Broj rada: R3-02
DOI:10.46793/CIRED2026.R3-02_268

RAZVOJ MAKETE MIKROMREŽE U LABORATORIJSKIM USLOVIMA ZA ANALIZU RADNIH REŽIMA MIKROMREŽE

DEVELOPMENT OF A LABORATORY SCALE MICROGRID MODEL FOR THE ANALYSIS OF MICROGRID OPERATING MODES

Darko LAZAREVIĆ*, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Milan ZEC, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
Luka STREZOSKI, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Sve veća primena distribuiranih energetskih resursa (DER-ova) u distributivnim mrežama nameće potrebu za savremenim načinima upravljanja koji omogućavaju pouzdan i stabilan rad sistema u različitim radnim režimima. DER-ovi u kombinaciji sa lokalnim potrošačima i sistemima za upravljanje, mogu se organizovati u mikromreže koje predstavljaju kontrolisane podsisteme distributivne mreže. Jedan od značajnih izazova u radu takvih sistema jeste prelazak mikromreže iz mrežno povezanog u ostrvski režim rada, posebno kada lokalna proizvodnja električne energije nije dovoljna da pokrije ukupnu potrošnju. U ovom radu prikazana je implementacija algoritama za upravljanje mikromrežom na laboratorijskoj maketi. Poseban akcenat stavljen je na detekciju kvara na glavnom vodu, automatsko odvajanje od distributivne mreže, prelazak lokalnog izvora napajanja u „master“ režim rada, kao i na primenu algoritma za prioritetno rasterećenje potrošača. Takođe, prikazan je postupak resinhronizacije mikromreže sa distributivnom mrežom nakon stabilizacije spoljašnjeg napajanja i ispunjenja uslova za ponovno priključenje. Realizovani sistem obuhvata PLC upravljanje, pomoćne releje za izvršne i signalne funkcije, kao i SCADA sistem za nadzor, vizuelizaciju i implementaciju dela upravljačke logike. Prikazana maketa omogućava simulaciju ključnih izazova u radu mikromreža i predstavlja osnovu za dalje ispitivanje naprednih algoritama upravljanja u distributivnim mrežama sa visokim udelom DER-ova.

Ključne reči: DER, mikromreža, ostrvski režim, plc, rasterećenje, SCADA

ABSTRACT

The increasing integration of distributed energy resources (DERs) in distribution networks creates the need for advanced control methods that enable reliable and stable system operation under different operating modes. DERs, in combination with local consumers and control systems, can be organized into microgrids, which represent controlled subsystems of the distribution network. One of the significant challenges in the operation of such systems is the transition of a microgrid from grid connected to islanded mode, especially when local electricity generation is insufficient to cover the total load demand. This paper presents the implementation of microgrid control algorithms on a laboratory test setup. Special emphasis is placed on fault detection on the main feeder, automatic disconnection from the distribution network, transition

* Darko Lazarević, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija, tel. +381 631927399, e-mail: darkolazarevic@uns.ac.rs

of the local power source into “master” operating mode, as well as the application of a priority based load shedding algorithm. In addition, the paper presents the procedure for resynchronizing the microgrid with the distribution network after the external supply has been stabilized and the conditions for reconnection have been met. The implemented system includes PLC control, auxiliary relays for executive and signaling functions, as well as a SCADA system for monitoring, visualization, and implementation of part of the control logic. The presented test setup enables the simulation of key challenges in microgrid operation and provides a basis for further testing of advanced control algorithms in distribution networks with a high share of DERs.

