u ćeliji H01. Postavna vrednost se postiže i zadržava sa ukupnom proizvodnjom reaktivne snage u invertorima od ~1,2 MVAr.

U narednom delu testa, iz dispečerskog centra se zadaje druga postavna vrednost za faktor snage od -0,98 koja se postiže apsorbovanjem reaktivne snage u invertorima od -0.84 MVAr. Ljubičasta linija na slici 4. označava ukupnu komandnu vrednost reaktivne snage izračunatu od strane kontrolera i distribuiranu invertorima, crvena linija predstavlja merenje reaktivne snage iz mernog uređaja u izvodnoj ćeliji H01, a siva linija predstavlja postavnu vrednost faktora snage.

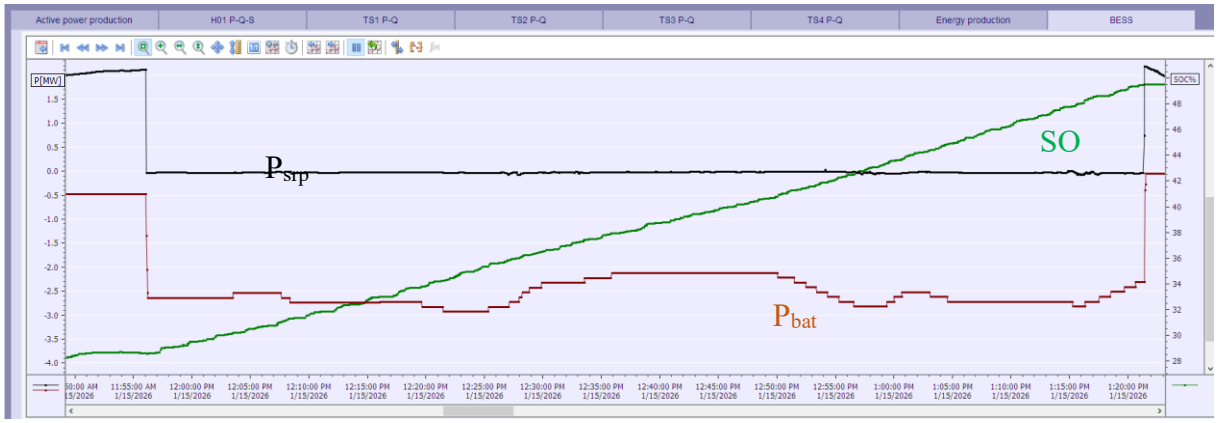


Slika 4. Dijagram testiranja zadate vrednosti faktora snage elektrane

2.4 Funkcionalno testiranje upravljanja baterijskim skladištem električne energije

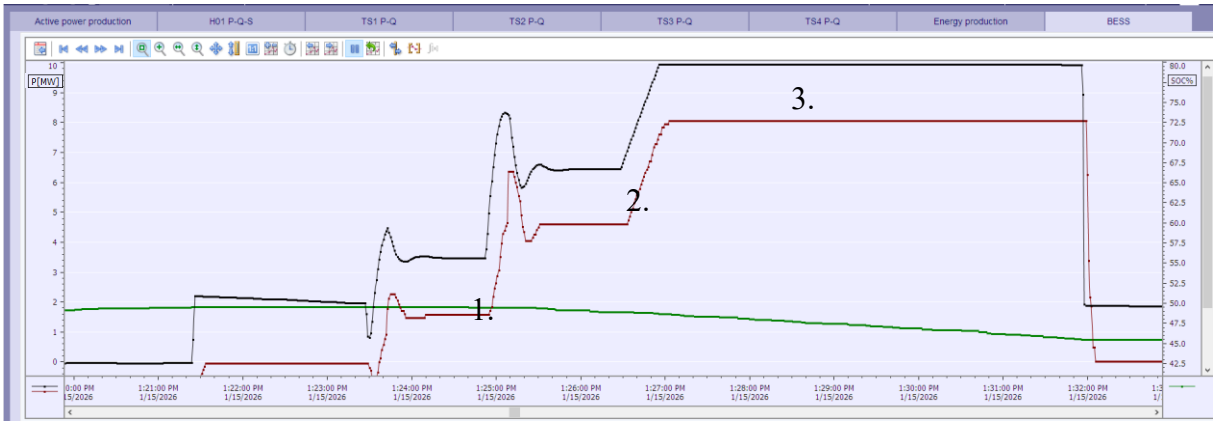
Ispitivanje baterijskog sistema se sastojalo od testiranja kompletne signalizacije i merenja iz četiri ugrađena komunikaciona koncentratora ka kontroleru i lokalnom SCADA sistemu, kao i testiranja funkcija punjenja i pražnjenja skladišta uz postavljanje limita u realnom vremenu. Snaga punjenja baterijskog skladišta se limitira aktivnom snagom proizvodnje iz invertora fotonaponske elektrane tako da ni u jednom trenutku, bez obzira na postavnu vrednost, ne dođe do preuzimanja električne energije iz distributivne mreže snagom većom od propisane, odnosno 40 kW. Aktivna snaga pražnjenja baterijskog skladišta se limitira tako da snaga predaje električne energije u mrežu ne prevazilazi odobrenih 9,99 MW na mestu priključenja.

