



IZAZOVI PRI PODEŠAVANJU RELEJNE ZAŠTITE U MIKROMREŽAMA SA VELIKIM BROJEM DISTRIBUIRANIH ENERGETSKIH RESURSA

CHALLENGES IN DETERMINATION OF RELAY PROTECTION SETTINGS IN MICROGRIDS WITH HIGH PENETRATION OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES

Nikola SIMIĆ, Fakultet Tehničkih Nauka Novi Sad, Srbija
Luka STREZOSKI, Fakultet Tehničkih Nauka Novi Sad, Srbija
Radenko MILIĆEVIĆ, ALBO Energy, Novi Sad, Srbija
Nemanja VUKOBRAT, GE Grid Solutions, Beograd, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Jedna od najznačajnijih promena u elektroenergetskim sistemima širom sveta je brza ekspanzija distribuiranih energetske resursa (DER) koja se upravo dešava. Pojava sve većeg broja DER ide u prilog bržem ostvarivanju tri ključna cilja koja se postavljaju pred elektroenergetske sisteme današnjice: dekarbonizacija, digitalizacija i decentralizacija. Takođe, većina DER koji su zasnovani na obnovljivim izvorima energije (sunce, vetar, itd.), kao i skladišta energije, povezana su na mrežu preko uređaja energetske elektronike. S druge strane, mikromreža, kao novi koncept lokalnog povezivanja proizvodnje i potrošnje u savremenim elektroenergetskim sistemima, omogućava postizanje ovih ciljeva, ali isto tako, donosi mnoge izazove koji se stavljaju pred inženjere elektroenergetike. Kako mikromreža predstavlja grupu povezanih potrošača i DER sa jasno definisanim električnim granicama, koja se ponaša kao jedan upravljivi entitet koji može da radi u režimu povezanom na distributivnu mrežu, kao i u ostrvskom režimu, jasno je da se mora obezbediti pouzdan i siguran rad mikromreže u oba režima rada, a to, pre svega, podrazumeva ispravno podešenje i koordinaciju relejne zaštite. Najveći izazov, koji je ujedno i uslov za ispravno podešenje relejne zaštite u mikromreži, predstavlja određivanje struje kvara, a zatim i celog režima mikromreže sa kvarom i to u oba načina rada: povezanom na mrežu i ostrvskom. Kao što je navedeno, s obzirom da se većina savremenih DER po svojoj prirodi i načinu rada u potpunosti razlikuju od tradicionalnih sinhronih i asinhronih mašina, najpre zbog toga što se na mrežu povezuju preko uređaja energetske elektronike, njihovi doprinosi struji kvara su takođe potpuno drugačiji od doprinosa tradicionalnih izvora. Pored toga, prelazak mikromreže iz povezanog načina rada, u kom najveći doprinos struji kvara daje distributivna mreža na koju je mikromreža povezana, u ostrvski, u kom kompletnu struju kvara čine samo doprinosi DER, stvara potpuno nove okolnosti koje je potrebno analizirati. Upravo ova analiza izvršena je na najsavremenijoj "Hardware-in-the-loop" opremi, uređaju za testiranje relejne zaštite i pravim, komercijalnim relejima, a rezultati ove analize koji se odnose na setove podešenja relejne zaštite u oba režima rada mikromreže predstavljeni su u radu.

Ključne reči: mikromreže, distribuirani energetske resursi, relejna zaštita

ABSTRACT

One of the most significant changes in power systems around the world is the rapid expansion of distributed energy resources (DER) that is just happening. The emergence of an increasing number of DER supports the faster achievement of the three key goals set for modern power systems: decarbonization, digitalization and decentralization. Also, most DER that are based on renewable energy sources (sun, wind, etc.), as well as energy storage facilities, are connected to the grid via power electronics devices. On the other hand, the microgrid, as a new concept of local connection of production and consumption in modern power systems, enables the achievement of these goals, but also brings many challenges that are posed to power system engineers. As the microgrid is a group of interconnected loads and DER within clearly defined electrical boundaries, that acts as a single controllable entity with respect to the grid which can operate in the mode connected to the distribution network, as well as in the island mode, it is obvious that reliable and safe microgrid operation, must be ensured in both operating modes, and this, above all, implies the correct setting and coordination of relay protection. The biggest challenge, which is also a precondition for the correct adjustment of relay protection setting in the

microgrid, is to determine the fault current, and then the regime of the entire microgrid with the fault, in both modes: connected to the distribution network and islanded. As stated, since most modern DER are completely different in nature and mode of operation from traditional synchronous and asynchronous machines, primarily because they are connected to the grid via power electronics devices, their contributions to fault current are also completely different from contributions from traditional sources. In addition, the transition of the microgrid from the connected mode, where the largest contribution to the fault current gives the distribution network which the microgrid is connected to, to the islanded mode, where the complete fault current consists only of DER contributions, creates completely new circumstances which have to be analyzed. This analysis was performed on the most modern "Hardware-in-the-loop" equipment, relay protection testing device and real, commercial relays, and the results of this analysis related to the sets of relay protection settings in both microgrid's modes of operation are presented in paper.

Key words: microgrids, distributed energy resources, relay protection

Kontakt: nikola.simic@uns.ac.rs, lukastrezoski@uns.ac.rs, radenko.milicevic@albo-energy.com, nemanja.vukobrat@ge.com

Ovaj rad je podržan od strane Fakulteta Tehničkih Nauka, Univerziteta u Novom Sadu, u sklopu projekta „Razvoj i primena savremenih metoda u nastavi i istraživačkim aktivnostima na Departmanu za energetiku, elektroniku i telekomunikacije“.