Keywords: DER, Islanded Operation, Load Shedding, Microgrid, PLC, SCADA

UVOD

Razvoj elektroenergetskih sistema poslednjih godina sve više ide u pravcu decentralizacije proizvodnje električne energije, veće fleksibilnosti distributivnih mreža i aktivnijeg učešća lokalnih izvora i potrošača u radu sistema. Tradicionalni koncept distributivne mreže, u kome se električna energija prenosila u jednom smeru, od prenosnog sistema preko distributivnog sistema ka krajnjim potrošačima, postepeno se menja. Savremene distributivne mreže sve češće obuhvataju veliki broj DER-ova, sistema za skladištenje energije i raznih naprednih upravljačkih sistema [4], [7]. Takva promena donosi značajne prednosti, ali istovremeno postavlja i nove zahteve u pogledu nadzora, zaštite i koordinisanog upravljanja [3], [9].

U tom kontekstu, mikromreže se izdvajaju kao jedno od značajnih rešenja za organizaciju i upravljanje delovima distributivne mreže sa visokim udelom lokalne proizzvodnje. Mikromreža obuhvata DER-ove, potrošače, sisteme za skladištenje energije i odgovarajuću upravljačku infrastrukturu [4], [7]. U zavisnosti od pogonskih uslova, mikromreža može raditi u mrežno povezanom režimu rada, kada je priključena na distributivnu mrežu, ili u ostrvskom režimu rada, kada funkcioniše autonomno, odnosno nezavisno od distributivne mreže [2], [8]. Na taj način mikromreže mogu doprineti povećanju pouzdanosti napajanja, efikasnijem korišćenju lokalno proizvedene električne energije i smanjenju zavisnosti od spoljašnjeg izvora napajanja (distributivne mreže) u određenim pogonskim situacijama [4].

Jedan od ključnih izazova u radu mikromreža jeste prelazak iz mrežno povezanog u ostrvski režim rada. To je trenutak kada mikromreža gubi vezu sa distributivnom mrežom, shodno tome u kratkom vremenskom roku je potrebno obezbediti stabilan rad lokalnih izvora napajanja i potrošača [2], [8]. Prelazak u ostrvski režim rada može biti posledica različitih pogonskih događaja, pri čemu se kao neki od najčešćih razloga izdvajaju kvar na glavnom vodu, poremećaji u distributivnoj mreži ili drugi događaji koji dovode do gubitka veze mikromreže sa distributivnom mrežom [2]. Posebno kritična situacija nastaje u momentu kada raspoloživa lokalna proizvodnja nije dovoljna da pokrije ukupnu potrošnju unutar mikromreže. U tom slučaju neophodna je primena brzih i pouzdanih algoritama za rasterećenje potrošača, pri čemu se pojedini potrošači isključuju prema unapred definisanim prioritetima [1].

Otvorena pitanja u ovoj oblasti odnose se na pouzdanu detekciju kvara, brzinu odvajanja mikromreže od distributivne mreže, očuvanje naponske i frekvencijske stabilnosti, koordinaciju lokalnih izvora napajanja i potrošača, kao i na bezbedno ponovno priključenje mikromreže na glavni sistem napajanja [8], [9]. Pored teorijskog razmatranja navedenih problema, značajna je

i njihova praktična implementacija, jer laboratorijska ispitivanja omogućavaju proveru rada upravljačkih algoritama u uslovima koji odgovaraju realnim pogonskim situacijama [6].

Motiv za izradu ovog rada jeste potreba da se karakteristični režimi rada mikromreže, kao što su prelazak iz mrežno povezanog u ostrvski režim rada, održavanje stabilnog rada sistema pri nedovoljnoj lokalnoj proizvodnji i ponovno priključenje na distributivnu mrežu, prikažu i ispitaju na praktično realizovanom laboratorijskom sistemu. Cilj rada je implementacija i analiza algoritama za upravljanje mikromrežom na laboratorijskoj maketi, sa posebnim osvrtom na ponašanje sistema u prelaznim režimima rada.

U radu je razmatran scenario u kome poremećaj na glavnom vodu dovodi do potrebe za odvajanjem mikromreže od distributivne mreže i njenim prelaskom u ostrvski režim rada. U tom režimu lokalni izvor napajanja preuzima ulogu referentnog izvora za održavanje napona i frekvencije, dok se u slučaju nedovoljne lokalne proizvodnje primenjuje algoritam za prioritetno rasterećenje potrošača. Nakon stabilizacije spoljašnje mreže razmatra se postupak resinhronizacije i ponovnog priključenja mikromreže na distributivnu mrežu.