Prilikom testiranja punjenja skladišta elektrana je radila sa aktivnom snagom od 2,18 MW u izvodnoj ćeliji H01. Komandom sa SCADA sistema se baterije postavljaju u režim punjenja sa postavnom vrednošću od 4 MW, znatno većom od celokupne snage proizvodnje iz invertora. Međutim zbog implementirane funkcije limita snage punjenja, kontroler u datom režimu velikom brzinom preračunava postavnu vrednost za svaku bateriju u odnosu na trenutnu proizvodnju elektrane, te vrednost aktivne snage u priključnoj ćeliji maksimalno pada u jednom trenutku na -11 kW, što je ispod granične propisane snage za preuzimanje od 40 kW. Crna linija slici 5. označava izmerenu aktivnu snagu na mernom uređaju u izvodnoj ćeliji H01, crvena linija predstavlja ukupnu snagu punjenja baterija, dok zelena linija predstavlja status napunjenosti baterija. U zadatom režimu rada elektrana je provela nešto manje od 30 minuta i status napunjenosti baterija (SOC) se povećava sa 28.2% na 48.8%.



Slika 5. Dijagram odziva na referencu punjenja baterijskog skladišta

Nakon deaktivacije režima punjenja i u trenutku zadavanja prve postavne vrednosti za pražnjenje baterijskog skladišta, elektrana je radila sa proizvodnjom aktivne snage od 2,08 MW. Crna linija slici 6. označava izmerenu aktivnu snagu na mernom uređaju u izvodnoj ćeliji H01, crvena linija predstavlja ukupnu snagu punjenja baterija, dok zelena linija predstavlja status napunjenosti baterija. Cilj testa pražnjenja je provera limita injektiranja snage od 9,99MW na mestu priključenja. Dakle, vrednost kojom je limitirano pražnjenje baterije u realnom vremenu odgovara razlici između maksimalne dozvoljene snage 9,99 MW i trenutne vrednosti proizvodnje iz fotonaponskih invertora solarne elektrane. Snaga pražnjenja skladišta je postepeno povećavana, u prvom koraku, broj 1. na slici 6, postavna vrednost aktivne snage baterija je stavljena na 1,5 MW čime aktivna snaga u mestu priključenja elektrane raste na 3,57 MW. U sledećem koraku, označenom brojem 2. postavna vrednost povećana na 4,5 MW i tada celokupna aktivna snaga injektiranja u tački priključenja dostiže 6,61 MW. U poslednjem, trećem koraku, baterijskom skladištu je zadata maksimalna vrednost aktivne snage koja ostaje limitirana na ~8 MW dok se aktivna snaga na izvodnoj ćeliji H01 u trajanju od nepunih 5 minuta održava na 9.9 MW. Status napunjenosti baterija se tokom testa pražnjenja smanjio sa 48.8% na 45.5%.



