



Broj rada: R-3.02

DOI broj: [10.46793/CIREĐ24.R-3.02LS](https://doi.org/10.46793/CIREĐ24.R-3.02LS)

LABORATORIJA ZA PAMETNE MREŽE NA FAKULTETU TEHNIČKIH NAUKA UNIVERZITETA U NOVOM SADU

SMART GRID LABORATORY AT THE FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES AT THE UNIVERSITY OF NOVI SAD

Luka STREZOSKI, Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

Nikola SIMIĆ, Departman za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

U ovom radu, predstavljeni su razvoj i primena Laboratorije za pametne mreže na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, sa posebnim osvrtom na njene primene u akademskim istraživanjima i industrijskim okruženjima. U radu je detaljno opisano testno okruženje kontrolnog centra pametne mreže koje je uspostavljeno unutar Laboratorije, prikazujući njegove ključne parametre dizajna, operativne sposobnosti, kao i edukativne implikacije. Svaka komponenta kontrolnog centra je analizirana, a posebna pažnja je posvećena modelovanju realne elektroenergetske mikromreže unutar testnog okruženja. Ovaj segment rada ističe arhitekturu, funkcionalnu dinamiku i adaptabilnost sistema za simuliranje različitih scenarija distributivne mreže i mikromreže. Od mnoštva istraživačkih eksperimenata koji su autori vršili u Laboratoriji, u radu su prikazana tri, i to: Odsecanje potrošnje, Analiza raspodele struje kvara i Analiza osetljivosti zaštite mikromreže. Na osnovu prikazanih eksperimenata, izvedeni su zaključci istraživanja, naglašavajući kako testno okruženje omogućava povezivanje teorijskog znanja s praktičnim primenama, što je od suštinskog značaja u evoluirajućem domenu tehnologije pametnih mreža.

Ključne reči: pametne mreže, mikromreže, distribuirani resursi.

ABSTRACT

This paper introduces the development and deployment of an advanced Smart Grid Laboratory Testbed at the University of Novi Sad, focusing on its diverse applications in both academic research and industrial settings. It begins with an overview of the smart grid testbed at the University of Novi Sad, detailing its design parameters, operational capabilities, and implications for education. The paper then addresses a real-life microgrid system, highlighting its real-world applicability and integration challenges. The discussion progresses to the campus microgrid model integrated within the smart grid testbed, highlighting its design intricacies, functionality, and flexibility to emulate various grid scenarios. In the later sections, a detailed analysis through case studies is presented, providing essential insights into the testbed's performance, reliability, and adaptability. The conclusion synthesizes the findings, reflecting on the testbed's role in linking theoretical concepts with practical applications in the dynamic field of smart grid technology.

Key words: Smart grids, microgrids, distributed energy resources.

Luka Strezoski, lukastrezoski@uns.ac.rs

Nikola Simić, nikola.simic@uns.ac.rs

1. UVOD

U poslednjih nekoliko godina, energetski sektor je doživeo značajne transformacije, posebno u smislu inicijativa za prelaskom na održivije sisteme. Pametne mreže su se pojavile kao ključna tehnologija, pružajući platformu za efikasnu integraciju obnovljivih izvora energije [1-3]. Većina promena, u poređenju sa tradicionalnim

električnim mrežama, dešava se na nivou distributivne mreže. Ova evolucija je uglavnom uzrokovana uvođenjem sve većeg broja distribuiranih izvora energije (DER) [4-6]. DER uključuju, ali nisu ograničeni na, fotovoltaične sisteme, male vetrogeneratore, skladišta energije, kao i električna vozila (EV) zajedno sa njihovom pratećom infrastrukturom za punjenje. Značajne agregacije DER i povezanih potrošača mogu biti konfigurisane i u mikromreže [11]. Uvođenje ovih novih uređaja u energetska mrežu iz temelja menja način rada onoga što su nekada bile pasivne distributivne mreže. Da bi se efikasno vodile, upravljale, štitile i optimizovale ovako složene i dinamički promenljive mreže, uvedena su nova rešenja prilagođena za operatore distributivnih sistema i inženjere sistema. Ova rešenja obuhvataju napredne sisteme za upravljanje distributivnim mrežama (ADMS sistemi), sisteme za upravljanje distribuiranim izvorima energije (DERMS sistemi), kao i kontrolere mikromreža i alate za upravljanje mikromrežama [7-10]. Međutim, očigledno je da osoblje i operateri u tradicionalnim kontrolnim centrima nisu dovoljno opremljeni niti obučeni da prihvate ove nove tehnologije, suoče se sa novonastalim izazovima, i adekvatno koriste ove nove alate za upravljanje [12, 13].