Realizovani sistem obuhvata PLC upravljanje, pomoćne releje za izvršne i signalne funkcije, kao i SCADA sistem za nadzor, vizuelizaciju i implementaciju dela upravljačke logike [5], [6]. Doprinos rada ogleda se u praktičnoj realizaciji upravljačkih funkcija značajnih za pouzdan rad mikromreža, kao i u formiranju osnove za dalja ispitivanja naprednih algoritama upravljanja u distributivnim mrežama sa visokim udelom DER-ova [5]. Prikazana maketa omogućava simulaciju karakterističnih režima rada mikromreže i proveru ponašanja sistema tokom prelaznih procesa [6].

U nastavku rada najpre je prikazana struktura laboratorijske makete i osnovni elementi realizovanog sistema. Nakon toga opisan je razmatrani scenario rada mikromreže, koji obuhvata prelazak u ostrvski režim rada, logiku prioritetnog rasterećenja potrošača i postupak resinhronizacije sa distributivnom mrežom. Zatim su prikazani implementacija upravljačkog algoritma, rezultati ispitivanja sprovedenih na maketi, kao i zaključci i predlozi za dalji razvoj sistema.

1. FIZIČKA REALIZACIJA MAKETE

U cilju eksperimentalne verifikacije algoritama upravljanja i analize naprednih koncepata u mikromrežama, projektovana je i realizovana laboratorijska maketa. Maketa predstavlja fizički model distributivne mikromreže u smanjenoj razmeri, omogućavajući vernu emulaciju različitih režima rada, kao i dinamike potrošnje i proizvodnje.

1.1 Fizička struktura makete

Fizička struktura makete koncipirana je tako da verno oslikava strukturu savremenih distributivnih mikromreža sa aktivnim upravljanjem potrošnjom. Primarni elementi makete obuhvataju podsistem napajanja, upravljački modul, izvršne elemente i emulatore potrošača. Izrađeni model makete je prikazan na Slici 1.



Slika 1 – Model makete mikromreže

Kao emulatori potrošača iskorišćene su LED svetleće diode koje svojim aktiviranjem vizuelno reprezentuju angažovanu snagu u mreži. Potrošači su, u zavisnosti od prioriteta napajanja i profila potrošnje u realnim sistemima, klasifikovani u nekoliko kategorija. Maketa obuhvata kritične potrošače, čije napajanje ne sme biti prekinuto, nekritične potrošače podložne algoritmima za rasterećenje opterećenja, kao i komercijalne i stambene potrošače sa unapred definisanim dnevnim dijagramima opterećenja. Na Slici 1 potrošačke kategorije su označene različitim bojama: kritični potrošači crvenom, nekritični potrošači zelenom, dok su komercijalni i stambeni potrošači označeni žutom bojom. Sve komponente integrisane su u okviru pokretnog stola, čime su obezbeđeni kompaktnost, preglednost i bezbednost tokom izvođenja eksperimenata.

Energetski segment makete oslanja se na dva izolovana naponska nivoa jednosmerne struje, čime je postignuto razdvajanje upravljačkih i napojnih krugova. Pri tome se naponski nivo od 24 V DC koristi za napajanje ulazno-izlaznih modula PLCa i špulni pomoćnih releja, dok je naponski nivo od 5 V DC namenjen prvenstveno za napajanje emulatora potrošača.

1.2 Upravljački deo

Srce upravljačkog nivoa makete predstavlja PLC, koji izvršava upravljački algoritam koji vrši aktivaciju stanja na maketi, procesuira logičke uslove u skladu sa postavljenim kriterijumima i generiše izlazne signale prema izvršnom nivou. Mapiranje digitalnih ulaza i digitalnih izlaza izvedeno je sa ciljem maksimalne modularnosti i transparentnosti koda.

