

Matej Krpan
Zavod za visoki napon i energetiku
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu
matej.krpan@fer.hr

Igor Kuzle
Zavod za visoki napon i energetiku
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu
igor.kuzle@fer.hr

Mateo Beus
Zavod za visoki napon i energetiku
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Sveučilište u Zagrebu
mateo.beus@fer.hr

ISTRAŽIVANJE I RAZVOJ NAPREDNIH METODA ZA REGULACIJU ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA U LABORATORIJU ZA NAPREDNE ELEKTROENERGETSKE MREŽE

SAŽETAK

U radu su opisane aktivnosti vezane uz istraživanje i razvoj naprednih metoda za regulaciju elektroenergetskog sustava u Laboratoriju za napredne elektroenergetske mreže. Fokus rada je na rezultatima Horizon 2020 projekta „CROSSBOW“ u sklopu kojeg se vršila eksperimentalna validacija distribuiranog upravljanja spremnicima energije za regulaciju frekvencije unutar prijenosnog sustava i regulaciju napona unutar distribucijskog sustava. Nadalje, opisan je eksperimentalni *hardware-in-the-loop* postav koji se sastoji od digitalnog simulatora u stvarnom vremenu te šest baterijskih spremnika energije i hidroelektrane.

Ključne riječi: regulacija elektroenergetskog sustava, regulacija frekvencije, regulacija napona, *hardware-in-the-loop*, laboratorij za napredne elektroenergetske mreže, spremnici energije

RESEARCH & DEVELOPMENT OF ADVANCED POWER SYSTEM CONTROL METHODS IN THE SMART GRID LABORATORY

ABSTRACT

The paper describes research & development activities of advanced power system control methods in the Smart Grid Laboratory. The paper focuses on the results of Horizon 2020 project “CROSSBOW” in which the experimental validation of distributed control of energy storage was conducted. Distributed control was utilized for grid frequency control on the transmission system level and voltage control on distribution system level. Furthermore, the *hardware-in-the-loop* experimental setup is described which consists of a real-time digital simulator, six battery storage systems and a hydro turbine-generator.

Key words: power system control, frequency control, voltage control, *hardware-in-the-loop*, smart grid laboratory, energy storage

1. UVOD

Povećanje udjela promjenjivih, distribuiranih obnovljivih izvora energije (OIE) koji se priključuju preko energetske elektronike mijenjaju paradigmu modernog elektroenergetskog sustava (EES-a) [1]—očekuje se kako će novi elementi u sustavu poput baterijskih spremnika energije, električnih vozila i upravljive potrošnje igrati važnu ulogu u pogonu EES-a budućnosti: koristi spremnika energije i upravljive potrošnje prepoznati su i kroz znanstvene publikacije [2], [3] i kroz demonstracijske projekte [4], [5].

Posljedično, mnogo je truda uloženo u istraživanje i razvoj naprednih primjena (baterijskih) spremnika energije u pomoćnim uslugama EES-a koje su uglavnom fokusirane na regulaciju napona i frekvencije na različitim vremenskim skalama [6]–[10]. Većina današnjih znanstvenih radova temelji se na računalnim simulacijama koje se ne događaju u stvarnom vremenu što je i logično s obzirom na to da su i cijena i volumen energetskih uređaja značajni. Stoga je često nepraktično ili čak nemoguće imati u potpunosti realan laboratorijski postav za razvoj, pogotovo na akademskim institucijama.

S druge strane, sve su popularniji manji laboratorijski postavi koji se temelje na digitalnim simulatorima s hardverom u petlji (*hardware-in-the-loop*, HIL). HIL simulatori najčešće se koriste za brzo prototipiziranje regulatora bez potrebe za priključenjem regulatora na stvarni sustav, koji se umjesto toga simulira u realnom vremenu korištenjem vrlo detaljnih modela. Nadalje, HIL simulatori omogućuju i simulaciju na energetskoj razini (*power hardware-in-the-loop*), a ne samo na signalnoj. U takvim laboratorijskim postavima HIL simulatore često prate i niskonaponske AC, DC ili AC-DC mikromreže s različitim vrstama potrošača i proizvodnih jedinica [11]–[16]. Laboratorijske mikromreže daju veću težinu dobivenim rezultatima zato što su razvijene metode i tehnike ispitane u sustavu sa stvarnim komponentama umjesto samo na simuliranim, idealiziranim sustavima. Ovakvi laboratoriji se također koriste i za edukacijske svrhe [17][18] i pružaju studentima praktično iskustvo koje nadograđuje teorijsko znanje i računalne simulacije.

Ovaj rad opisuje laboratorijski postav revitaliziranog Laboratorija za napredne mreže (Smart Grid Laboratory, SGLab) [19] na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu koji se koristio za potrebe istraživanja i razvoja naprednih algoritama za distribuirano upravljanje spremnicima energije u svrhu regulacije napona i frekvencije u sklopu Horizon 2020 projekta „CROSSBOW“.