Slika 6. Dijagram testiranja pražnjenja baterijskog skladišta

Iz priloženih rezultata testiranja kontrolera fotonaponske elektrane i baterijskog skladišta izveden je zaključak da je logika i podešenje kontrolera uspešno prošlo sva ispitivanja.

3 ZAKLJUČAK

Decentralizovana proizvodnja električne energije sa jedinicama za skladištenje koje imaju mogućnost da reaguju na komandne signalne i postavne vrednosti mogu podržavati rad distributivne mreže i odložiti velike investicije u proširenje mreže čime se mogu dalje podići limiti za instalaciju obnovljivih izvora energije. Implementacijom navedenih funkcionalnosti u naprednim i složenim kontrolerima postiže se maksimalno iskorišćenje fotonaponske elektrane, ali i baterijskog skladišta električne energije koja se mogu relativno brzo izgraditi i pustiti u rad [4]. Danas, baterijska skladišta se često grade upravo uz fotonaponske elektrane što je neretko rezultat propisanih tehničkih zahteva za priključenje i rad paralelno sa distributivnom mrežom. Polazna ideja je da se preduprede nagle fluktuacije sunčevog zračenja, koje se direktno i veoma brzo manifestuju na predatoj snazi elektrane, i obezbedi predupravljanje sistemom kako bi se kompenzovale promene snage u tački priključenja. U opisanom scenariju treba uzeti i ekonomski aspekt u obzir, gde se, ne samo povećava inicijalna investicija obaveznog dodavanja

skladišta električne energije, tipično 10-20% od nominalne snage elektrane, već i nemogućnost punog iskorišćenja usled nerazvijenog tržišta pomoćnih usluga [5], što je rezultovalo da su skladišta električne energije nekada i negativno posmatrana od strane investitora. Međutim, raspoloženje prema skladištima električne energije se znatno menja poslednjih godina kao indirektan rezultat velikog broja obnovljivih izvora energije priključenih na mrežu i velikih fluktuacija cena električne energije na berzi. Neretko se dešava da cena električne energije na tržištu dostigne nultu, pa čak i negativnu vrednost, što se uglavnom poklapa sa dnevnom maksimalnom proizvodnjom solarnih elektrana. U navedenim okolnostima, investitori ali i vlasnici već izgrađenih solarnih elektrana nalaze podsticaj u izgradnji baterijskih skladišta uz fotonaponske elektrane. Sa upravljačkim sistemom, koji je opisan u radu, omogućava se velika fleksibilnost i postiže se mogućnost privremene alokacije električne energije koju proizvodi solarna elektrana u baterijsko skladište tokom režima sa nepovoljnom cenom električne energije, čime se praktično „pomera" plasman i prodaja energije za pogodniji vremenski period. Dodatan pozitivan efekat se vidi i sa strane mreže jer se tokom vršnih dnevnih vrednosti proizvodnje energija skladišti uz proizvodne jedinice čime se smanjuje zagušenje mreže i rasterećuju elementi distributivnog sistema. Period otplate hibridnih elektrana dodatno je podstaknut povećanjem brojeva ciklusa punjenja i pražnjenja koje savremena skladišta postižu, smanjenjem jedinične cene celokupnih tehnologija za skladištenje električne energije, kao i sve izraženije fluktuacije cene električne energije.

LITERATURA

[1] M. Stecca, LR. Elizondo, TB. Soeiro, P. Bauer, P. Palensky "A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems Into Distribution Networks", *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2020
[2] G. Rajendran, R. Raute, C. Caruana, Cedric "A Comprehensive Review of Solar PV Integration with Smart-Grids: Challenges, Standards, and Grid Codes." *Energies*, 2025 18. 2221.
[3] "Grid forming capability of power park modules" ENTSO-E Report, 2025
[4] "G.Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu, "The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 89, no. April 2017, 2018.