1.3 Izvršni signalni nivo

Jedan od ključnih aspekata fizičke realizacije makete je primena pomoćnih elektromagnetnih releja koji formiraju izvršni i signalni nivo sistema. Kada PLC algoritam pokrene aktivaciju potrošača, digitalni izlaz (npr. %Q0.0) zatvara kolo od 24 V DC i napaja špulnu pomoćnog releja. Relej zatim zatvara svoje glavne kontakte u kolu od 5 V DC, čime se uključuje LED svetleća dioda koja emulira rad potrošača. Istovremeno, preko galvanski izolovanih pomoćnih kontakata, relej šalje povratni signal na digitalni ulaz PLCa (npr. %I0.0), što kontroleru potvrđuje da je operacija uspešno izvršena.

1.4 Komunikacija

Integracija makete u SCADA sistem izvedena je preko Modbus protokola, koji omogućava razmenu podataka mapiranjem internih registara i memorijskih bitova PLC-a u SCADA promenljive. Usklađivanjem komunikacionih parametara na oba sistema osigurana je stabilna veza neophodna za detaljnu analizu i grafički prikaz svih procesa unutar mikromreže

2. RADNI REŽIMI MIKROMREŽE

U okviru rada razmatran je scenario rada mikromreže koji obuhvata prelazak iz mrežno povezanog u ostrvski režim rada, očuvanje stabilnosti sistema u uslovima nedovoljne lokalne proizvodnje, kao i ponovno priključenje mikromreže na distributivnu mrežu nakon stabilizacije spoljašnjeg napajanja. Scenario je definisan tako da obuhvati karakteristične pogonske događaje koji se mogu javiti u realnim distributivnim mrežama sa visokim udelom DER-ova. Poseban značaj ima koordinisan rad lokalnog izvora napajanja, potrošača, sklopnih elemenata i upravljačkog sistema, jer se u kratkom vremenskom periodu moraju doneti odgovarajuće upravljačke odluke [5].

U početnom stanju mikromreža radi u mrežno povezanom režimu rada, pri čemu je priključena na distributivnu mrežu preko glavnog prekidača. U ovom režimu deo ili celokupna potrošnja mikromreže može se napajati iz distributivne mreže, dok lokalni izvori napajanja mogu raditi u zavisnosti od raspoložive proizvodnje i definisanih upravljačkih uslova. U slučaju pojave poremećaja na glavnom vodu, upravljački sistem detektuje kvar i izdaje nalog za prelazak mikromreže u ostrvski režim rada.

2.1 Ostrvski radni režim

Prelazak u ostrvski režim rada započinje nakon izdate komande za trenutno otvaranje glavnog prekidača, pri čemu mikromreža fizički odvaja od distributivne mreže i nastavlja rad kao autonomni sistem. Na taj način se sprečava potencijalno dvostrano napajanje mesta kvara i omogućava se potpuno nezavisni rad mikromreže u odnosu na spoljašnju mrežu [9].

Nakon odvajanja od distributivne mreže, lokalni izvori napajanja (DER-ovi) prelaze u „master“ režim rada, što znači da jedan od njih preuzima ulogu referentnog izvora za održavanje napona i frekvencije unutar mikromreže [2], [8]. Time se omogućava nastavak napajanja lokalnih potrošača i očuvanje stabilnog rada sistema u uslovima kada mikromreža nije povezana sa distributivnom mrežom.

Ostrvski režim rada predstavlja posebno zahtevan pogonski režim, jer se u svakom momentu mora zadovoljiti ravnoteža između proizvodnje i potrošnje, odnosno ona se mora obezbediti isključivo unutar mikromreže [8]. U slučaju da lokalni izvor napajanja može da pokrije ukupnu potrošnju, mikromreža nastavlja stabilan rad bez potrebe za dodatnim upravljačkim akcijama. Međutim, ukoliko raspoloživa lokalna proizvodnja nije dovoljna, potrebno je aktivirati dodatne mehanizme za očuvanje stabilnosti sistema, čija je implementacija detaljnije prikazana u nastavku rada.