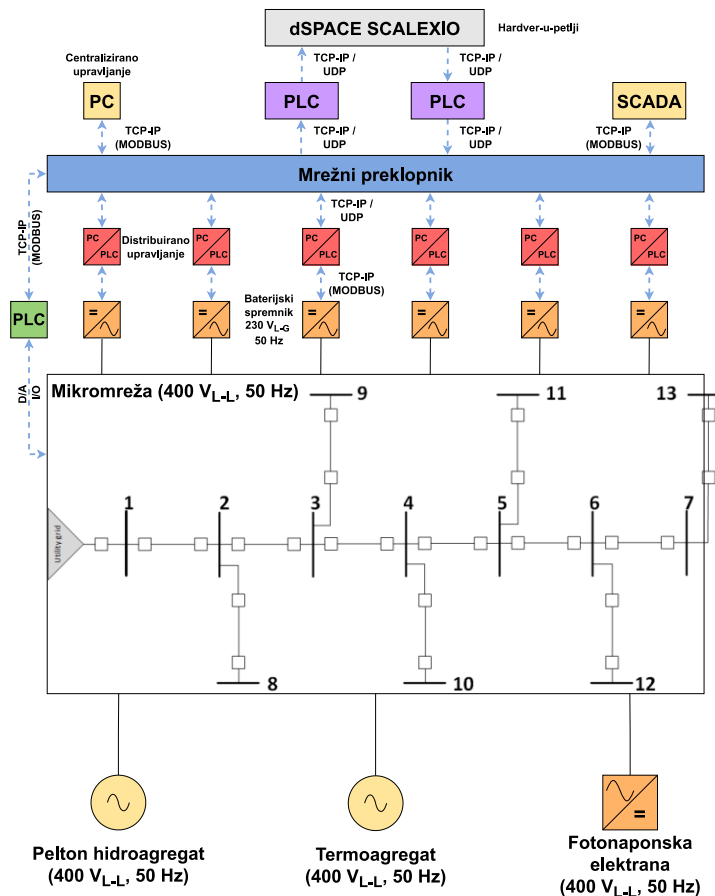
2. LABORATORIJSKI POSTAV U SGLAB-U ZA DISTRIBUIRANO UPRAVLJANJE SPREMNICIMA ENERGIJE

Slika 1 prikazuje modularni eksperimentalni postav u SGLab-u koji se sastoji od nekoliko podsustava koji su povezani u jednu kibernetičko-fizikalnu cjelinu.

2.1. Energetski podsustav

Središnji dio laboratorija čini niskonaponska mikromreža izmjenične struje (230/400 V AC) temeljena na CIGRE testnom modelu radijalnog distribucijskog izvoda s 13 čvorišta (Slika 1). Parametri vodova su promjenjivi te se mogu mijenjati između parametara CIGRE-ovog modela i parametara uobičajenog niskonaponskog izvoda u Hrvatskoj. Mikromreža je u potpunosti osmotriva kroz jednofazna i trofazna mjerenja struje, napona i snage na svakoj sabirnici i svakomvodu. Također su svi vodovi u potpunosti upravljivi te se mogu uklapati i isklapati po potrebi. Upravljanje je riješeno preko Siemensovog S7-1500 PLC-a s dodatnim modulima, a podaci s PLC-a agregiraju se u SCADA sustavu. SGLab mikromreža može raditi i paralelno s krutom mrežom i u otočnom pogonu, a u potonjem slučaju trofazni sinkroni generator nazivne snage 20 kVA, pogonjen Pelton hidroturbinom, formira napon i frekvenciju mikromreže. U postupku izgradnje je i dodatni sinkroni generator nazivne snage 15 kVA pogonjen elektromotorom promjenjive frekvencije. Na ovu mikromrežu može se priključiti i fotonaponska elektrana snage 80 kW koja se nalazi na krovu laboratorija.

Svaka od sabirnica 8–13 sa slike 1 ima tri trofazna priključka (ABC-N) koji omogućuju priključenje raznih AC uređaja jednofazno, dvofazno i trofazno. Ovo omogućuje istovremeni priključak 18 trofaznih uređaja istovremeno.



Slika 1. Eksperimentalni postav u SGLab-u za istraživanje i razvoj naprednih metoda regulacije EES-a

Za potrebe istraživanja i razvoja distribuiranog upravljanja spremnicima energije korišteno je 6 Varta Neo Pulse baterijskih spremnika nazivne snage i energije 2.5 kW / 6.5 kWh [20]. Svaki baterijski spremnik ima jednofazni priključak na mrežu (230 V) čime se može priključiti na bilo koju sabirnicu 8–13 (do maksimalno 6 baterija po sabirnici). Dodatno, pomoćni ormar omogućuje priključenje dvije baterije po fazi čime se svih 6 baterija može priključiti na neku sabirnicu jednim trofaznim energetskeim kabelom iskorištavajući tako samo jedno od 18 dostupnih priključaka.

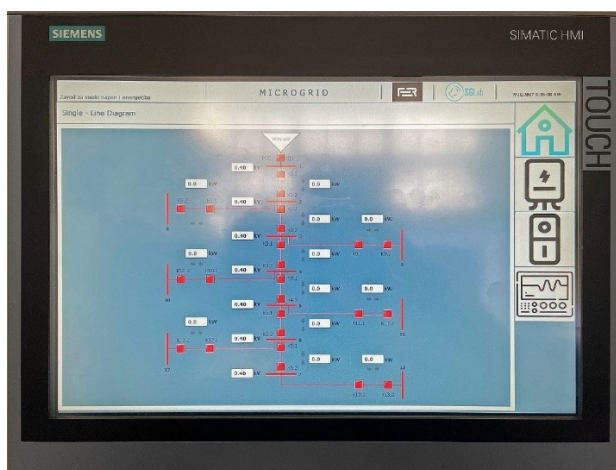
Slika 2 prikazuje šest Varta Neo Pulse spremnika u pozadini te hidroagregat u prednjem planu. Slika 3 prikazuje fotonaponsku elektranu na krovu SGLAB-a, dok Slika 4 prikazuje jednopolnu shemu mikromreže na dodirnom zaslonu upravljačkog ormara.