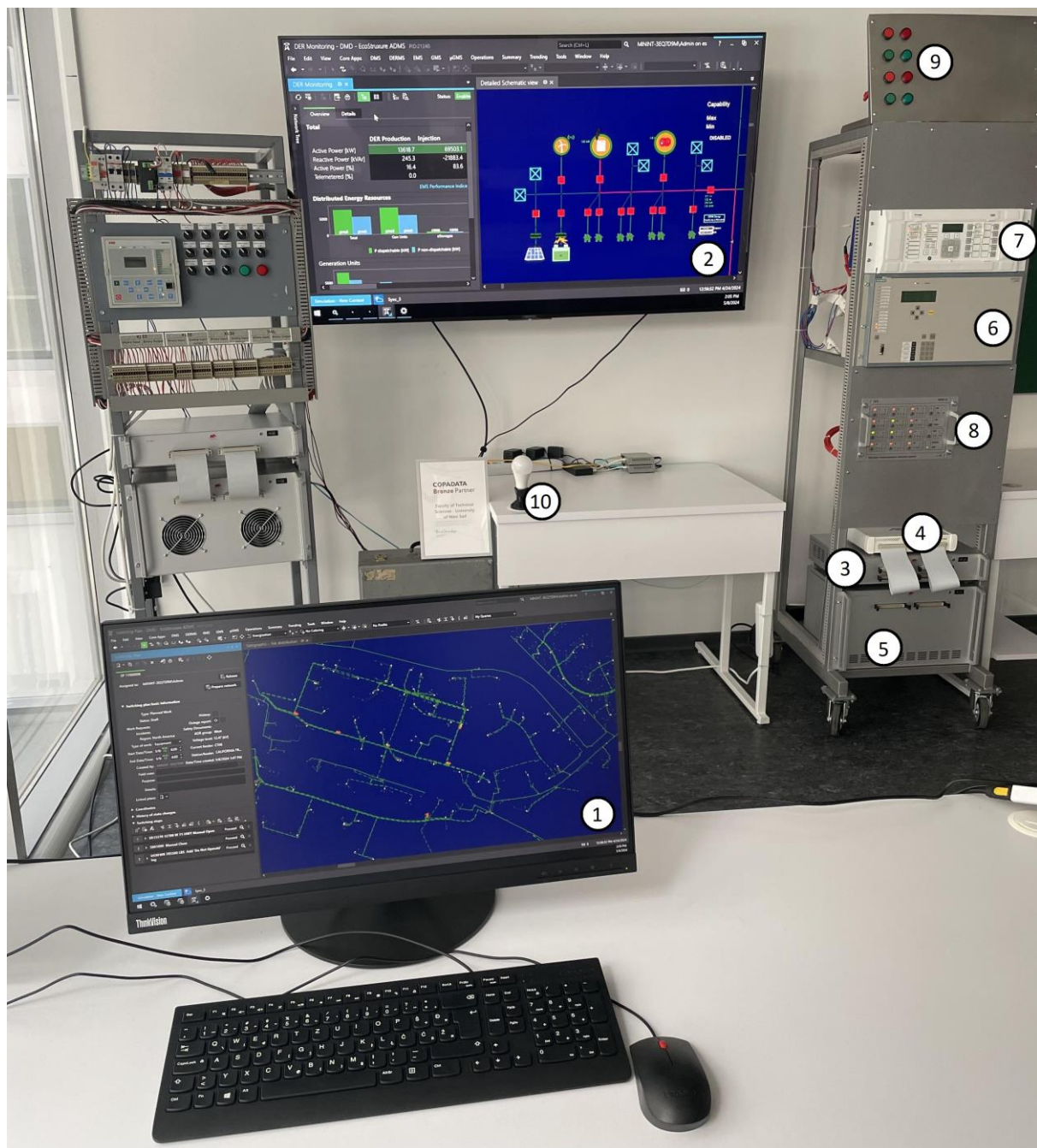
Potreba za razvojem dubljeg razumevanja složenosti, potencijala, sigurnosti i optimizacije tehnologija pametnih mreža dovela je do stvaranja specijalizovanih platformi kao što su različite laboratorije i testna okruženja ("testbed") pametnih mreža. Ove platforme su sposobne da emuliraju stvarne scenarije, te služe kao ključni deo koji povezuje teorijske analize sa njihovim praktičnim upotrebama [14-18]. Iako postojeća testna okruženja imaju ogroman značaj, veliki deo potpuno funkcionalnih okruženja nalazi se pretežno u Sjedinjenim Američkim Državama, te je njihov broj vrlo ograničen u odnosu na globalne potrebe. Kao odgovor na ovu potrebu, Laboratorija za pametne mreže na Univerzitetu u Novom Sadu, u Srbiji, pionirski je poduhvat razvoja jednog od najsavremenijih testbed okruženja pametnih mreža. Ova Laboratorija pruža mogućnost kompletne emulacije jednog najmodernijeg kontrolnog centra savremenih distributivnih mreža. U okviru Laboratorije, istraživači, stručnjaci iz industrije, kao i akademski stručnjaci imaju mogućnost da simuliraju, odnosno emuliraju različite uslove unutar distributivne mreže, koji uključuju simulaciju različitih tehničkih, operativnih, pa i meteoroloških scenarija. Pored toga, korisnici mogu u realnom vremenu da prate ove promenljive scenarije, njihove posledice na rad distributivne mreže, kao i mogućnosti optimizacije i zaštite distributivne mreže u različitim uslovima, koristeći se najsavremenijim softverskim rešenjima za upravljanje ovih mreža. Opis ove Laboratorije i njenih mogućnosti, osnovni je cilj ovog rada.

Konačno, u saradnji između Univerziteta u Novom Sadu i Univerziteta Case Western Reserve (CWRU), u Sjedinjenim Američkim Državama, naš tim je izvršio sveobuhvatan proces prikupljanja podataka, koji je rezultirao razvojem modela realne mikromreže CWRU kampusa, integrisanog unutar Laboratorije za pametne mreže na Univerzitetu u Novom Sadu. Proces modelovanja je podeljen u dve faze. Početna faza podrazumeva razvoj potpuno dinamičkog modela u vremenskom domenu, razvijenog u "hardware-in-the-loop (HIL)" okruženju. Ovaj model je sposoban da uhvati brze prelazne procese unutar testnih mreža, što je ključno za razumevanje funkcionisanja pojedinačnih komponenti sistema. Druga faza fokusira se na uspostavljanju kvazistacionarnog modela u kompleksnom domenu, koristeći komercijalne pakete ADMS i DERMS softvera. Ovaj model je od suštinskog značaja za razumevanja rada kompletnog sistema. Eksperimentalna ispitivanja se zatim sprovode na svakom modelu, u zavisnosti od specifičnog slučaja upotrebe.

Rad je zasnovan na istraživanjima sprovedenim u referencama [24, 25], koja su proširena dodatnim primerima i diskusijom, za specifične potrebe analize distributivnih mreža i mikromreža.

2. LABORATORIJA ZA PAMETNE MREŽE NA FAKULTETU TEHNIČKIH NAUKA UNIVERZITETA U NOVOM SADU

U ovom delu je, u skladu sa referencama [24, 25], detaljno opisana Laboratorija za pametne mreže, razvijena na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu. Različite komponente su prikazane na Slici 1, i opisane kako sledi.



Slika 1 – Laboratorija za pametne mreže na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu

A. Advanced Distribution Management System (ADMS)

Na Slici 1, prikazan je EcoStruxure ADMS kompanije Schneider Electric (označen kao ①). Ovaj softver predstavlja sveobuhvatno rešenje za upravljanje mrežom, kombinujući aplikacije za nadzor, analizu, kontrolu, optimizaciju i planiranje distributivnih mreža, kao i za obuku inženjera. Sistem integriše funkcije Nadzornog Upravljanja i Akvizicije Podataka (SCADA), Sistema za Upravljanje Distribucijom (DMS) i Sistema za Upravljanje Prekidima (OMS). SCADA sistem nadgleda status energetske mreže i njenu topološku strukturu; DMS olakšava analitičke operacije za distributivnu mrežu; Servis za Modelovanje Mreže je odgovoran za administraciju modela podataka električne mreže; OMS je posvećen upravljanju incidentima i radnim nalogima; a Upravljanje Prekidačima rukovodi procedurama i aktivnostima koje su relevantne za planirane i neplanirane zadatke unutar energetske mreže. Opisani integrisani sistem pruža sveobuhvatne aspekte upravljanja mrežom, čime se povećava efikasnost i operativna efikasnost vođenja, zaštite i kontrole elektroenergetskih sistema.