2.2 Logika prioritetnog rasterećenja lokalne potrošnje

Kao što je već pomenuto u paragrafu iznad, posebno kritičan slučaj za ostrvski režim rada se javlja kada raspoloživa lokalna proizvodnja električne energije nije dovoljna da pokrije ukupnu potrošnju unutar mikromreže. U takvim uslovima može doći do pada napona i frekvencije, kao

i do preopterećenja lokalnih izvora. Upravo je to razlog zašto je u okviru razmatranog scenarija na maketi predviđena primena algoritma za prioritetno rasterećenje potrošača.

Osnovna uloga logike rasterećenja jeste smanjenje ukupne potrošnje na nivo koji može biti pokriven dostupnim proizvodnim kapacitetima lokalnih DER-ova [1]. Rasterećenje se ne vrši nasumično, već prema unapred definisanim prioritetima potrošača. Potrošači nižeg prioriteta isključuju se prvi, dok se potrošači višeg prioriteta zadržavaju u radu što je duže moguće. Na taj način se obezbeđuje selektivno smanjenje opterećenja, uz očuvanje napajanja najvažnijih potrošača u mikromreži [1].

U okviru implementirane upravljačke logike, sistem u realnom vremenu prati stanje lokalnog izvora, ukupnu potrošnju, statuse prekidačkih elemenata i unapred definisane prioritete potrošača. Na osnovu ovih informacija donosi se odluka o aktiviranju rasterećenja i izboru potrošača koji treba da budu isključeni. Time se sprečava nekontrolisan pad napona i frekvencije, smanjuje opterećenje lokalnog izvora i omogućava stabilan nastavak rada mikromreže u ostrvskom režimu.

Ovakav pristup ima poseban značaj u mikromrežama u kojima postoje potrošači različitog stepena važnosti, jer omogućava da se raspoloživa energija usmeri ka prioritetnim potrošačima. Na taj način algoritam rasterećenja ne predstavlja samo zaštitnu funkciju, već i deo šire strategije upravljanja mikromrežom tokom poremećaja, čime se povećava pouzdanost napajanja i otpornost sistema na nedostatak lokalne proizvodnje.

2.3 Ponovno priključenje na distributivnu mrežu – Resinhronizacija

Nakon otklanjanja poremećaja u distributivnoj mreži i uspostavljanja stabilnih naponskih prilika, pokreće se postupak resinhronizacije mikromreže. Ponovno priključenje mikromreže na distributivnu mrežu ne vrši se odmah po uspostavljanju napona, već se najpre proverava da li su ispunjeni uslovi za bezbedno zatvaranje glavnog prekidača [2], [8].

U okviru postupka resinhronizacije proveravaju se sinhronizacioni uslovi (sync-check uslovi), odnosno usklađenost električnih veličina mikromreže i distributivne mreže. Ovi uslovi obuhvataju proveru napona, frekvencije i faznog ugla, kako bi se izbeglo priključenje dva sistema koji nisu međusobno sinhronizovani [2]. Na taj način se sprečavaju neželjeni prelazni procesi, praćeni velikim strujama izjednačenja što za posledicu može imati trajno oštećenje opreme.

Tek nakon ispunjenja sync-check uslova izdaje se komanda za zatvaranje glavnog prekidača. Zatvaranjem prekidača mikromreža se ponovo priključuje na distributivnu mrežu i vraća u mrežno povezani režim rada. Razmatrani scenario omogućava proveru rada upravljačkog algoritma u više karakterističnih pogonskih stanja. Na laboratorijskoj maketi moguće je pratiti odziv sistema tokom detekcije kvara, promene režima rada lokalnog izvora, aktivacije logike rasterećenja i postupka resinhronizacije. Time se obezbeđuje osnova za analizu ponašanja mikromreže tokom prelaznih procesa i za dalji razvoj naprednih algoritama upravljanja.