Slika 2. Varta Neo Pulse baterijski spremnici i hidroagregat s Pelton turbinom



Slika 3. 80 kW solarna elektrana na krovu SGLab-a



Slika 4. Jednopolna shema mikromreže na dodirnom zaslonu upravljačkog ormara

2.2. Komunikacijsko-upravljački sustav i HIL simulator

Središnji dio kibernetičkog dijela laboratorijskog postava je industrijski mrežni preklopnik preko kojeg je osigurana komunikacijska veza između svakog uređaja unutar SGLab-a. Svakom od 6 baterijskih spremnika dodijeljen je jedan programabilni logički kontroler (PLC) Siemens S7-1200 te jedno osobno računalo (PC) s programskim paketom MATLAB-Simulink (crveni blokovi na slici 1). Baterijskim spremnicima može se upravljati i preko PLC-ova i preko PC-jeva koristeći MODBUS TCP/IP protokol, a koristi li se PLC ili PC ovisi o vrsti upravljanja što je objašnjeno u sljedećem poglavlju. Preko MODBUS TCP/IP protokola mogu se ujedno i prikupljati mjerenja s baterijskih spremnika. Za potrebe distribuiranog upravljanja, PC-jevi i PLC-ovi mogu se međusobno izravno povezati (*peer-to-peer*) preko glavnog mrežnog preklopnika koristeći TCP/IP ili UDP protokol. S druge strane, centralizirano upravljanje omogućeno je kroz SCADA sustav SGLab-a ili pomoću dodatnog PC-ja (žuti blokovi na slici 1).

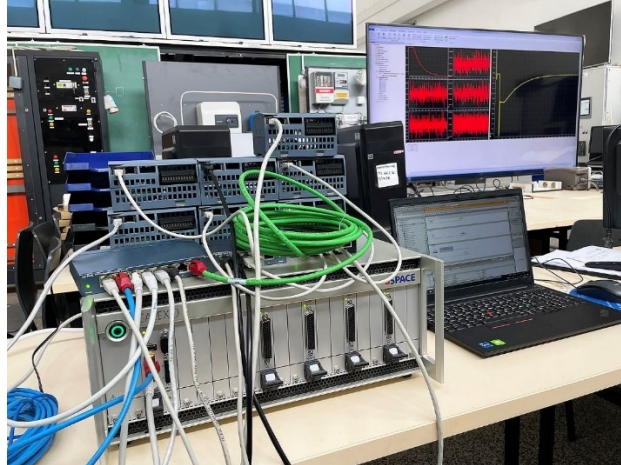
dSPACE SCALEXIO [21] digitalni simulator u stvarnom vremenu (sivi blok na slici 1) koristi se za simulacije s hardverom u petlji (HIL simulacije). Trenutni postav omogućuje jedino simulaciju na signalnoj razini (signali stvarnih mjerenja sa baterijskih spremnika šalju se u simulator preko TCP/IP ili UDP protokola umjesto injektiranja stvarnih strujnih i naponskih signala u simulator preko pojačala). Na SCALEXIO platformi simuliraju se detaljni proizvodnji modeli elektroenergetskog sustava.

Povezivanje SCALEXIO platforme s uređajima u mikromreži ostvareno je pomoću dva S7-1200 PLC-a (ljubičasti blokovi na slici 1). Jedan PLC skuplja mjerenja sa svih uređaja i propagira ih u simulator (i po potrebi skalira signale), dok drugi PLC „mjerenja“ iz simulatora propagira prema uređajima. Razlog zašto je ovaj postav izveden s dva PLC-a je zbog činjenice da je S7-1200 ograničen na 8 istovremeno

otvorenih komunikacijskih kanala, a slanje jednog signala i primanje jednog signala na 7 uređaja zahtijeva 14 komunikacijskih kanala.

Jedan primjer kako se opisani HIL postav može koristiti je u kontekstu ko-simulacije: stvarni uređaji priključeni su na laboratorijsku niskonaponsku mrežu koja emulira jedan izvod nekog distribucijskog sustava. Mjerenja s početka izvoda mogu se zatim u realnom vremenu injektirati u SCALEXIO simulator koji simulira proizvoljni prijenosni elektroenergetski sustav.