1. UVOD

Integracija distribuiranih energetske resursa (DER) u elektroenergetske sisteme se često izvodi kroz koncept mikromreže, koja predstavlja grupu međusobno povezanih potrošača i DER sa jasno definisanim električnim granicama, koja se ponaša kao jedinstvena kontrolna celina i ima mogućnost da radi povezana na mrežu kao i da se odvoji od mreže i tako pređe u ostrvski režim rada [1]. Svaka mikromreža ima sopstveni kontroler koji je zadužen da omogući pravilan rad u oba režima rada, povezanom na mrežu i ostrvskom. Dakle, jedna od osnovnih funkcija kontrolera mikromreže jeste da omogući neprimetan i pouzdan prelazak iz jednog režima u drugi [2,3]. Pošto mikromreža treba da bude pravilno zaštićena u oba režima, od izuzetnog je značaja ispravno određivanje struje kvara unutar mikromreže kao i doprinosa svih izvora po svim granama na kojima se nalazi prekidačka i zaštitna oprema. Određivanje ovih struja na osnovu kojih bi se podesila zaštita u mikromreži dodatno komplikuju dve ključne osobine mikromreže: 1) mogućnost prelaska iz povezanog režima u ostrvski i obrnuto i 2) prisustvo velikog broja priključenih DER čije se ponašanje tokom kvarova drastično razlikuje u odnosu na ponašanje sinhronih (SM) i asinhronih mašina (AM). Zbog mogućnosti prelaska iz povezanog u ostrvski režim rada i obrnuto, struja kvara u mikromreži može značajno da se razlikuje u zavnosti od toga u kom režimu je mikromreža. U povezanom režimu rada najveći doprinos struji kvara čini upravo mreža na koju je mikromreža povezana dok DER doprinose struji kvara u rasponu od 10–20%, u zavisnosti od njihovog tipa i lokacije [4,5], dok u ostrvskom režimu tog doprinosa nema, pa se kompletna struja kvara sastoji isključivo od doprinosa DER iz mikromreže. Kako je većina DER, koji se danas priključuju, povezana na sistem preko invertora – takozvani DER zasnovani na inverterima (*Inverter-based DER* – IBDER), njihova ponašanja tokom kvarova i propada napona generalno, definisana su kontrolnim strategijama ugrađenim u inverterne kontrolere. Grid kod standardi postavljaju zahteve kojima definišu kakvo ponašanje se očekuje od IBDER tokom kvarova kako bi IBDER pomogli mreži da na što bezbolniji način preživi kvar. Po *Low-Voltage-Ride-Through* (LVRT) i *Reactive-Current-Injection* (RCI) zahtevima od DER se očekuje da ostane povezan na mrežu određeno vreme bez obzira na pad napona na mestu njegovog priključenja, kao i da injektira reaktivnu snagu u mrežu kako bi poboljšao naponske prilike i na taj način pomogao mreži [6]. Pored toga, struje koje IBDER injektiraju u mrežu tokom kvarova ograničene su na izuzetno male vrednosti koje iznose do 1.5 puta od njihovih nominalnih vrednosti. Upravo zbog toga, udeo doprinosa DER u struji kvara u povezanom režimu rada je relativno mali, dok se u ostrvskom režimu rada kompletna struja kvara sastoji isključivo od doprinosa DER pa su zbog toga razlike u struji kvara u pomenuta dva režima značajne. Kada se uzmu u obzir sve navedene stvari postaje jasno da modelovanje i proračun kvarova u mikromrežama sa velikim brojem priključenih DER predstavlja jedan od najizazovnijih problema koji se postavlja pred elektroinženjerime današnjice.

Za pravilno podešenje i koordinaciju relejne zaštite, od suštinskog su značaja precizno izračunate struje kvara. Pošto struje kvara koje teku po granama na kojima se nalazi prekidačka oprema direktno utiču na odabir podešenja relejne zaštite u mikromrežama, značajne razlike u vrednostima tih struja u dva različita režima rada mogu prouzrokovati neadekvatna podešenja i posledično neispravan rad zaštitne opreme [7]. Stoga, proračun struje kvara u mikromreži treba da bude veoma robustan i precizan i mora biti u stanju da pruži tačne rezultate bez obzira na način rada mikromreže. Štaviše, kao što je prikazano u [8], na relejnu zaštitu mikromreže utiču dodatni izazovi koji su takođe posledica velikog broja priključenih DER, kao što je nepravilan rad koji se ogleda u nereagovanju zaštite kada je potrebno ili reagovanju kada nije potrebno zbog relativno niskih vrednosti struja kvara i zavisnosti uglova struja kvara od propada napona na mestu priključenja DER, kao i nestajanje uzemljenja

zvezdišta distributivnih transformatora mreže, pri prelasku u ostrvski režim. Ova kritična pitanja takođe zahtevaju dalja istraživanja struja kvara mikromreža zasnovanih na DER i posledično razvoj odgovarajućih algoritama za proračun kvarova i podešenje relejne zaštite u realnom vremenu. Pošto je razumevanje ponašanja mikromreža zasnovanih na DER tokom kvarova izuzetno važno, kako za naučnu zajednicu tako i za industriju, jedan od glavnih ciljeva ovog rada je da se postavi realna mikromreža za testiranje i da se temeljno analiziraju režimi sa kvarovima u dva različita režima rada i uticaj struja kvara na proračun relejne zaštite.

U ovom radu razvijen je model mikromreže u najsavremenijem idustrijskom *hardware-in-the-loop* (HIL) okruženju i nad tim modelom je vršena analiza struja svih tipova kratkih spojeva i doprinosa DER, zatim su strujni odzivi koji su dobijeni na ovaj način, generisani pomoću idustrijskog uređaja za sekundarno ispitivanje zaštite koji je priključen na jedan komercijalni relej sa ciljem da se testira reagovanje releja na strujne odzive iz raznih test scenarija u povezanom i ostrvskom radu mikromreže sa značajnim brojem priključenih DER.