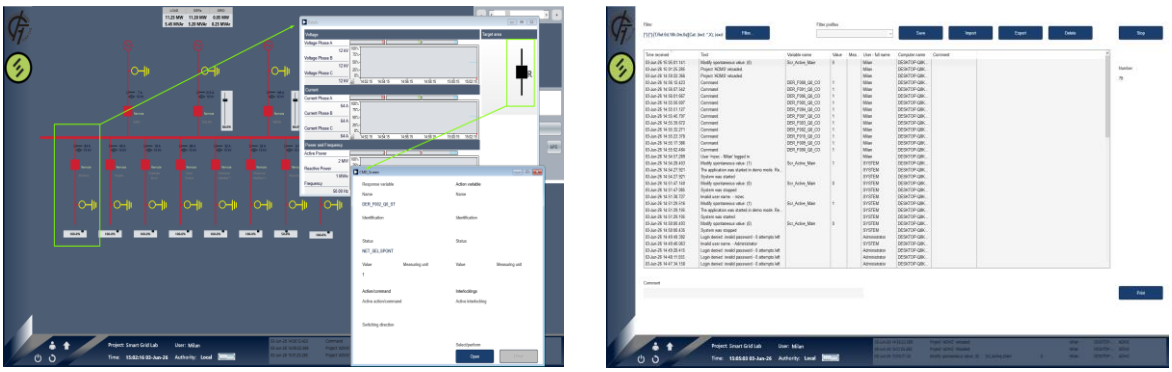
3. IMPLEMENTACIJA LOGIKE U SCADA SISTEMU

Efikasno upravljanje mikromrežom zahteva centralizovani sistem za nadzor, prikupljanje podataka i donošenje odluka u realnom vremenu [5]. U okviru realizovane makete, ovaj viši hijerarhijski nivo poveren je SCADA sistemu [6]. Pored osnovne vizuelizacije, u SCADA okruženju implementirani su napredni algoritmi za optimizaciju rada mikromreže koji

prevazilaze standardne funkcionalnosti PLCa, pre svega kroz izvršavanje namenskog programskog koda za rasterećenje mreže.

3.1 Arhitektura SCADA aplikacije

SCADA aplikacija je projektovana modularno, sa promenljivama koje su funkcionalno grupisane, mapirane prema memoriji PLC-a i imenovane u formatu DER_OznakaIzvoda_RasklopniElement_TipSignala (npr. DER_F001_Q0_ST za status prekidača izvoda F001), dok se za povezivanje koristi nativni Modbus drajver. Hijerarhijski korisnički interfejs omogućava brz prelazak sa globalnog pregleda na detaljnu dijagnostiku. Glavni ekran, prikazan na Slici 5(a), prikazuje jednopolnu šemu mikromreže sa dinamičkim tokovima snage i stanjima potrošača. Komandni ekran omogućava detaljan uvid u pojedinačni izvod, uključujući merenja i upravljanje, dok je ekran događaja i alarma, prikazan na Slici 5(b), namenjen trajnom beleženju svih promena i alarmnih stanja u sistemu.



(a) (b)

Slika 2 – Arhitektura SCADA panela: (a) glavni ekran sa segmentom za komandovanje; (b) lista događaja

3.2 Namenski kod za rasterećenje mreže

Napredni algoritam za rasterećenje mreže implementiran je na višem nivou unutar SCADA sistema. Ovakav pristup omogućava integraciju kompleksnijih matematičkih modela, lakšu promenu prioriteta potrošača u realnom vremenu i potencijalno povezivanje sa eksternim bazama podataka (npr. prognoza proizvodnje iz obnovljivih izvora ili tarifni profili cena električne energije) [5], [6].