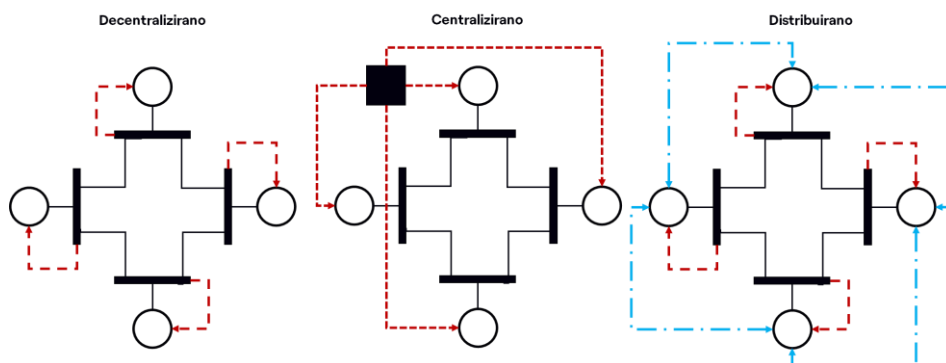
Slika 5 prikazuje šest S7-1200 PLC-ova koji se koriste za upravljanje baterijskim spremnicima, dSPACE SCALEXIO simulator te upravljački laptop kojim se pristupa PLC-ovima u stvarnom vremenu i na kojem je također dSPACE ControlDesk programski paket za akviziciju i vizualizaciju podataka sa simulatora u stvarnom vremenu (vidljivo na velikom zaslonu u pozadini slike 5).



Slika 5. dSPACE SCALEXIO simulator, S7-1200 PLC-ovi, upravljački laptop te vizualizacija mjerenja u pozadini

3. DISTRIBUIRANO UPRAVLJANJE SPREMNICIMA ENERGIJE ZA REGULACIJU FREKVENCIJE I NAPONA

U ovom poglavlju bit će predstavljeni neki rezultati projekta Horizon 2020 projekta CROSSBOW u kojem je Zavod za visoki napon i energetiku (ZVNE) FER-a u suradnji sa Sveučilištem u Manchesteru (The University of Manchester) radio validaciju algoritama distribuiranog upravljanja u SGLab-u koristeći opisani laboratorijski postav. Algoritme distribuiranog upravljanja za regulaciju frekvencije u prijenosnim mrežama i za regulaciju napona u radijalnim distribucijskim mrežama razvijali su partneri sa Sveučilišta u Manchesteru, dok je ZVNE bio zadužen za eksperimentalnu validaciju laboratoriju kako bi se postigao što veći TRL (*Technology Readiness Level*). Najviša razina je TRL 9 pri čemu se već radi o praktički komercijalnom proizvodu. U tom kontekstu postignut je TRL razine 4 što znači da je tehnološki koncept validiran u laboratoriju. Navedene aktivnosti vezane su uz radni paket 7 „Virtual Storage Plant (VSP)“ što je virtualna elektrana koja se sastoji od različitih spremnika energije kojima upravlja agregator na višoj, nadzornoj razini. Na nižoj razini upravljanja (upravljanje i aktuacija uređaja) koristilo se distribuirano upravljanje čiji je koncept ilustriran na slici 6.



Slika 6. Koncept decentraliziranog, centraliziranog i distribuiranog upravljanja

Decentralizirano upravljanje temelji se samo na lokalnim mjerenjima; primjer decentraliziranog upravljanja je primarna regulacija frekvencije u kojoj svaki agregat koji sudjeluje u primarnoj regulaciji određuje odstupanje vlastite brzine od nazivne i na temelju tog signala pogreške mijenja postavnu snagu agregata. Primjer centraliziranog upravljanja je sekundarna regulacija frekvencije u kojoj automatski sekundarni regulator u dispečerskom centru na temelju regulacijske pogreške šalje postavnu vrijednost svim agregatima koji u tom području sudjeluju u sekundarnoj regulaciji. Distribuirano upravljanje temelji se na lokalnim mjerenjima i na informacijama od susjednih uređaja. U slučaju potrebe za koordiniranim upravljanjem velikog broja uređaja, distribuirano upravljanje efikasnije je i skalabilnije u odnosu na centralizirano upravljanje [22] – [24]. Također, redundancija sustava distribuiranog upravljanja je veća. Međutim, takvi su sustavi osjetljiviji na kašnjenja u komunikaciji i kibernetičke napade.

Jedan primjer potencijalne primjene distribuiranog upravljanja u elektroenergetici u budućnosti, a ujedno i motivacija iza ovog istraživanja, je koordinirano upravljanje velikim brojem malih, distribuiranih spremnika energije. Na primjer, kućanstvo koje ima fotonaponske panele može imati i mali baterijski spremnik koji pomaže u iskorištenju električne energije. Međutim, jedan takav spremnik reda veličine nekoliko kW/kWh ne može pružati pomoćne usluge regulacije frekvencije jer su minimalni blokovi za nuditi takvu uslugu reda veličine MW/MWh [25] (pod pretpostavkom da postoji ekonomski poticaj malim korisnicima za pružanje takve usluge). S druge strane, kroz agregatora se tisuće takvih malih spremnika mogu agregirati u jedan virtualni spremnik i sudjelovati na tržištu pomoćnih usluga. Precizno upravljanje tisućama takvih uređaja u stvarnom vremenu s centralnog mjesta možda neće biti računarski izvedivo jer zahtijeva značajan broj istovremenih komunikacijskih kanala prema svakom uređaju. Distribuirano upravljanje omogućuje da svi uređaji postignu zadani konsenzus (npr. promjena ukupne radne snage) povezivanjem svakog uređaja s manjim brojem susjeda, kao i povezivanje centralnog sustava agregatora s manjim brojem uređaja čime se značajno smanjuje broj komunikacijskih kanala i računaska zahtjevnost.