Doprinosi ovog rada su:

1. Izvršena je detaljna analiza režima mikromreže sa priključenim značajnim brojem DER u uslovima kvara kako u povezanom tako i u ostrvskom režimu rada.
2. Simulirani događaji su uspešno ponovljeni u realnosti generisanjem identičnih strujnih odziva uređajem sa sekundarno ispitivanje zaštite.
3. Testirano je reagovanje mikroprocesorske zaštite najnovije generacije na odzive dobijene iz modela.
4. Ukazano je na potrebu za razvijanjem novih algoritama adaptivne relejne zaštite u realnom vremenu.

Rad je organizovan kako sledi: u poglavlju 2 predstavljeni su tipovi DER sa posebnim osvrtom na DER zasnovane na inverterima i dvostruko napajane asinhronne mašine; u poglavlju 3 opisan je način agregacije DER kroz koncept mikromreže; u poglavlju 4 predstavljena je postavka za prikupljanje rezultata istraživanja iz Smart Grid laboratorije, Katedre za elektroenergetiku i primenjeno softversko inženjerstvo sa Fakulteta Tehničkih Nauka u Novom Sadu; u poglavlju 5 dati su rezultati i diskusija, dok je rad zaključen u poglavlju 6.

2. TIPOVI DER

Postoji širok spektar različitih DER koji mogu biti povezani sa distributivnim sistemom, pa se tako mogu pronaći solarni paneli, vetroturbine, razne vrste skladišta energije (baterije, zamajci i sl.), dizel agregati, biogasne jedinice, kombinovane toplotne i električne jedinice itd. Osim tehnologije, njihove razlike se ogledaju u načinima na koji su povezani sa distributivnim sistemom. Međutim, svi DER se mogu sortirati u četiri kategorije u pogledu njihovog ponašanja tokom kvarova [9]:

1. Sinhronne mašine direktno povezane na mrežu;
2. Asinhronne mašine direktno povezane na mrežu;
3. DER zasnovani na inverterima (IBDER);
4. Dvostruko napajane asinhronne mašine (DFIM);

Pošto je ponašanje SM i AM direktno povezanih na mrežu, tokom kvarova, detaljno opisano pre više decenija dobro poznato široj naučnoj zajednici, u ovom poglavlju će pažnja biti posvećena opisu ponašanja DER zasnovanih na inverterima i dvostruko napajanim asihronnim mašinama.

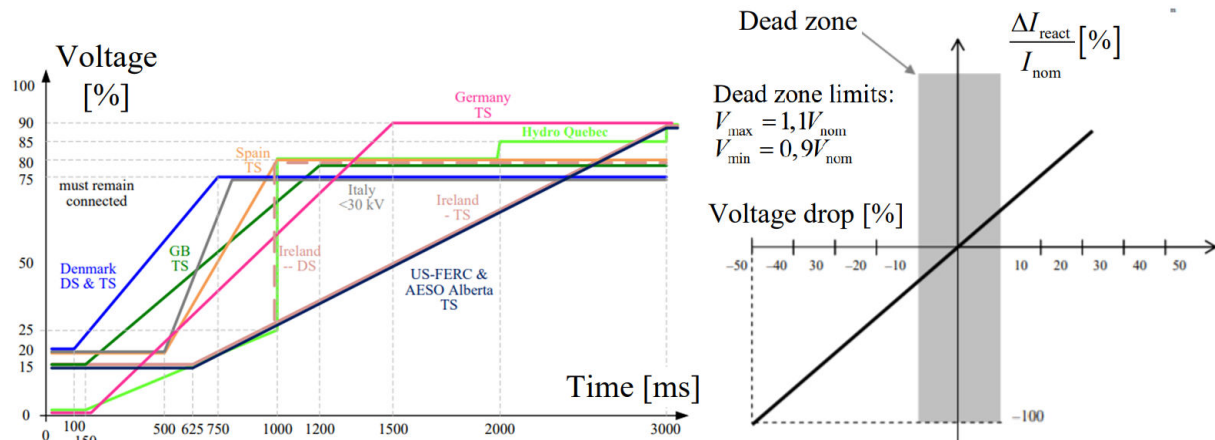
2.1 DER zasnovani na inverterima

Kako je ovaj tip DER povezan na mrežu preko invertora, njegovo ponašanje je u potpunosti kontrolisano od strane invertorskog kontrolera. U normalnim uslovima rada, IBDER najčešće radi sa jediničnim faktorom snage, kako bi injektirao u mrežu što je moguće više aktivne snage [10]. Pošto je svaki kvar u mikromreži praćen padom napona na mestu priključenja IBDER, invertorski kontroler mora da reaguje kako bi zadovoljio različite zahteve iz grid kod standarda za stabilizaciju napona.

Nakon što invertorski kontroler detektuje pojavu kvara, on ograničava struju kvara na unapred definisanu vrednost i koristi unapred definisanu strategiju upravljanja za određivanje odnosa aktivne i reaktivne komponente struja kvara. U većini slučajeva, IBDER reaguje na padove napona direktnog redosleda i injektira simetrične struje direktnog redosleda, čak i u slučaju neuravnoteženih kvarova [10]. Kontrolne strategije koje upravljaju strujama kvara su diktirane zahtevima definisanim u grid kod standardima i najčešće podrazumevaju *Low-Voltage-Ride-Through* (LVRT) i *Reactive-Current-Injection* (RCI) karakteristike [10].