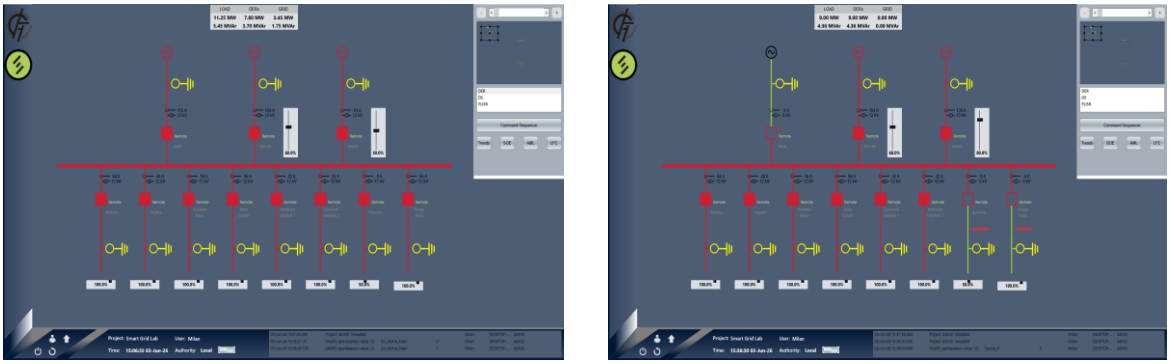
Algoritam implementiran u SCADA okruženju ima zadatak da, pri prelasku u ostrvski režim ili usled preopterećenja primarnog izvora, automatski isključi nekritične potrošače radi očuvanja stabilnosti frekvencije i napona za kritične potrošače. Matematički uslov koji se kontinualno proverava definisan je relacijom:

$$\sum P_{potrošnje} > P_{raspoloživo} - \Delta P \qquad (1)$$

gde P_potrošnje predstavlja emuliranu snagu aktivnih potrošača, P_raspoloživo emuliranu trenutno raspoloživu snagu izvora, dok je ΔP definisana rezerva stabilnosti. Ukoliko je ovaj uslov ispunjen, algoritam po jednom ciklusu programa isključuje samo jedan potrošač prema dodeljenom prioritetu, ponavljajući postupak sve dok se ne dostigne energetski balans.

3.3 Vizuelizacija tranzicije režima rada

Tranzicija između mrežno povezanog režima i ostrvskog režima rada prikazuje se dinamički na glavnom ekranu, kao što je prikazano na Slici 3. Tokom mrežnog povezanog režima rada, prikazanog na Slici 3(a), primarna mrežna linija i grafički simbol koji predstavlja elektroenergetski sistem (EES) obojeni su crvenom bojom, označavajući stabilnu sinhronizaciju. Sa druge strane, u trenutku simulacije raspada mreže ili planskog prelaska u ostrvski rad, prikazanog na Slici 3(b), prekidač veze na šemi menja stanje i otvara se, dok simbol EES-a menja boju u zeleno.



(a) (b)

Slika 3 – Prikaz radnih režima mikromreže: (a) mrežno povezani radni režim; (b) ostrvski režim rada

Takodje na samoj maketi postoje dva LED signalizatora koja prikazuju da li je mikromreža u ostrvskom ili mrežno povezanom režimu (označeno plavom bojom na Slici 1).

3.4 Prikaz statusa rasterećenja

Kada se aktivira namenski kod za rasterećenje mreže, operater dobija jasan i nedvosmislen vizuelni prikaz o statusu redukcije potrošnje. Tokom ovog procesa, simboli koji odgovaraju isključenom izvodu na maketi menjaju boju iz crvene (aktivno) u zelenu (neaktivno), dok se uporedo pored samog potrošača generiše tekstualna oznaka „SHEDDED“. Ova oznaka direktno signalizira operateru da je ručno uključenje tog potrošača softverski blokirano sve dok se ponovo ne steknu uslovi energetskog suficita.

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana praktična realizacija laboratorijske makete mikromreže namenjene za ispitivanje karakterističnih režima rada i upravljačkih funkcija od značaja za savremene distributivne mreže. Poseban značaj rada ogleda se u tome što je na fizički realizovanom sistemu omogućena analiza prelaska iz mrežno povezanog u ostrvski režim rada, ponašanja lokalnih izvora u autonomnom režimu, aktivacije logike prioritetnog rasterećenja potrošača i postupka ponovnog priključenja na distributivnu mrežu.