Prema dostupnoj literaturi, prednosti distribuiranog upravljanja dolaze do izražaja tek pri velikom broju jedinica (stotine, tisuće) kojima je potrebno koordinirano upravljati. Centralizirano upravljanje je svakako prihvatljivo i jednostavno za izvesti u slučaju manjeg broja jedinica (npr. upravljanje manjim brojem distribuiranih baterijskih spremnika unutar nekog SN izvoda u distribucijskoj mreži). Isto tako, centralizirano upravljanje manjim brojem grupa spremnika je također prihvatljivo rješenje, dok se upravljanje jedinicama unutar neke grupe može razlikovati između grupa, ovisno o broju jedinica i složenosti upravljanja. Glavna misao nije ta da je distribuirano upravljanje superiorno u svakom pogledu, nego da je to alternativni način upravljanja koji je pogodniji za implementaciju pod određenim uvjetima.

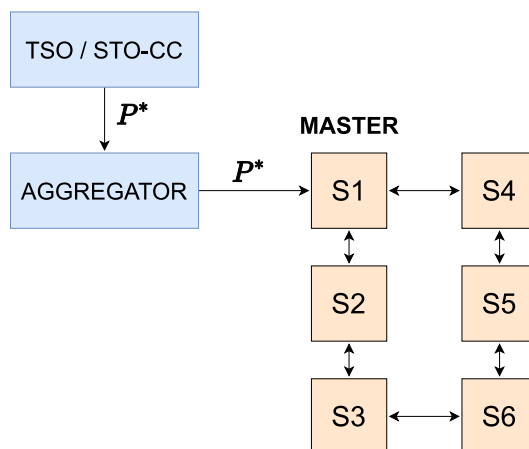
3.1. Distribuirano upravljanje spremnicima energije za regulaciju frekvencije u prijenosnim mrežama

U sklopu aktivnosti projekta CROSSBOW, vršila se validacija distribuiranog upravljanja spremnicima energije za sekundarnu i tercijarnu regulaciju frekvencije. Upravljački algoritmi izvedeni su na S7-1200 PLC-ovima za svaki spremnik. HIL simulacija izvodila se na IEEE testnom sustavu s 9 sabirnica (*IEEE 9-bus*). Sekundarna regulacija (aFRP) i tercijarna (mFRP) promatrale su se s dva aspekta: prvi aspekt gleda vrijeme aktivacije cjelokupne sekundarne (aFRR) i tercijarne (mFRR) rezerve koje iznose 7.5 min prema ENTSO-E (smanjit će se na 5 minuta u budućnosti) [26], odnosno 12.5 min [27].

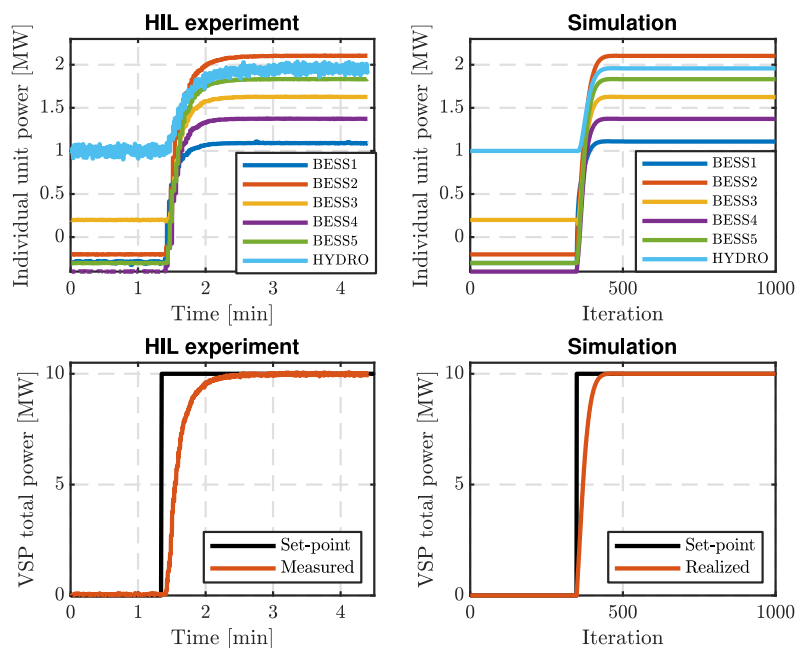
Slika 7 prikazuje dijagram aktivacije sekundarne i tercijarne rezerve: agregator dobiva nalog od operatora sustava ili koordinacijskog centra za upravljanje spremnicima energija (STO-CC je još jedan od proizvođača projekta „CROSSBOW“) za promjenom snage P^* . Agregator tu informaciju propagira jednoj od jedinica u portfelju koja je označena kao *master*. Jedinice unutar portfelja međusobno su komunikacijski povezane u strukturu tipa prsten u kojoj svaka jedinica komunicira sa susjedne dvije jedinice. Svakoj jedinici je pridružen proizvoljni trošak aktivacije tako da one jedinice koje su skuplje aktiviraju manje rezerve, dok one koje su jeftinije aktiviraju više rezerve. Jedinice međusobnom komunikacijom postižu konsenzus pri kojem se aktivira zadana ukupna snaga.