Na slici 1 su prikazani primeri LVRT i RCI zahteva iz grid kod standarda [10]. LVRT zahtevi su prikazani za nekoliko zemalja. Svaka zemlja je označena jedinstvenom bojom. Vreme (u milisekundama) koliko dugo IBDER treba da ostane povezan na mrežu u slučaju kvara dato je na X-osi, dok je napon na priključcima IBDER-a (u odnosu na nazivni napon) tokom kvara dat na Y-osi. Iako se oblik ovih linija razlikuje za različite zemlje, princip je isti: ako napon čvora na koji je povezan IBDER ostane u području iznad linije, IBDER mora ostati povezan na mrežu tokom kvara. Međutim, ako napon padne ispod linije, IBDER mora da se isključi iz

mreže. Kroz RCI zahtev, grid kod standardi zahtevaju da IBDER pomogne bržem povratku napona u prihvatljive granice injektiranjem reaktivne snage tokom trajanja kvara. U većini slučajeva zahtevaju od IBDER da obezbede reaktivnu struju sa doprinosom od najmanje 2% vrednosti nazivne struje po procentu pada napona [10]; tj. ako napon padne na 50%, reaktivna struja treba da bude najmanje 100% njene nominalne vrednosti.



Slika 1 – Primer LVRT i RCI zahteva iz grid kod standarda

Ipak, kada invertorski kontroler detektuje kvar, on mora da kontroliše struje kvara IBDER tako da ostanu u okviru striktno definisanih strujnih granica kako bi zaštitio vrlo ranjive uređaje energetske elektronike [10]. Maksimalna dozvoljena struja se razlikuje kod različitih proizvođača, ali ne prelazi vrednost od 1.5 puta nazivna struja. Stoga, u slučajevima velikih padova napona (više od 75%), njihove reaktivne struje ne mogu preći ovu granicu.

2.2 Dvostruko napajane asinhronne mašine

Kod dvostruko napajanih AM (*doubly-fed-induction-machine* DFIM) stator je direktno povezan sa sistemom, dok je rotor takođe povezan sa sistemom, ali ne direktno, nego preko uređaja energetske elektronike.

DFIM predstavlja tip DER čiji doprinos struji kvara je najzahtevniji za određivanje [10]. Razlog za to je njegovo ponašanje tokom kvarova koje u velikoj meri zavisi od ozbiljnosti kvara (električne udaljenosti od DFIM do određene lokacije kvara) i od uređaja koji se koristi za zaštitu energetske elektronike [10].

U slučajevima ozbiljnih kvarova koji uzrokuju značajan pad napona na mestu priključenja DFIM, zaštitni uređaj ima za cilj da zaštiti uređaje energetske elektronike, pa zbog toga kratko-spaja rotor i na taj način ponašanje DFIM tokom kvara svodi na ponašanje klasične AM. Međutim, kada se kvar dogodi daleko od tačke priključenja DFIM, pa pad napona ne bude značajan, DFIM može da zadrži svoju strategiju kontrole koju je imala pre kvara i njeno ponašanje tokom kvara se u tom slučaju svodi na ponašanje IBDER (kontrolisana i ograničena struja kvara) [10]. Kako je mikromreža obično mala, a električno rastojanje između čvorova je u većini slučajeva malo, može se pretpostaviti najgori scenario — DFIM gubi kontrolu tokom kvara i ponaša se kao AM.

DFIM tehnologija se uglavnom koristi kod vetroturbinu [10].

Na kraju ovog poglavlja, važno je zaključiti da postoji drastična razlika u ponašanju između tradicionalnih i savremenih DER tokom kvara, što će biti detaljno razmotreno u analizi predstavljenoj u ovom radu.

3. AGREGACIJA DER KROZ KONCEPT MIKROMREŽE

Kroz proizvodnju lociranu uz same potrošače, DER imaju za cilj da smanje gubitke energije i poboljšaju pouzdanost distributivnih sistema. Kako su DER mnogo bliži kupcima električne energije, gubici su značajno smanjeni u poređenju sa pasivnim distributivnim sistemima, gde cela proizvodnja dolazi iz prenosne mreže. Pored toga, skladišta električne energije imaju za cilj da obezbede rezervnu proizvodnju za potrošače zbog toga što su DER u potpunosti zasnovani na obnovljivim izvorima energije i veoma zavise od vremenskih uslova (solarni paneli, vetro-elektreane i sl.) S druge strane, DER značajno povećavaju pouzdanost distributivnih sistema jer mogu da ponude proizvodnju na licu mesta, nezavisno od ostatka elektroenergetskog sistema i od toga da li je neki vod koji prenosi snagu ka nekoj grupi potrošača ispao. Zbog svega ovoga su u poslednjoj deceniji DER postali izuzetno tražene tehnologije i započeli revoluciju ka aktivnoj i kompleksnoj distributivnoj mreži budućnosti. Međutim, kako su tradicionalni distributivni sistemi dizajnirani kao pasivne mreže, visoka količina DER može izazvati neke neželjene pojave, kao što je potpuno drugačija rasporeda struje kvara, što posledično može izazvati neispravan rad zaštitne opreme kao i potencijalnu opasnost za radnike na održavanju. Najnovija

istraživanja pokazuju da postavljanje DER na potpuno proizvoljnim lokacijama širom mreže, može biti neekonomično rešenje. Tako su se pojavile mikromreže da se sistematski nose sa pitanjima sigurnosti, pouzdanosti i ekonomije sistema [11]. Mikromreža predstavlja jedan deo elektroenergetskog sistema, koji se sastoji od međusobno povezanih potrošača i DER, koji je povezan sa distributivnom mrežom u jednoj zajedničkoj tački priključenja (*Point-of-common-coupling* PCC), ali koja se može odvojiti od mreže i autonomno raditi i napajati svoje potrošače kroz proizvodnju DER. Dakle, mikromreže omogućavaju sistematsku integraciju DER u male nezavisne elektroenergetske sisteme, ali i obezbeđuju skup DER koji može da ponudi njihove agregirane snage operateru distributivnog sistema za različite usluge, posebno u pogledu postizanja pouzdanosti, sigurnosti i ekonomskih ciljeva [11].