B. Distributed Energy Resource Managemnt System (DERMS)

EcoStruxure DERMS, označen je brojem ② na Slici 1. DERMS predstavlja softver prilagođen elektroenergetskim preduzećima za upravljanje velikom količinom distribuiranih energetske resursa (DER). DERMS pruža mogućnost nadzora u realnom vremenu, prognoze za kratkoročni i srednjoročni period, kao i intuitivnu kontrolu DER-ova. Takođe, sistem obuhvata napredne module za upravljanje ograničenjima, optimizaciju mreže i integraciju novih DER-ova. Pored toga, DERMS obuhvata i detaljno upravljanje resursima, dinamičku optimizaciju, pa i anticipativno planiranje za nadolazeće vremenske periode. Kombinujući različite energetske resurse u agregisane entitete i omogućavajući napredne strategije upravljanja njihovom fleksibilnošću, DERMS pruža ključne sposobnosti upravljanja energijom distributivnih preduzeća.

C. Hardware in the Loop tehnologija (HIL)

HIL postavka, označena je sa ③ na Slici 1. Ova postavka služi kao precizan alat za modelovanje i emulaciju rada mikromreža i DER. Sastoji se od hardverskih (HIL uređaj) i softverskih komponenti koje pružaju sveobuhvatnu biblioteku sa detaljnim modelima DER-ova, a koji obuhvataju i električne i kontrolne elemente. HIL postavka omogućava povezivanje fizičkih kontrolera invertera i pripadajućeg hardvera, mapirajući ih na signalne komponente softvera. Ova interakcija omogućava stvarnim kontrolerima da upravljaju virtualnim DER modelima, osiguravajući usklađenost između stvarnih i simuliranih odziva kontrolera DER. Sa HIL-om se može proučavati ponašanje mikromreže u različitim scenarijima u realnom vremenu, beležeći vremenske odzive na nivou milisekunde.

D. Kontroler invertora

Invertorski kontroler, označen je sa ④ na Slici 1. Ovaj kontroler predstavlja prilagodljivo rešenje namenjeno različitim aplikacijama pretvarača snage, kao što su trofazni fotovoltaići, skladišta energije i drugi DER-ovi zasnovani na inverterima. Obuhvata ključne funkcionalnosti podrške mreži, kao što su P(U)-Volt/Watt, Q(U)-Volt/Var, P(f)-Freq/Watt i druge, obezbeđujući usklađenost sa globalnim mrežnim kodovima. Integrisane zaštite jačaju zaštitu hardvera, uz prilagođena podešavanja firmvera za povećanu sigurnost. Što se tiče komunikacije, kontroler podržava protokole kao što su ModBus, SunSpec i IEC61850, sa dodatnim opcijama dostupnim po zahtevu, pozicionirajući ga kao svestrano rešenje za potrebe pretvarača snage.

E. HIL Connect uređaj

Univerzalni HIL Connect uređaj, označen je sa ⑤ na Slici 1. Ovaj uređaj uslovljava jedinstveni red I/O signala sa bilo kog HIL uređaja, pretvarajući ih u izlazne napone od ± 130 volti (RMS) ili izlazne struje do 2 ampera (RMS). To omogućava proizvodnju autentičnih oblika struje i napona zasnovanih na signalima vremenskog domena dobijenih putem HIL postavke. Rezultirajući signali iz HIL Connect-a mogu se slati na zaštitne uređaje za testiranje, postupak koji se često naziva sekundarno testiranje zaštitne opreme.

F. Zaštitna oprema

Siprotec 4 7SA6 označen na Slici 1 sa ⑥ predstavlja digitalnu daljinsku zaštitu, selektivnu i izuzetno brzu, koja nalazi svoju primenu u zaštiti nadzemnih vodova i kablova u radijalnim, upetljenim ili bilo kojim drugim tipom mreže na bilo kom naponskom nivou, bez obzira na to da li je neutralna tačka uzemljena, kompenzovana ili izolovana. Uređaj sadrži funkcije koje su potrebne za zaštitu nadzemnih vodova i stoga je sposoban za univerzalnu primenu. Takođe se može primeniti kao vremenska rezervna zaštita za sve tipove uporednih zaštitnih šema koje se koriste na vodovima, transformatorima, generatorima, motorima i sabirnicama.

P40 Agile P345 generatorska relejna zaštita označena sa ⑦ na Slici 1 obezbeđuje fleksibilnu i pouzdanu integraciju funkcija zaštite, kontrole, nadzora i merenja za širok spektar primena. Najčešće se koristi za zaštitu generatora ili blokova generator – transformator. Uključuje diferencijalnu zaštitu za brzo i selektivno uklanjanje svih tipova kratkih spojeva. Sve komponente za zaštitu, kontrolu, nadzor, snimanje i komunikaciju generatora smeštene su u jednu kutiju, a glavne zaštitne funkcije su autonomne i mogu se pojedinačno uključiti ili isključiti kako bi odgovarale izabranoj nameni. Svaka zaštitna funkcija je dostupna u 4 odvojene grupe podešenja.

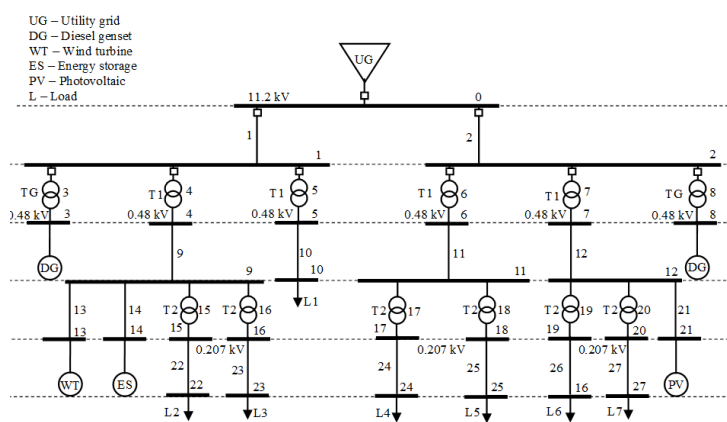
G. Simulator prekidača

U laboratoriji se nalaze dva simulatora prekidača, označena sa ⑧ i ⑨ na Slici 1. Ovi uređaji omogućavaju simulaciju komandi otvaranja i zatvaranja usmerenih na prekidače. Ovi simulatori su povezani sa izlazima za isključivanje zaštitne opreme, osiguravajući odziv kontrole sa ovih izlaza. Dodatno, povezani su sa fizičkim potrošačima. Primer jednog takvog potrošača je sijalica označena sa ⑩ na Slici 1. Sijalica je izabrana kako bi se pružio vizuelni prikaz operativnog stanja, ali nema ograničenja da se poveže sa bilo kojim drugim tipom potrošnje.