Slika 8 prikazuje aktivaciju $P^* = 10$ MW rezerve virtualne elektrane koja se sastoji od pet baterijskih spremnika i hidroelektrane. Donja lijeva slika prikazuje ukupnu izmjerenu snagu agregiranih jedinica te se jasno vidi kako je vrijeme aktivacije približno jednu minutu što je dovoljno brzo i za sekundarnu i tercijarnu regulaciju. Na gornjoj lijevoj slici vide se snage pojedinačnih jedinica u kojima je aktivirana snaga obrnuto proporcionalna zadanom trošku pojedine jedinice. Donja desna i gornja desna

slika prikazuju idealnu simulaciju distribuiranog upravljanja za istu snagu aktivacije. S obzirom da se simulacija izvrši gotovo trenutačno i nema dinamike pojedinih uređaja, x-os je zadana u broju iteracija do konsenzusa umjesto u vremenu.



Slika 7. Aktivacija sekundarne i tercijarne rezerve



Slika 8. Aktivacija 10 MW sekundarne/tercijarne rezerve (lijevo — eksperiment, desno—simulacija)

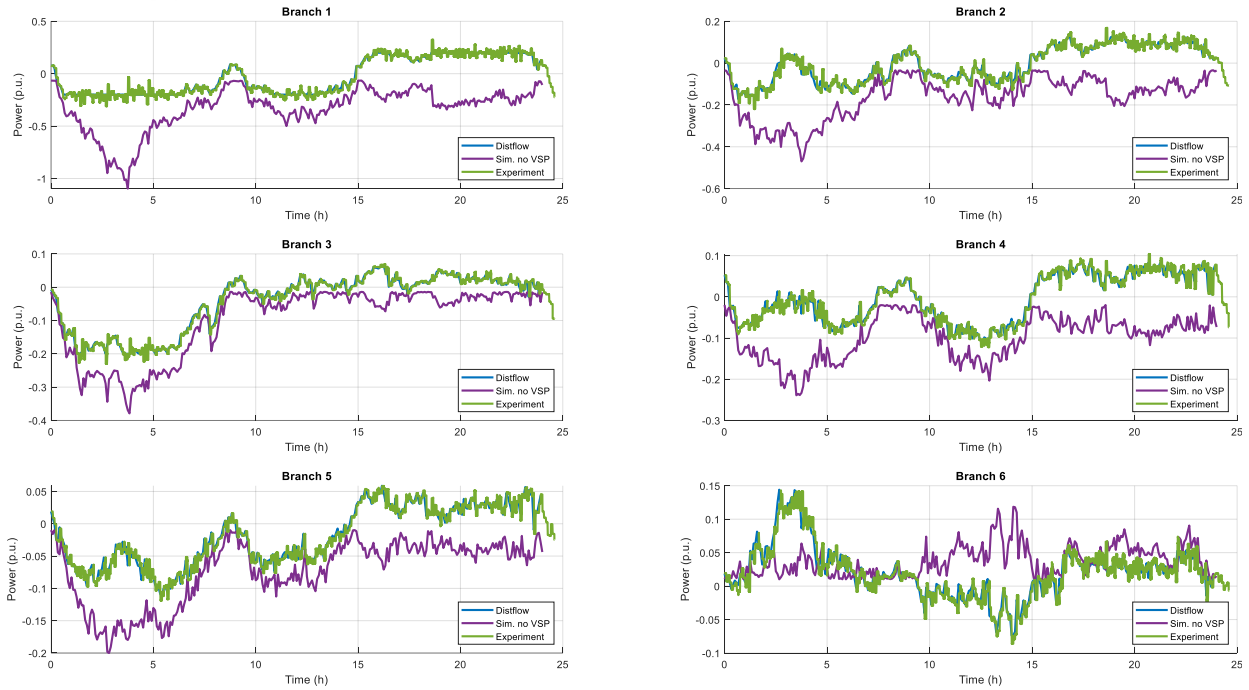
3.2. Distribuirano upravljanje spremnicima energije za regulaciju napona i zagušenja u prijenosnim mrežama

U sklopu projekta „CROSSBOW“ validirano je i distribuirano upravljanje spremnicima energije za regulaciju napona i zagušenja u radijalnim distribucijskim mrežama. U upravljačkom algoritmu pretpostavka je da je poznata topologija mreže i parametri vodova, što je poznato jedino operatoru distribucijskog sustava. U optimizacijskom problemu koristi se linearizirani model mreže (Distflow) te ograničenja na tokove snaga po vodovima i ograničenja napona čvorišta. S obzirom da je potrebno vršiti optimizaciju korištenjem dediceranih solvera, upravljački algoritmi za svaku jedinicu implementirani u MATLAB-u na dediceranom računalu koje onda propagira postavne vrijednosti prema spremnicima energije. Korišteno je šest baterijskih spremnika za ove eksperimente.