4. POSTAVKA ZA PRIKUPLJANJE REZULTATA ISTRAŽIVANJA

Svi rezultati istraživanja koje je sprovedeno kroz ovaj rad prikupljeni su u Smart Grid laboratoriji Katedre za elektroenergetiku i primenjeno softversko inženjerstvo na Fakultetu Tehničkih Nauka u Novom Sadu. Na slici 2 prikazana je postavka koja je korišćena za prikupljanje rezultata.



Slika 2 – Postavka iz Smart Grid laboratorije na Fakultetu Tehničkih Nauka u Novom Sadu

Svi uređaji i postavke koji su korišćeni prilikom izvođenja istraživanja biće opisani u podpoglavljima koja slede.

4.1 Hardware-in-the-loop postavka

Za potrebe modelovanja mikromreže i DER kao i vršenja simulacija i proračuna u ovom radu autori su koristili hardware-in-the-loop (HIL) postavku iz Smart Grid laboratorije na Fakultetu tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu. Korišćena HIL postavka se sastoji od hardverskog dela - HIL uređaja označenog sa ① i softverskog dela označenog sa ② koji ima svoju biblioteku, sa ugrađenim visoko preciznim modelima svih tipova DER, koja je označena sa ③ na slici 2. Modeli DER se sastoje od električnog dela i signalnog odnosno upravljačkog dela. Signalni (upravljački) deo IBDER modela iz softverske biblioteke ima ugrađene LVRT i RCI zahteve iz grid kod standarda 5 različitih zemalja, a osim toga, daje mogućnost korisniku da kreira sopstvene LVRT krive. Pored ovoga, HIL postavka pruža mogućnost korisniku da u hardverski deo priključi realne, fizičke invertorske kontrolere i ulaze u koje su oni priključeni namapira na signalni deo DER modela i na taj način omogućujući realnom, fizičkom, kontroleru da upravlja modelovanim DER. Zbog identičnih odziva stvarnog i modelovanog IBDER kontrolera, za potrebe prikupljanja rezultata u ovom radu, autori su koristili IBDER modele iz softverske biblioteke.

Kroz HIL postavku moguće je testirati ponašanje mikromreže u raznim scenarijima od interesa. Svi rezultati koje HIL postavka obezbeđuje dobijaju se u realnom vremenu i mogu biti predstavljeni u vremenskom domenu. Odzive struja, napona kao i svih drugih veličina od interesa, pored toga što je moguće “snimiti”, a zatim

analizirati kroz alat za analizu signala u okviru HIL softvera, moguće je i eksportovati u .cfg *fault record* fajl koji je zatim moguće učitati u uređaj za sekundarno ispitivanje relejne zaštite i zatim testirati zaštitu na identičan strujni odziv koji je dobijen iz modela kroz HIL postavku.

4.2 Uređaj za sekundarno ispitivanje relejne zaštite

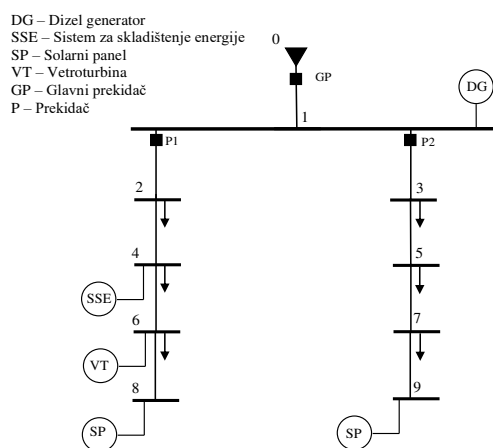
Uređaj za sekundarno ispitivanje zaštite koji je korišćen pri ovom istraživanju, označen sa ④ na slici 2, predstavlja univerzalno rešenje za testiranje releja svih tipova i generacija. Posедуje šest strujnih i četiri naponska izlaza koji se povezuju sa ulazima na releju koji se testira. Vrednost na ovim izlazima moguće je kontinuirano i nezavisno podešavati. Omogućava podešavanje amplituda, faznih stavova i frekvencije i svi izlazi su zaštićeni od previsoke temperature, slučajnih kratkih spojeva, eksternih visokonaponskih tranzijentnih signala i preopterećenja. Strujni izvori sa velikim dinamičkim opsegom, čine uređaj sposobnom da testira čak i elektromehaničke releje visokog opterećenja sa veoma visokim zahtevima za snagom. Unutar samog uređaja se uređajima energetske elektronike generišu struje i naponi koji se zadaju kroz softver. Softverski deo ovog uređaja predstavlja aplikaciju kroz koju je moguće zadati struje i napone koji će se poslati releju i na taj način ga testirati. Pored toga, kroz ovaj softver moguće je ponoviti bilo koji odziv koji je dobijen iz matematičkog modela i eksportovan u .cfg fajl.

4.3 Mikroprocesorska zaštita - relej

Mikroprocesorska zaštita koja je korišćena pri ovom istraživanju, označena sa ⑤ na slici 2, predstavlja najsavremenijeg tip zaštite. Namijenjena je za kontrolu i zaštitu u prenosnim i distributivnim mrežama. Osim zaštite i kontrole omogućava merenje, nadzor, analizu i upravljanje. Primenjiva je na bilo koji naponski nivo kako u energetske tako i u industrijskim sistemima. Podržava opciju prikaza jednofazne šeme na grafičkom displeju sa prikazom trenutnog stanja rasklopne opreme. Od zaštitnih funkcija poseduje struje (usmerene i neusmerene), naponske i frekvencijske zaštite. Takođe poseduje i dodatne funkcije kao što su *sinhro-check*, *autoreclosure* (automatsko ponovno uključanje), zaštita od otkaza prekidača itd. Za potrebe ovog istraživanja, korišćena je prekostrujna zaštita sa strujno nezavisnom karakteristikom.