Svi opisani elementi su međusobno povezani koristeći industrijske standardne interfejsa i protokole.

3. REALNA MIKROMREŽA MODELOVANA U LABORATORIJI ZA PAMETNE MREŽE

U ovom delu dat je opis realne mikromreže kampusa CWRU Univerziteta [25] – Slika 2. Ova mikromreža ima 28 trofaznih čvorova, pri čemu je čvor 0 označen kao tačka spajanja (“Point of Common Coupling – PCC”) sa distributivnom mrežom. U okviru CWRU mikromreže postoje tri različita naponska nivoa: 11.2 kV, 0.48 kV i 0.207 kV. Energetska mreža ima kapacitet kratkog spoja od 1000 MVA i odnos X/R jednak 22. Mikromreža sadrži dva dizel generatora, svaki sa nominalnom snagom od 200 kVA, koji su integrisani u čvorovima 3 i 8, respektivno.



Slika 2 – Mikromreža CWRU kampusa

Pored ovih generatora, mikromreža ima i tri invertorska DER-a (IBDER) povezana sa sabirnicama 13, 14 i 21. Tehnološki i funkcionalni detalji ovih IBDER-a su prikazani na Slici 2. Vetrogenerator unutar ove konfiguracije ima nominalnu snagu od 60 kVA, dok jedinice za skladištenje energije i solarna elektrana (PV) imaju nominalnu snagu od 40 KVA. U zavisnosti od režima rada jedinice za skladištenje energije u smislu toga da li se ona puni ili prazni, tretirana je kao IBDER ili potrošač. Mikromreža sadrži potrošače kapaciteta 60 kW povezane u čvorovima 22, 23, 24, 25, 26 i 27, i potrošač kapaciteta od 40 kW povezan sa čvorom 10. Ukupna potrošnja iz originalne mikromreže je modifikovana za ovaj rad, kako bi bio moguć prelazak i u ostrvski rad. Više detalja o samoj mikromreži dato je u referenci [25].

4. MODEL MIKROMREŽE I REZULTATI ODABRANIH PRORAČUNA

Razvijena su dva modela iste CWRU mikromreže – jedan u ADMS, a drugi u HIL okruženju. U okviru ADMS okruženja razvijen je kvazistacionarni model, dok je model iz HIL okruženja u stanju da emulira dinamičko ponašanje mikromreže.

ADMS model omogućava integraciju mikromreže i njenih resursa u napredne aplikacije koje se odnose na upravljanje mikromrežom u realnom vremenu, kao i zaštitu i kontrolu. U okviru ADMS-a, modelovana CWRU mikromreža je preko svoje jedinstvene tačke priključenja povezana sa jednim distributivnim izvodom posredstvom prekidača kojim je moguće upravljati iz ADMS-a u realnom vremenu u smislu promene njegovog uklopnog stanja [21]. Samo ponašanje elemenata unutar mikromreže, njihova interoperabilnost, kao i njihovi dinamički odzivi na različite uslove mreže, uključujući vremenske odzive DER sa preciznošću do nivoa milisekundi, mogu se emulirati unutar modela iz HIL okruženja.

Komunikacija između ADMS i HIL uređaja ostvarena je putem standardnih interfejsa i protokola koje podržavaju oba okruženja. Ovo omogućava ADMS-u da šalje komande kontroleru mikromreže koji se nalazi unutar HIL uređaja kako bi efikasno simulirao razmenu komunikacije između kontrolnog centra i infrastrukture u polju.

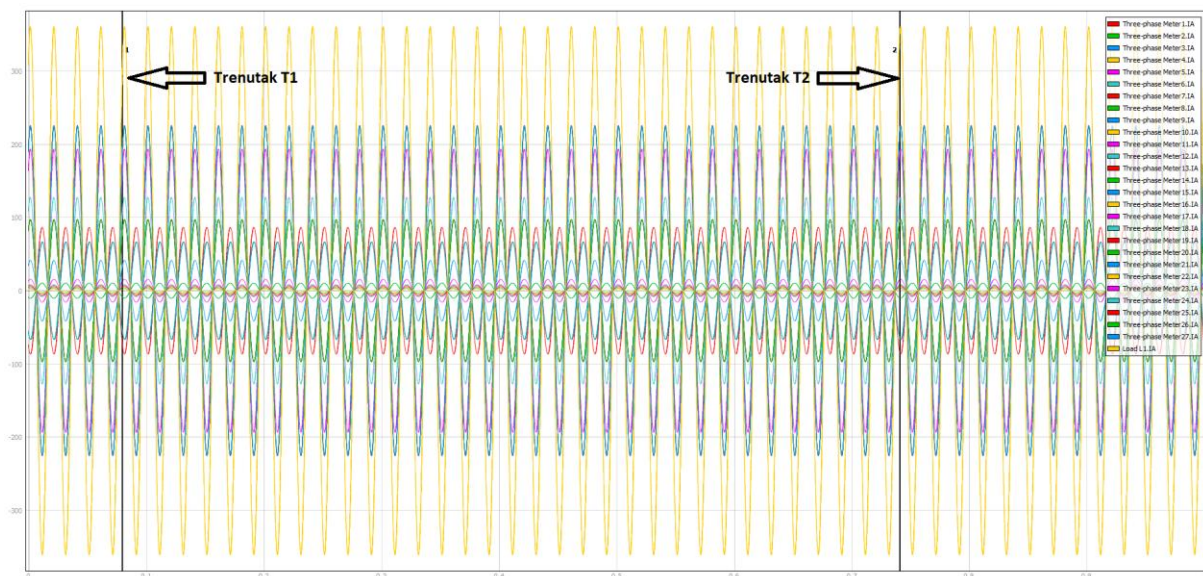
Pored komunikacije između ADMS-a i kontrolera mikromreže, uspostavljena je i komunikacija između ADMS-a i prekidača na čvoru 10. Ova komunikacija omogućava upravljanje opterećenjem unutar mikromreže u smislu isključenja/priključenja potrošača L1. Za ovu svrhu korišćeni su realni (fizički) simulator prekidača i relej.

Jedan invertorski kontroler fizički je povezan sa HIL uređajem i signali iz njegovih kontrolnih krugova napamirani su na jedinicu za skladištenje energije koja je priključena u čvor 14. Za invertorski kontroler nema razlike u tome da li je priključen u HIL uređaj ili u inverter koji se nalazi u polju. Njegovo prisustvo omogućava da ponašanje modelovane jedinice za skladištenje energije bude u potpunoj saglasnosti sa ponašanjem realne jedinice u istim uslovima.