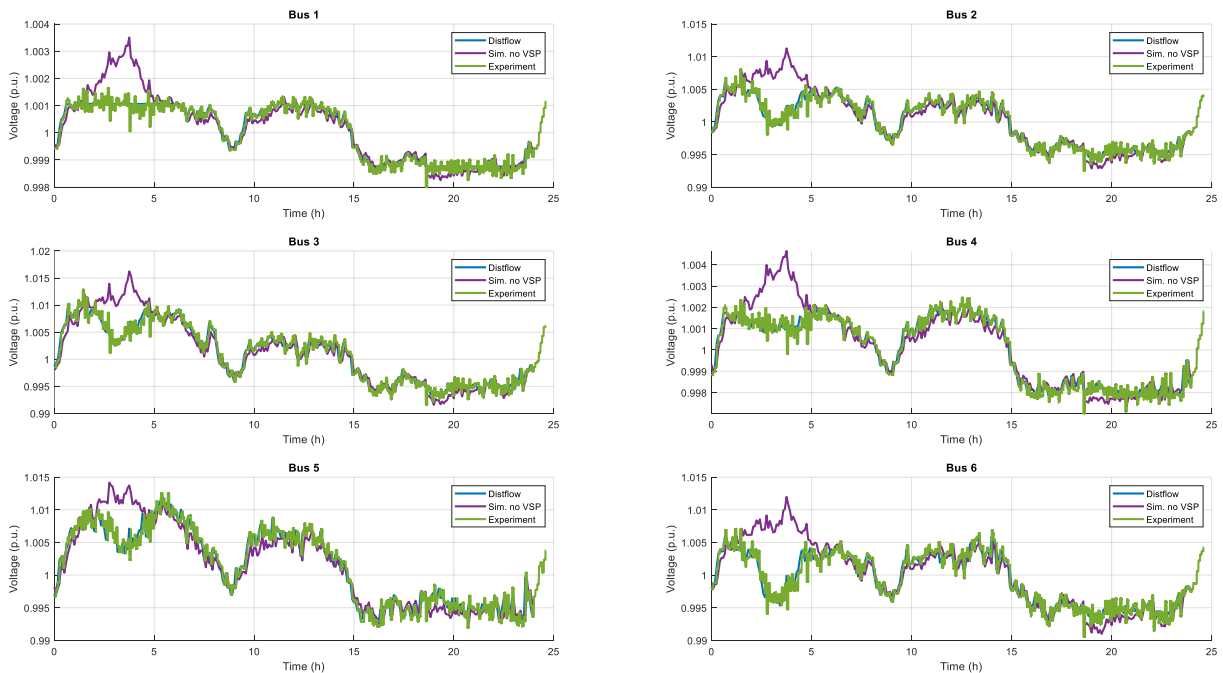
Slika 9 (tokovi snaga po vodovima) i Slika 10 (naponi čvorišta) prikazuju rezultate eksperimentalne validacije. U algoritmima distribuiranog upravljanja tokovi snaga po vodovima ograničeni su na ± 0.3 p.u.,

dok su naponi ograničeni u rasponu (0.99, 1.01) p.u. Eksperiment se izvršavao 24 h u stvarnom vremenu emulirajući jedan cijeli dan rada na srednjenaponskom izvodu unutar distribucijske mreže. Na slici 9 vidljivo je da su tokovi snaga kroz grane 1, 2 i 3 izvan dozvoljenih granica (± 0.3 p.u.) u nekim vremenskim intervalima za slučaj kada nema upravljanja naponima u mreži (ljubičasta krivulja). S uključenim distribuiranim upravljanjem (zelena krivulja), svi tokovi snaga su unutar zadanog raspona te se vidi kako eksperiment u laboratoriju precizno prati simulaciju (plava krivulja ispod zelene krivulje).

Na slici 10, čvorišta na kojima se pojavljuju iznosi napona izvan zadanih granica su čvorišta 2, 5 i 6 (ljubičasta krivulja). S uključenim distribuiranim upravljanjem (zelena krivulja), svi naponi su unutar zadanog raspona te se vidi kako eksperiment u laboratoriju precizno prati simulaciju (plava krivulja ispod zelene krivulje).



Slika 9. Tokovi snaga po granama



Slika 10. Iznosi napona po čvorištima

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan laboratorijski postav Smart Grid Lab-a na Fakultetu elektrotehnike i računarstva koji se koristio za istraživanje i validaciju distribuiranog upravljanja spremnicima energije za regulaciju frekvencije unutar prijenosnog sustava, te za regulaciju napona i zagušenja unutar distribucijskog sustava. Očekivani rezultati dobiveni idealnim simulacijama uspješno su eksperimentalno validirani u laboratoriju koristeći laboratorijsku virtualnu elektranu koja se sastoji od stvarnih uređaja i HIL simulator s detaljnim testnim modelima elektroenergetskog sustava. Distribuirano upravljanje pogodno je u slučaju kada je potrebno koordinirano upravljati velikim brojem jedinica jer se smanjuje računski zahtjevnost jer umjesto da jedno centralno mjesto barata s velikim brojem podataka i komunikacijskih kanala u realnom vremenu, svaka jedinica barata s malim brojem kanala i podataka. Buduća istraživanja bit će fokusirana na *plug & play* mogućnosti jedinica unutar virtualne elektrane te osiguravanja redundancije u slučaju ispada neke jedinice.