5. REZULTATI I DISKUSIJA

Za potrebe proračuna i testova, kroz HIL postavku razvijena je mikromreža od 10 čvorova. U 5 čvorova priključeno je 5 DER. Obezbeđena je mogućnost povezivanja mikromreže na distributivnu mrežu i rada u povezanom režimu, kao i isključenja sa distributivne mreže i rada u ostrvskom režimu. Mikromreža je prikazana na slici 3.

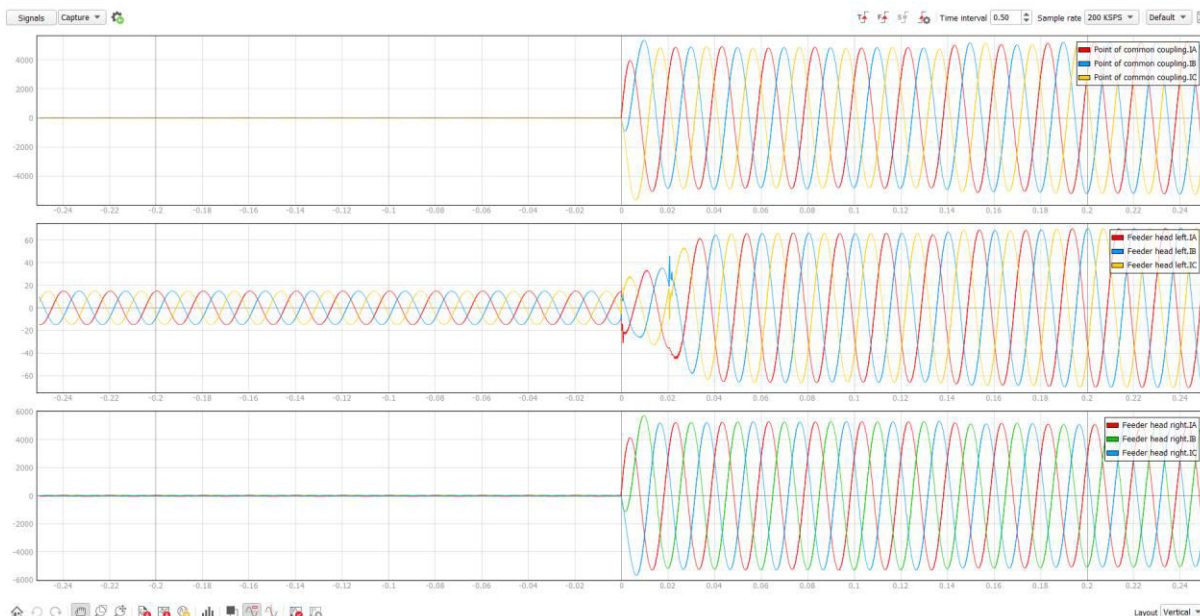


Slika 3 – Test mikromreža

Mikromreža je trofazna i uravnotežena. Svi potrošači su trofazni i uravnoteženi i svi su jednakih snaga u iznosu od 125 kVA. DER su priključeni u čvorove: 2, 4, 6, 8 i 9. Tehnologija proizvodnje za svaki DER prikazana je u okviru legende na slici 3. Nominalne snage DER su sledeće: $S_{DG}=1000$ kVA, $S_{SSE}=140$ kVA, $S_{VT}=140$ kVA, $S_{SP}=140$ kVA. Testna mikromreža je priključena na distributivnu mrežu (DM) čija snaga kratkog spoja iznosi 75 MVA. Sve sekcije u mikromreži su međusobno jednakih parametara, koji iznose $r = 1.2838$ Ω/km , $x = 1.45691$ Ω/km , $b = 4.66580$ $\mu\text{S}/\text{km}$.

Dužine svih sekcija su takođe međusobno jednake i iznose: $L = 0.075$ km. Glavni prekidač, označen sa GP na slici 3 promenom uklopnog stanja prevodi mikromrežu iz režima u kom je povezana na DM u ostrvski režim rada i obrnuto. Preostala 2 prekidača postavljeni su na počecima izvoda i označeni su sa P1 i P2.

Simulirani su svi tipovi kratkih spojeva, za oba režima rada: jednofazni (1FKS), dvofazni bez zemlje (2FKS), dvofazni sa zemljom (2FKSz) i trofazni sa i bez zemlje (3FKS(z)). Kratki spojevi su simulirani u različitim čvorovima, ali zbog ograničenja prostora prikazani su odzivi samo za 3FKS u čvoru 7. Zbog ograničenja broja strana odzivi su dati samo za kritična mesta, odnosno za grane na kojima se nalaze prekidači. Na slici 4 prikazani su strujni odzivi za sve tri faze kroz grane 1, 2 i 3 u slučaju 3FKS u čvoru 7 za povezan režim. Efektivne vrednosti ovih odziva, kao i vremenski interval na kom su te vrednosti određene, date su na slici 5.