Da bi se prikazala primenljivost razvijenog testnog okruženja, izvedene su tri eksperimenta: odsecanje potrošnje; analiza raspodele struje kvara; i analiza uticaja struje kvara na osetljivost zaštite mikromreže. Pored ova tri primera, autori su vršili, i vrše i dalje, veliki broj drugih eksperimenata koji se tiču vođenja, optimizacije, zaštite i koordinacije mikromreža i distributivnih mreža.

1. Odsecanje potrošnje:

Na početku ovog eksperimenta izvršen je proračun tokova snaga mikromreže u ADMS okruženju. Ovi rezultati podrazumevaju proračunate efektivne vrednosti napona svih čvorova i struja svih grana unutar mikromreže. Da bi se verifikovali rezultati koji su dobijeni, uslikan je vremenski odziv istih veličina u HIL okruženju u periodu od 1s. Signali koji su uslikani analizirani su tako što je za svaki signal proglašen početni i krajnji trenutak (T1 i T2), a zatim je analizirana efektivna vrednost svakog signala u periodu od interesa. Svaki signal je uslikan i analiziran pojedinačno kroz Signal Analyzer aplikaciju iz HIL okruženja, ali zbog ograničenja prostora u ovom radu, na Slici 3 su predstavljeni svi vremenski odzivi na istom prikazu. Svrha ove slike jeste samo da se prikaže da su svi vremenski odzivi prostoperiodične veličine što znači da se mikromreža nalazi stacionarnom stanju. Efektivne vrednosti istih ovih odziva date su na Slici 4. Zbog ograničenja prostora, na slikama su dati samo odzivi struja. Rezultati dobijeni pomoću HIL okruženja, potvrdili su tačnost rezultata iz ADMS okruženja, te se eksperiment mogao nesmetano nastaviti.



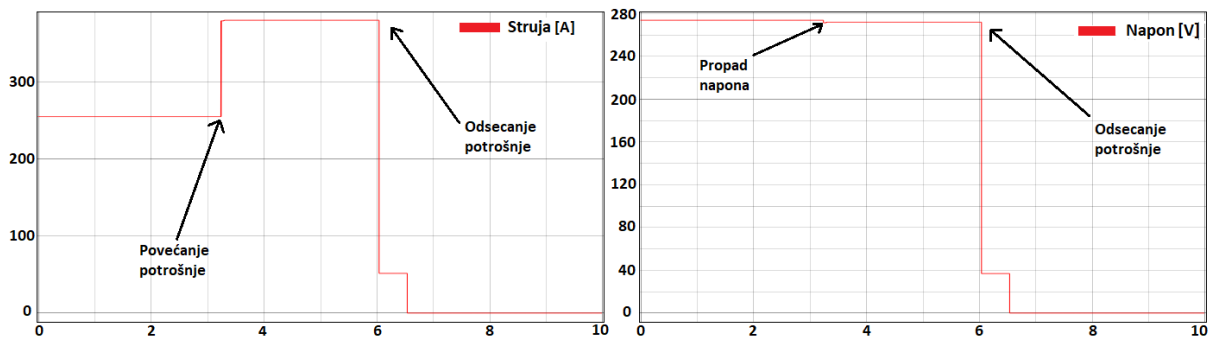
Slika 3 – Vremenski odzivi struja po granama u normalnom režimu

Signal Name	Cursor 1	Cursor 2	Delta	Min.	Max.	Abs.Max.	Mean	RMS
▼ Viewport 1								
Time	0.14185s	0.76185s	0.62					
Three-phase Meter1.IA	7.1509457	7.1509557		-7.2220674	7.222077	7.222077	-1.354e-07	5.077981
Three-phase Meter2.IA	3.6612039	3.6612022		-3.7702632	3.7702615	3.7702632	-8e-08	2.615207
Three-phase Meter3.IA	-10.317528	-10.317515		-10.340531	10.34053	10.340531	-1.674e-07	7.3046107
Three-phase Meter4.IA	1.8709301	1.8709303		-1.8737519	1.8737514	1.8737519	-5.91e-08	1.301533
Three-phase Meter5.IA	15.567142	15.567142		-15.574294	15.574294	15.574294	-2.46e-08	11.01267
Three-phase Meter6.IA	8.389716	8.389716		-8.39128	8.39128	8.39128	0.0	5.9335446
Three-phase Meter7.IA	5.5606494	5.56065		-5.5683193	5.5683193	5.5683193	-4.43e-08	3.9013371
▼ Viewport 2								
Time	0.14185s	0.76185s	0.62					
Three-phase Meter8.IA	-10.319337	-10.319339		-10.341742	10.341739	10.341742	-2.215e-07	7.30599
Three-phase Meter9.IA	41.52497	41.52498		-41.587276	41.587273	41.587276	-1.7523e-06	28.866514
Three-phase Meter10.IA	361.10324	361.1032		-361.26724	361.26724	361.26724	-4.725e-07	255.45412
Three-phase Meter11.IA	193.62997	193.62997		-193.66481	193.66481	193.66481	-8.663e-07	136.94177
Three-phase Meter12.IA	127.61842	127.61844		-127.79385	127.79385	127.79385	-5.907e-07	89.523674
Three-phase Meter13.IA	-86.701904	-86.701904		-86.70191	86.70191	86.70191	-9.057e-07	61.614536
Three-phase Meter14.IA	-66.71455	-66.71455		-66.714554	66.714554	66.714554	-1.575e-07	47.41048
▼ Viewport 3								
Time	0.14185s	0.76185s	0.62					
Three-phase Meter15.IA	97.46958	97.46958		-97.4902	97.4902	97.4902	0.0	68.9075
Three-phase Meter16.IA	97.46958	97.46958		-97.4902	97.4902	97.4902	0.0	68.9075
Three-phase Meter17.IA	96.81304	96.81304		-96.83045	96.83045	96.83045	-1.969e-07	68.46951
Three-phase Meter18.IA	96.81304	96.81304		-96.83045	96.83045	96.83045	-1.969e-07	68.46951
Three-phase Meter19.IA	97.154236	97.154236		-97.154236	97.154236	97.154236	3.94e-08	68.656044
Three-phase Meter20.IA	97.154236	97.154236		-97.154236	97.154236	97.154236	3.94e-08	68.656044
Three-phase Meter21.IA	-66.692406	-66.6924		-66.8796	66.8796	66.8796	1.969e-07	47.819332
▼ Viewport 4								
Time	0.14185s	0.76185s	0.62					
Three-phase Meter22.IA	226.00734	226.00734		-226.05516	226.05516	226.05516	-2.363e-07	159.77911
Three-phase Meter23.IA	226.00734	226.00734		-226.05516	226.05516	226.05516	-2.363e-07	159.77911
Three-phase Meter24.IA	224.485	224.485		-224.52536	224.52536	224.52536	3.15e-07	158.76349
Three-phase Meter25.IA	224.485	224.485		-224.52536	224.52536	224.52536	3.15e-07	158.76349
Three-phase Meter26.IA	225.27615	225.27615		-225.27615	225.27615	225.27615	-7.88e-08	159.19603
Three-phase Meter27.IA	225.27615	225.27615		-225.27615	225.27615	225.27615	-7.88e-08	159.19603
Load L1.IA	361.09933	361.09933		-361.26334	361.26334	361.26334	1.1026e-06	255.45135