Realizovana maketa pokazuje da se kombinacijom PLC upravljanja, pomoćnih releja i SCADA sistema može ostvariti funkcionalno okruženje za nadzor, komandovanje i implementaciju složenijih upravljačkih algoritama. PLC obezbeđuje pouzdano izvršavanje osnovnih komandno signalnih funkcija, dok SCADA sistem omogućava preglednu vizuelizaciju stanja mikromreže, praćenje prelaza između radnih režima i implementaciju naprednih logika, kao što je u ovoj analizi to algoritam za prioritetno rasterećenje potrošača.

Primena algoritma rasterećenja pokazuje značaj selektivnog isključenja potrošača u uslovima kada lokalna proizvodnja nije dovoljna za pokrivanje ukupne potrošnje u ostrvskom režimu rada. Na taj način se omogućava očuvanje napajanja prioritetnih potrošača i doprinosi stabilnijem radu mikromreže tokom poremećaja. Pored toga, postupak resinhronizacije ukazuje na važnost provere uslova napona, frekvencije i faznog ugla pre ponovnog priključenja mikromreže na distributivnu mrežu.

Ostvareni rezultati mogu imati primenu u laboratorijskim ispitivanjima, edukaciji i daljem razvoju upravljačkih algoritama za mikromreže. Prikazani sistem predstavlja dobru osnovu za proširenje funkcionalnosti, pre svega kroz uvođenje složenijih modela lokalne proizvodnje i potrošnje, detaljniju analizu prelaznih procesa i razvoj naprednih algoritama za optimizaciju rada mikromreže u različitim pogonskim uslovima.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, u okviru realizacije projekta pod nazivom: „Razvoj naučno-stručnih metoda u energetici, elektronici i telekomunikacijama”.

LITERATURA

[1] N. N. A. Bakar, M. Y. Hassan, M. F. Sulaima, M. N. i. Mohd Nasir, and A. Khamis, „Microgrid and load shedding scheme during islanded mode: A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 71, 2017, pp. 161-169, DOI: 10.1016/j.rser.2016.12.049.

[2] I. J. Balaguer, Q. Lei, S. Yang, U. Supatti, and F. Z. Peng, „Control for Grid-Connected and Intentional Islanding Operations of Distributed Power Generation”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, 2011, pp. 147-157, DOI: 10.1109/tie.2010.2049709.

[3] L. V. Strezoski and N. G. Simic, „Quantifying the impact of inverter-based distributed energy resource modeling on calculated fault current flow in microgrids”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 151, 2023, DOI: 10.1016/j.ijepes.2023.109161.

[4] N. Hatziargyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, „Microgrids”, *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 5, no. 4, 2007, pp. 78-94, DOI: 10.1109/mpae.2007.376583.

[5] A. Kaur, J. Kaushal, and P. Basak, „A review on microgrid central controller”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, 2016, pp. 338-345, DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.141.

[6] M. Kermani, D. L. Carnì, S. Rotondo, A. Paolillo, F. Manzo, and L. Martirano, „A Nearly Zero-Energy Microgrid Testbed Laboratory: Centralized Control Strategy Based on SCADA System”, *Energies*, vol. 13, no. 8, 2020, DOI: 10.3390/en13082106.

[7] R. H. Lasseter, „MicroGrids”, *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, USA, 2002, pp. 305-308.

[8] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, „Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, 2006, pp. 916-924, 2006, DOI: 10.1109/tpwrs.2006.873018.

[9] N. Simic, L. Strezoski, and B. Dumnic, „Short-Circuit Analysis of DER-Based Microgrids in Connected and Islanded Modes of Operation”, *Energies*, vol. 14, no. 19, 2021, DOI: 10.3390/en14196372.