LITERATURA

- [1] N. Holjevac, T. Baškarad, J. Đaković, M. Krpan, M. Zidar, I. Kuzle: Challenges of High Renewable Energy Sources Integration in Power Systems—The Case of Croatia, *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 1047, 2021.
- [2] M. Miletić, Z. Luburić, I. Pavić, T. Capuder, H. Pandžić, I. Andročec, A. Marušić: A review of energy storage systems applications, IET Conference Proceedings, pp. 1–6, 2018.
- [3] M. Krpan, I. Kuzle, A. Radovanovic, J. V. Milanovic: Modelling of Supercapacitor Banks for Power System Dynamics Studies, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 5, pp. 3987–3996, 2021.
- [4] Z. Luburić, T. Tadin, A. Andrić, J. Ponoćko, M. Wang, J. V. Milanović, O. Škrba, B. Rebić: Provision of the experiments by coordination of demand side response units in the region of Southeast Europe within the CROSSBOW project - HOPS case, HRO-CIGRE 14th (online) Symposium on Power System Management, 2020, pp. 1–10.
- [5] Powersystems UK, National Grid ESO debuts new fast frequency service, 2020, [Mrežno, dostupno]: <https://www.powersystemsuk.co.uk/news/national-grid-eso-launches-fast-frequency-response-service>
- [6] M. Beus, M. Krpan, I. Kuzle, H. Pandžić, A. Parisio: A Model Predictive Control Approach to Operation Optimization of an Ultracapacitor Bank for Frequency Control, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 36, no. 3, pp. 1743–1755, 2021.
- [7] A. Adrees, J. Song, J. V. Milanović: The influence of different storage technologies on large power system frequency response, 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia), 2016, pp. 257-263.
- [8] L. Wang, F. Bai, R. Yan, T. K. Saha: Real-Time Coordinated Voltage Control of PV Inverters and Energy Storage for Weak Networks With High PV Penetration, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 3383-3395, May 2018.
- [9] I. Pavić, T. Capuder, I. Kuzle, Generation scheduling in power systems with high penetration of renewable energy, *Journal of Energy*, vol. 66 (2017), p. 150–164.
- [10] D. Badanjak, H. Pandžić: Battery Storage Participation in Reactive and Proactive Distribution-Level Flexibility Markets, *IEEE Access*, vol. 9, pp. 122322-122334, 2021.
- [11] T. Logenthiran, D. Srinivasan, A. M. Khambadkone, H. N. Aug: Multiagent System for Real-Time Operation of a Microgrid in Real-Time Digital Simulator, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 2, pp. 925-933, 2012.
- [12] Y. Du, H. Tu, S. Lukic, D. Lubkeman, A. Dubey, G. Karsai: Development of a Controller Hardware-in-the-Loop Platform for Microgrid Distributed Control Applications, 2018 IEEE Electronic Power Grid (eGrid), 2018, pp. 1-6.
- [13] N. Lidula, A. Rajapakse: Microgrids research: A review of experimental microgrids and test systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 186–202, 2011.
- [14] N. S. Coleman et al.: Hardware setup of a solar microgrid laboratory, 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2017, pp. 1-5.

- [15] I. Szeidert, I. Filip, O. Prostean, C. Vasar: Laboratory setup for microgrid study, 2016 IEEE 20th Jubilee International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES), 2016, pp. 289-292.
- [16] S. N. Bhaskara, M. Rasheduzzaman, B. H. Chowdhury: Laboratory-based microgrid setup for validating frequency and voltage control in islanded and grid-connected modes, 2012 IEEE Green Technologies Conference, 2012, pp. 1–6.
- [17] B. Hoff, W. Sulkowski: Low power laboratory setup for education in power electronic based microgrids, 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2013, pp. 1-10.
- [18] C. Patrascu, N. Muntean, O. Cornea, A. Hedes: Microgrid laboratory for educational and research purposes, 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016, pp. 1-6.
- [19] Smart Grid Laboratory, [Mrežno, dostupno]: <https://sglab.fer.hr>
- [20] VARTA: Varta pulse – datasheet, 2020, tehnička dokumentacija.
- [21] dSPACE: dSPACE SCALEXIO real-time simulator, [Mrežno, dostupno]: https://www.dspace.com/en/lt/home/products/hw/simulator_hardware/scalexio.cfm
- [22] F. Dörfler, S. Bolognani, J. W. Simpson-Porco, S. Grammatico: Distributed control and optimization for autonomous power grids, 2019 18th European Control Conference (ECC), 2019, pp. 2436–2453.
- [23] D. K. Molzahn et al.: A Survey of Distributed Optimization and Control Algorithms for Electric Power Systems, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2941-2962, 2017.
- [24] T. Morstyn, B. Hredzak, V. G. Agelidis: Control Strategies for Microgrids With Distributed Energy Storage Systems: An Overview, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3652-3666, 2018.
- [25] ENTSO-E: 1. Product information on FCR, [Mrežno, dostupno]: https://www.entsoe.eu/network_codes/eb/fcr/
- [26] ENTSO-E, “Explanatory Document to All TSOs’ proposal for the implementation framework for a European platform for the exchange of balancing energy from frequency restoration reserves with automatic activation in accordance with Article 21 of Commission Regulation (EU) 2017/2195 of 23 November 2017 establishing a guideline on electricity balancing,” ENTSO-E, Tech. Rep., 2018.
- [27] ENTSO-E, “All TSOs’ proposal for the implementation framework for a European platform for the exchange of balancing energy from frequency restoration reserves with manual activation in accordance with Article 20 of Commission Regulation (EU) 2017/2195 establishing a guideline on electricity balancing,” ENTSO-E, Tech. Rep., 2018.