Slika 4 – Efektivne vrednosti struja po granama u normalnom režimu

Na Slici 4 crvenom bojom je zaokružena vrednost struje po grani koja napaja potrošač L1. U okviru ovog eksperimenta, simulirano je iznenadno povećanje potrošnje pri čemu se za početne uslove uzimaju upravo vrednosti sa Slike 4. Dakle, po grani koja napaja potrošač L1 vrednost struje pre povećanja potrošnje iznosila je 255.45135 A.

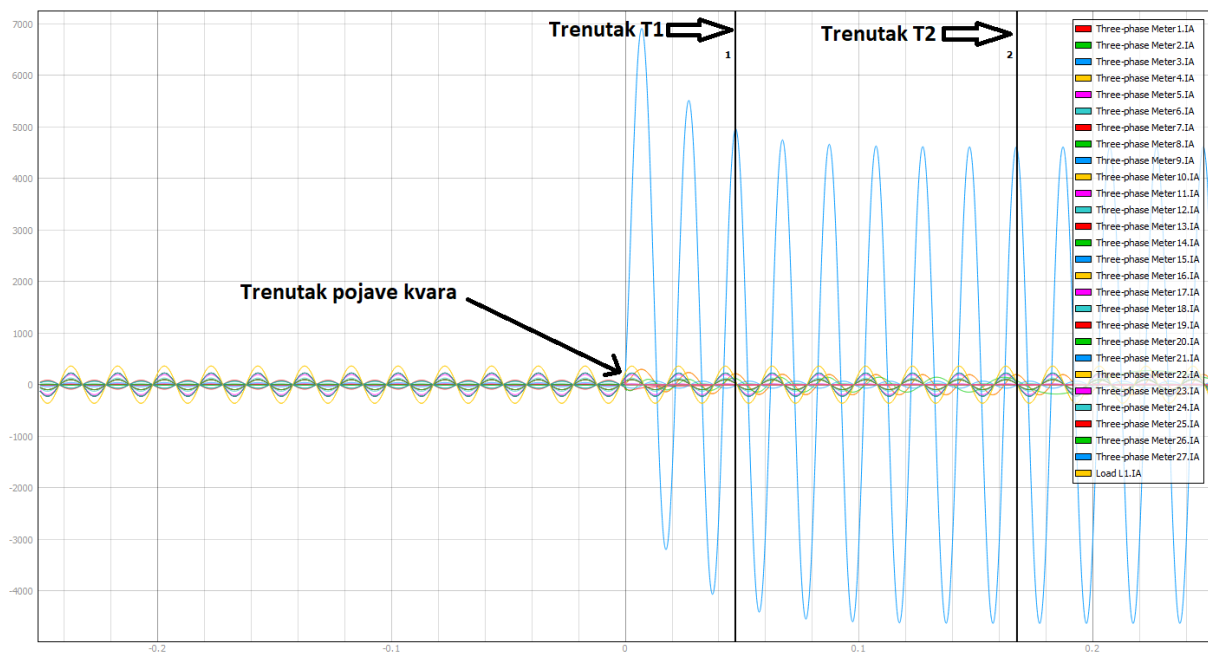
Na Slici 5, prikazane su vrednosti struje i napona na mestu priključenja potrošača L1 tokom simuliranog povećanja potrošnje, a zatim i odsecanja potrošnje pomoću aplikacije „Load Shedding“. Ova aplikacija je integrisana u ADMS kao deo DMS modula i deli iste servise i infrastrukturu sa ostalim ADMS aplikacijama. Takođe, aplikacija koristi uređaje pod SCADA kontrolom, da bi obezbedila koordinisan odgovor tokom scenarija u kojima je potrebno smanjiti opterećenje. Primarna funkcija aplikacije je da identifikuje prekidače koji treba da promene uklopno stanje da bi se postigli korisnički definisani zahtevi za smanjenje opterećenja. Odgovorna je za izdavanje komandi za otvaranje i zatvaranje ovih prekidača, kako bi se obezbedila precizna kontrola nad procesom odsecanja potrošnje. Simulator prekidača koji je povezan sa fizičkim opterećenjem kontrolisan je pomoću Siprotec 4 7SA6 uređaja. SCADA komunikacija između kontrolera i ADMS-a je omogućila da se fizičko opterećenje može priključiti/isključiti daljinski iz ADMS-a. Tokom eksperimenta simulirano je značajno preopterećenje (trenutak povećanja potrošnje sa Slike 5). Kao rezultat „Load Shedding“ aplikacije, pomenuti prekidač sa kontrolisanom SCADA tačkom bio je na listi kandidata za promenu uklopnog stanja. Kada je započeto izvođenje odsecanja potrošnje, prekidači su redom uklanjani sa liste kandidata da bi se postigao željeni nivo smanjenja opterećenja. U trenutku koji je na Slici 5 predstavljen kao trenutak odsecanja potrošnje, komanda za promenu uklopnog stanja iz „zatvoren“ u „otvoren“ je poslata uređaju Siprotec 4 7SA6 koji je poslao signal simulatoru prekidača (fizičkom uređaju) koji je promenio stanje iz zatvorenog u otvoreno i posledično, opterećenje je isključeno. Zbog toga se na Slici 5 može primetiti da u tom trenutku struja i napon padaju na nulu. Taj pad nije momentalni zbog pojave luka unutar prekidača nakon što polovi prekidača krenu da se otvaraju. Zbog toga se na slici 6 može primetiti da u šestoj sekundi ni napon ni struja ne padaju momentalno na nulu, nego se zadržavaju izvesno vreme na vrednosti različitoj od nule, a zatim nakon što se luk unutar komore prekidača ugasi, vrednost i struje i napona postaje jednaka nuli. Na ovaj način ostvaren je korisnički definisan zahtev za smanjenjem potrošnje.