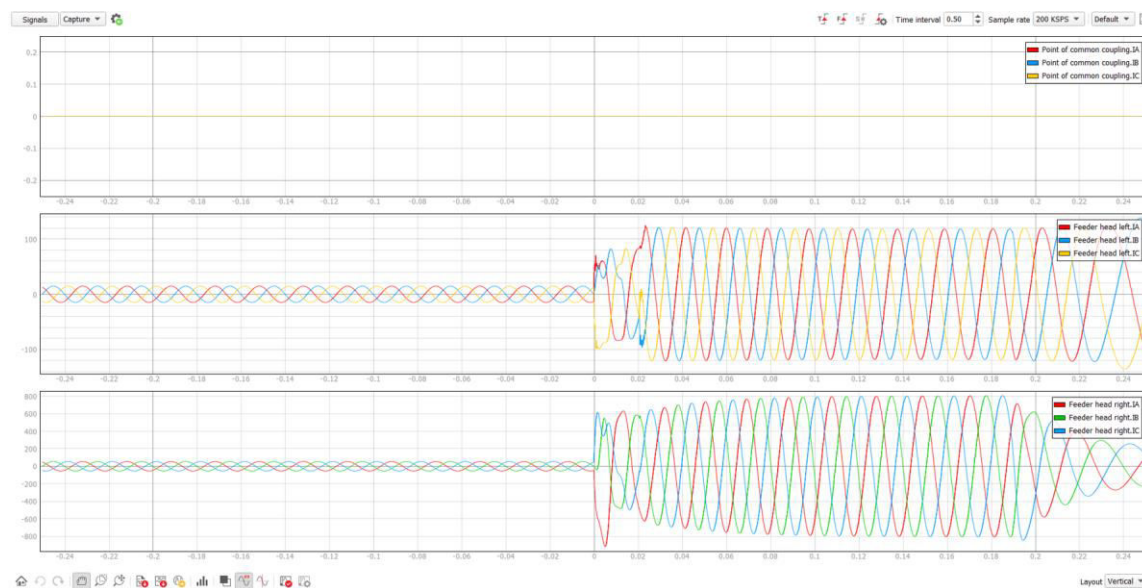


Slika 4 – Strujni odzivi za sve tri faze kroz grane 1, 2 i 3 u slučaju 3FKS u čvoru 7 za povezan režim

Signal Name	Cursor 1	Cursor 2	Delta	Min.	Max.	Abs.Max.	Mean	RMS
▼ Viewport 1								
⌚ Time	0.03624s	0.11656s	0.08032					
■ Point of common coupling.IA	-2892.7893	-2427.6143		-4864.2266	4900.954	4900.954	-9.675018	3420.448
■ Point of common coupling.IB	-1996.3972	-2427.944		-4918.348	4845.521	4918.348	-11.431586	3420.6448
■ Point of common coupling.IC	4889.186	4855.558		-4877.566	4918.988	4918.988	21.106636	3431.7073
▼ Viewport 2								
⌚ Time	0.03624s	0.11656s	0.08032					
■ Feeder head left.IA	44.957317	45.062855		-66.22179	66.39331	66.39331	0.078188956	46.592674
■ Feeder head left.IB	15.880174	19.354727		-66.29193	66.348915	66.348915	-0.019980624	46.518326
■ Feeder head left.IC	-60.83753	-64.41762		-66.40829	66.19716	66.40829	-0.058207963	46.57049
▼ Viewport 3								
⌚ Time	0.03624s	0.11656s	0.08032					
■ Feeder head right.IA	-3318.083	-2920.4365		-5292.0376	5288.519	5292.0376	-13.084257	3728.443
■ Feeder head right.IB	-1848.8215	-2344.552		-5292.293	5287.6313	5292.293	-6.9573274	3724.697
■ Feeder head right.IC	5166.9043	5264.9883		-5283.458	5293.601	5293.601	20.041569	3736.853

Slika 5 – Efektivne vrednosti strujnih odziva kroz grane 1, 2 i 3 u slučaju 3FKS u čvoru 7 za povezan režim

Na slici 6 prikazani su strujni odzivi za sve tri faze kroz grane 1, 2 i 3 u slučaju 3FKS u čvoru 7 za ostrvski režim. Efektivne vrednosti ovih odziva, kao i vremenski interval na kom su te vrednosti određene, date su na slici 7.



Slika 6 – Strujni odzivi za sve tri faze kroz grane 1, 2 i 3 u slučaju 3FKS u čvoru 7 za ostrvski režim

Signal Name	Cursor 1	Cursor 2	Delta	Min.	Max.	Abs.Max.	Mean	RMS
▼ Viewport 1								
Time	0.0358100012s	0.1102050021s	0.0743950009					
Point of common coupling.IA	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Point of common coupling.IB	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Point of common coupling.IC	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
▼ Viewport 2								
Time	0.0358100012s	0.1102050021s	0.0743950009					
Feeder head left.IA	-51.919464	-70.8779		-120.19887	120.52699	120.52699	0.25787026	84.60944
Feeder head left.IB	-68.408005	-46.629787		-120.71095	120.333115	120.71095	0.6615637	84.55415
Feeder head left.IC	120.32746	117.50768		-120.45355	120.32746	120.45355	-0.91943294	84.11971
▼ Viewport 3								
Time	0.0358100012s	0.1102050021s	0.0743950009					
Feeder head right.IA	190.50636	588.35114		-790.44025	794.1077	794.1077	-3.4064453	543.47595
Feeder head right.IB	485.1353	168.65201		-792.9963	788.82935	792.9963	-13.609292	541.25256
Feeder head right.IC	-675.6417	-757.0031		-787.1554	791.76715	791.76715	17.015743	534.38226

Slika 7 – Efektivne vrednosti strujnih odziva kroz grane 1, 2 i 3 u slučaju 3FKS u čvoru 7 za ostrvski režim

Strujni odzivi dobijeni pomoću HIL postavke u slučaju povezanog rada mikromreže koji se odnose na granu 3 (početak izvoda sa kvarom), eksportovani su u .cfg fajl koji je zatim učitani u softveru uređaja za sekundarno ispitivanje zaštite. Sam uređaj je priključen u mikroprocesorsku zaštitu – relej, a zatim su generisani strujni odzivi koji su učitani kroz softver. Na taj način ponovljen je isti onaj događaj koji je simuliran pomoću modela iz HIL postavke, samo sada uz prave, realne, struje koje su generisane i poslate na ulaze releja. Pošto je prekostrujna zaštita releja bila podešena na strujno nezavisnu karakteristiku sa podešenjima 2500 A i 0.2 s, relej je tripovao kao što je i očekivano jer je efektivna vrednost tog odziva veća od 3700 A u sve tri faze kao što je prikazano na slici 5. Isti postupak ponovljen je i sa strujnim odzivima dobijenim u slučaju mikromreže u ostrvskom režimu rada, međutim u ovom slučaju relej nije tripovao jer je efektivna vrednost tog odziva manja od 550 A u sve tri faze kao što je prikazano na slici 7. U ovom slučaju, odnos vrednosti struja u grani od interesa za povezani i ostrvski režim rada je $3728 \text{ A} / 543 \text{ A} = 6.86$. Dakle, kada mikromreža pređe u ostrvski režim rada struja kvara na početku izvoda sa kvarom bude 6.86 puta manja nego što je to bilo u povezanom režimu rada.