Slika 5 – Vrednosti struje i napona na mestu priključenja potrošača L1 tokom povećanja i odsecanja potrošnje

2. Analiza raspodele struje kvara

Eksperiment za analizu raspodele struje kvara unutar CWRU mikromreže izveden je nad modelom iz HIL okruženja sa priključenim fizičkim inverterskim kontrolerom. Inverterski kontroler sa implementiranim LVRT i RCI kontrolnim strategijama iz nemačkog grid kod standarda priključen je u HIL uređaj i namapiran na kontrolne signale jedinice za skladištenje energije koja je priključena u čvor 14. Simulirano je pet metalnih kratkih spojeva u čvoru 9. Zbog ograničenja prostora, rezultati su predstavljeni samo za trofazni kratak spoj (3FKS). Rezultati za struje kvara u celoj mikromreži, za režim povezan na mrežu, u vremenskom domenu su prikazani na Slici 6, a njihove efektivne vrednosti su prikazane na Slici 7.



Slika 6 – Vremenski odzivi struja po granama u režimu sa kratkim spojem u čvoru 9

Signal Name	Cursor 1	Cursor 2	Delta	Min.	Max.	Abs.Max.	Mean	RMS
Time	0.04725s	0.16775s	0.1205					
Three-phase Meter1.IA	211.8268	192.72372		-195.03029	211.88052	211.88052	3.013639	138.70691
Three-phase Meter2.IA	-0.22313331	-1.6956309		-3.825396	3.820369	3.825396	0.0047583235	2.6242132
Three-phase Meter3.IA	-3.2592504	-4.053121		-11.050166	11.086612	11.086612	0.006303741	7.7293725
Three-phase Meter4.IA	212.62894	196.76396		-198.55275	212.84612	212.84612	3.001529	140.58176
Three-phase Meter5.IA	3.5730937	1.1658441		-15.522908	15.522877	15.522908	0.010422728	10.9548235
Three-phase Meter6.IA	2.014833	0.7184661		-8.373652	8.373634	8.373652	0.0059839273	5.9096866
Three-phase Meter7.IA	1.3298099	0.50865155		-5.5434895	5.543659	5.543659	0.004074185	3.877437
Three-phase Meter8.IA	-2.4511807	-1.7685496		-10.554234	10.556954	10.556954	-0.000670475	7.474234
Three-phase Meter9.IA	4960.913	4591.0615		-4632.6	4966.078	4966.078	70.03457	3280.0298
Three-phase Meter10.IA	82.9433	27.105556		-360.0735	360.0726	360.0735	0.24202542	254.11086
Three-phase Meter11.IA	46.583412	16.666363		-193.2574	193.25699	193.2574	0.13844576	136.39153
Three-phase Meter12.IA	30.59954	11.77069		-127.21948	127.223434	127.223434	0.09388737	88.97243
Three-phase Meter13.IA	-10.243688	-0.10155465		-10.243688	-0.101749256	10.243688	-2.2003157	3.37525
Three-phase Meter14.IA	122.51556	75.470665		-144.34857	144.43585	144.43585	4.361734	102.336716
Three-phase Meter15.IA	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Three-phase Meter16.IA	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Three-phase Meter17.IA	23.291285	8.333062		-96.626755	96.62654	96.626755	0.069220856	68.19439
Three-phase Meter18.IA	23.291285	8.333062		-96.626755	96.62654	96.626755	0.069220856	68.19439
Three-phase Meter19.IA	23.803066	8.833421		-96.951485	96.95129	96.951485	0.07146087	68.37997
Three-phase Meter20.IA	23.803066	8.833421		-96.951485	96.95129	96.951485	0.07146087	68.37997
Three-phase Meter21.IA	-16.958149	-5.8458934		-67.07425	67.07407	67.07425	-0.048846766	47.81926
Three-phase Meter22.IA	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Three-phase Meter23.IA	0.0	0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Three-phase Meter24.IA	54.006805	19.322468		-224.05304	224.05257	224.05304	0.16050392	158.12556
Three-phase Meter25.IA	54.006805	19.322468		-224.05304	224.05257	224.05304	0.16050392	158.12556
Three-phase Meter26.IA	55.193665	20.482847		-224.80602	224.80554	224.80602	0.16569956	158.5559
Three-phase Meter27.IA	55.193665	20.482847		-224.80602	224.80554	224.80602	0.16569956	158.5559
Load L1.IA	82.94241	27.105278		-360.0696	360.06873	360.0696	0.24202217	254.10814

Slika 7 – Efektivne vrednosti struja po granama u režimu sa kratkim spojem u čvoru 9

3. Analiza osetljivosti zaštite mikromreže

Strujni odziv u vremenskom domenu iz prethodnog eksperimenta generisan je u realnosti pomoću uređaja HIL Connect i poslat na relej sa kojim je HIL Connect prethodno povezan. Na taj način testirana je osetljivost zaštitnog uređaja na realne odzive struja kvara koji bi se desili u realnosti u CRWU mikromreži pri pojavi kratkog spoja u čvoru 9. S obzirom da je prekostrujna zaštita releja podešena na strujno nezavisnu karakteristiku sa podešenjima od 2200A i 0.2 s, a efektivna vrednost struje pri pojavi 3FKS iznosi 3280A u sve tri faze, kao što je prikazano na Slici 7, relej je reagovao. Ista procedura je ponovljena sa strujnim odzivima dobijenim u ostrvskom režimu rada, međutim, u ovom slučaju, relej nije reagovao, s obzirom da je efektivna vrednost struje 1219A u sve tri faze. Odnos vrednosti struja kvara u grani od interesa za povezani i ostrvski režim rada je $3280 \text{ A} / 1219 \text{ A} = 2.69$. Zbog toga, kada mikromreža pređe u ostrvski režim, struja kvara na početku izvoda je 2,69 puta manja nego u povezanom režimu. S obzirom da mikromreža može u bilo kom trenutku da pređe iz povezanog u ostrvski režim, neophodno je implementirati adaptivnu relejnu zaštitu. Implementacija adaptivne zaštite treba da obuhvati dva seta podešenja zaštite koja bi se menjala u zavisnosti od stanja glavnog prekidača mikromreže. Na primer, pri prelasku iz povezanog u ostrvski režim, treba da postane aktivno ono podešenje koje odgovara ostrvskom režimu rada.

ZAHVALNICA

Ovaj rad podržan je od strane Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Departmana za energetiku elektroniku i telekomunikacije, u okviru projekta pod nazivom „Unapređenje nastavnih i istraživačkih procesa primenom savremenih tehnoloških rešenja i metoda u energetici, elektronici i telekomunikacijama”.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljena Laboratorija za pametne mreže, razvijena na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu. Na osnovu detaljno prikazanih komponenti testnog okruženja, kao odabranih eksperimenata, jasno je da testno okruženje unutar Laboratorije pruža velike mogućnosti inženjerima, istraživačima, i studentima elektroenergetike da simuliraju mnoštvo različitih scenarija unutar realnih distributivnih mreža i mikromreža. Na taj način, otvaraju se mogućnosti razvoja novih algoritama i modela, koji će pomoći da se bolje razumeju, a zatim i efikasnije vode, optimizuju i štite nastupajuće distributivne mreže, sa velikom količinom obnovljivih izvora, električnih automobila, mikromreža, i drugih novih tehnologija. Kontinuirani razvoj i implementacija novih funkcionalnosti unutar laboratorijskog okruženja omogućava detaljno proučavanje i optimizaciju distributivnih i mikromreža, čime se postiže bolje razumevanje i upravljanje energetske resursima. Ova istraživanja ne samo da doprinose akademskom znanju, već imaju i značajan potencijal da unaprede industrijske prakse, povećavajući efikasnost i pouzdanost elektroenergetskih sistema. U budućnosti, Laboratorija bi trebala da nastavi sa širenjem svojih kapaciteta i daljim razvojem, kako bi se mogli simulirati još kompleksniji scenariji i tako dalje doprineti evoluciji pametnih mreža na globalnom nivou.

LITERATURA

- [1] C. Cecati, G. Mokryani, A. Piccolo and P. Siano, "An overview on the smart grid concept," *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, USA, 2010, pp. 3322-3327.
- [2] S. Paul, M. S. Rabbani, R. K. Kundu and S. M. R. Zaman, "A review of smart technology (Smart Grid) and its features," *2014 1st International Conference on Non Conventional Energy (ICONCE 2014)*, Kalyani, India, 2014, pp. 200-203, doi: 10.1109/ICONCE.2014.6808719.
- [3] M. L. Tuballa and M. L. Abundo, "A review of the development of Smart Grid technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59.
- [4] A. Mohd, E. Ortjohann, A. Schmelter, N. Hamsic and D. Morton, "Challenges in integrating distributed Energy storage systems into future smart grid," *2008 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Cambridge, UK, 2008, pp. 1627-1632.
- [5] A. Sajadi, L. Strezoski, V. Strezoski, M. Prica, and K. A. Loparo, "Integration of renewable energy systems and challenges for dynamics, control, and automation of electrical power systems," *WIREs Energy Environ.*, vol. 8, e321, 2019.
- [6] S. O. Muhanji, A. Muzhikyan and A. M. Farid, "Distributed Control for Distributed Energy Resources: Long-Term Challenges and Lessons Learned," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32737-32753, 2018.
- [7] L. Strezoski, H. Padullaparti, F. Ding and M. Baggu, "Integration of Utility Distributed Energy Resource Management System and Aggregators for Evolving Distribution System Operators," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 277-285, March 2022, doi: 10.35833/MPCE.2021.000667.
- [8] L. Strezoski, I. Stefani and B. Brbaklic, "Active Management of Distribution Systems with High Penetration of Distributed Energy Resources," *IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies*, Novi Sad, Serbia, 2019, pp. 1-5.
- [9] L. Strezoski and I. Stefani, "Utility DERMS for Active Management of Emerging Distribution Grids with High Penetration of Renewable DERs," *Electronics*, vol. 10, no. 16, p. 2027, 2021.
- [10] L. Strezoski, "Distributed energy resource management systems—DERMS: State of the art and how to move forward," *WIREs Energy and Environment*, vol. 12, no. 1, p. e460, 2023.
- [11] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei and S. Bahramirad, "State of the Art in Research on Microgrids: A Review," in *IEEE Access*, vol. 3.
- [12] A. Bose, P. Panciatici and X. Shan, "Guest Editorial: Special Section on Control Centers for the Evolving Power Grid: Architecture and Applications," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 1-2, March 2022.
- [13] S. Vadari, I. Džafić, D. Koch, R. Murphy, D. Hayes and T. Donlagic, "Distribution Control Centers in the US and Europe: Commonalities, Differences, and Lessons," in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 259-268, March 2022.

- [14] A. Pratt et al., "Using an Advanced Distribution Management System Test Bed to Evaluate the Impact of Model Quality on Volt/VAR Optimization," 2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Chicago, IL, USA, 2020, pp. 1-5.
- [15] S. Veda, H. Wu, M. Martin and M. Baggu, "Developing Use Cases for the Evaluation of ADMS Applications to Accelerate Technology Adoption," 2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), Denver, CO, USA, 2017, pp. 132-138.
- [16] "National Scada Test Bed: Fact Sheet," Available online: [Online]. Available: <https://www.energy.gov>. Accessed on 10 June 2023.
- [17] T. Patel, P. Gadde, S. Brahma, J. Hernandez-Alvidrez and M. J. Reno, "Real-time Microgrid Test Bed for Protection and Resiliency Studies," 2020 52nd North American Power Symposium (NAPS), Tempe, AZ.
- [18] V. K. Singh et al., "NEFTSec: Networked federation testbed for cyber-physical security of smart grid: Architecture, applications, and evaluation," IET Cyber-Phys. Syst., Theory Appl., vol. 7, no. 4.
- [19] L. Strezoski, N. Simic, and K. A. Loparo, "A Robust Short Circuit Calculation Methodology for Islanded, Grid-Connected, and Utility Microgrids," TechRxiv, Aug. 2023.
- [20] R. Singh, J. Reilly, A. Phan, E. Stein, D. Kotur, M. Petrovic, W. Allen, and M. Smith, "Microgrid Energy Management System Integration with Advanced Distribution Management System," United States, 2020.
- [21] L. Strezoski, I. Stefani, and D. Bekut, "Novel method for adaptive relay protection in distribution systems with electronically-coupled DERs," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 116.
- [22] H. Agharazi, M. D. Prica, and K. A. Loparo, "A Two-Level Model Predictive Control-Based Approach for Building Energy Management including Photovoltaics, Energy Storage, Solar Forecasting and Building Loads," Energies, vol. 15, no. 3521, 2022.
- [23] H. Agharazi, M. Prica, A. Mondal, Q. Fu, V. Bhavaraju, R. May, K. Fok, S. Dise, A. Swierc, and K. Loparo, "Installation and Testing of a Two-Level Model Predictive Control Building Energy Management System," IEEE Transactions on Control Systems Technology, pp. 1-14, 2023.
- [24] L. Strezoski, "Laboratorija Za Pametne Mreže u Svrhu Edukacije Inženjera Budućnosti", XXX Skup Trendovi Razvoja, Vrnjačka Banja, 7-10 Februar 2024.
- [25] L. Strezoski, N. Simic, K. Loparo, "Development and Implementation of a Smart Grid Laboratory Testbed: Exploring Academic, Research, and Industrial Applications", IEEE PES General Meeting, *Accepted for Publication*, July 2024.