Iz prikazanih rezultata, može se zaključiti da postoje ogromne razlike u strujama kratkih spojeva u zavisnosti od režima rada mikromreže. U režimu povezanom na DM struje kratkih spojeva na lokacijama na kojima se nalazi prekidačka oprema, veće su i do 6.86 puta u odnosu na ostrvski režim. Najveće razlike su za slučaj 3FKS(z) u kom slučaju su i struje kratkih spojeva najviše, dok su najniže razlike za 1FKS (rezultati za sve tipove kvara dostupni su na zahtev). Ove razlike struja kratkih spojeva značajno utiču na podešavanje i koordinaciju relejne zaštite, s obzirom da se ista zaštitna oprema koristi nezavisno od režima rada.

6. ZAKLJUČAK

U ovom radu vršene su simulacije kratkih spojeva mikromreže sa priključenim DER, u oba režima rada – ostrvskom i povezanom na DM i na osnovu odziva dobijenih simulacijom, testirana je realna mikroprocesorska zaštita. Primećene su vrlo značajne razlike u strujama kvara, u zavisnosti od režima rada. Pokazano je da ove razlike mogu negativno da deluju na podešavanje i koordinaciju relejne zaštite mikromreže.

Pošto je od izuzetne važnosti da mikromreža bude zaštićena u svakom trenutku, možemo se zaključiti da je potrebno postaviti dva podešenja zaštite od kojih bi se jedan odnosio na povezan režim rada, a drugi na ostrvski. Dodatno, pošto mikromreža može u svakom trenutku da pređe iz jednog u drugi režim rada, potrebno je obezbediti adaptivno podešavanje zaštite. Realizacija adaptivne zaštite trebala bi da podrazumeva dva seta podešenja zaštita u mikromreži koje bi se u zavisnosti od uklopnog stanja glavnog prekidača menjalo. Pri prelasku iz povezanog u ostrvski režim rada, adaptivna relejna zaštita trebala bi da promeni podešenje zaštite tako da sada aktivno postane ono podešenje koje odgovara ostrvskom režimu rada i suprotno. Zato je potrebno razviti novi metod za adaptivnu relejnu zaštitu mikromreža, koje će se automatski prepodešavati kada mikromreža pređe iz jednog u drugi režim. Ova tema biće adresirana kroz buduća istraživanja autora.

LITERATURA

- [1] Parhizi, S., Lotfi, H., Khodaei, A., Bahramirad, S.: 'State of the Art in Research on Microgrids: A Review', IEEE Access, 2007, vol. 3, pp. 890-925
- [2] IEEE P2030.7/D10: 'IEEE Draft Standard for the Specification of Microgrid Controllers' 2017
- [3] Sarkar, S., Roni, M., Datta, D., Das, S., Pota, H.: 'Improved Design of High-Performance Controller for Voltage Control of Islanded Microgrid', IEEE Systems Journal, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 1786-1795
- [4] Barra P.H.A., Coury D.V., Fernandes R.A.S.: 'A Survey on Adaptive Protection of Microgrids and Distribution Systems with Distributed Generators', Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, vol. 118, no. 1, pp. 1-16.
- [5] Dağ, B., Boynueğri, A., Ateş, Y., Karakaş, A., Nadar, A., Uzunoğlu, M.: 'Static Modeling of Microgrids for Load Flow and Fault Analysis', IEEE Transactions on Power Systems, 2017, vol. 32, no. 3, pp. 1990-2000
- [6] K.H. Oon, C. Tan, A.H.A Bakar, H.S. Che, H. Mokhils, H.A. Illias, "Establishment of fault current characteristics for solar photovoltaic generator considering low voltage ride through and reactive current injection requirement", Ren. and Sust. Ener. Reviews, vol. 92, pp. 478- 488, 2018
- [7] Najy, W., Zeineldin, H., Woon, W.: 'Optimal Protection Coordination for Microgrids With Grid-Connected and Islanded Capability', IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, vol. 60, no. 4, pp. 1668-1677
- [8] D. Lagos, V. Papaspiliotopoulos, G. Korres and N. Hatziargyriou, "Microgrid Protection Against Internal Faults: Challenges in Islanded and Interconnected Operation," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 19, no. 3, pp. 20-35, May-June 2021, doi: 10.1109/MPE.2021.3057950.
- [9] Strezoski, L., Prica, M., Loparo, K.: 'Generalized Δ -Circuit Concept for Integration of Distributed Generators in Online Short-Circuit Calculations', IEEE Transactions on Power Systems, 2017, vol. 32, no. 4, pp. 3237-3245
- [10] Strezoski, L., Dumnic, B., Popadic, B., Prica, M., Loparo, K.: 'Novel Fault Models for Electronically Coupled Distributed Energy Resources and Their Laboratory Validation', IEEE Transactions on Power Systems, 2020, vol. 35, no. 2, pp. 1209-1217
- [11] N. Simic, L. Strezoski, B. Dumnic, 'Short-Circuit Analysis of DER-Based Microgrids in Connected and Islanded Modes of Operation', Energies, 14(19), 6372, 2021.