

Igor Kuzle
Kristina Jurković
Hrvoje Pandžić

Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
{igor.kuzle, kristina.jurkovic, hrvoje.pandzic} @ fer.hr

RAZVOJ LABORATORIJA ZA ELEKTRIČNA POSTROJENJA

SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada opisane su komponente Laboratorija za električna postrojenja na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu te vježbe koje se izvode u sklopu nastave i istraživanja. Model elektroenergetskog sustava u laboratoriju odgovara hrvatskom elektroenergetskom sustavu i izrazito je koristan u osposobljavanju studenata za njihov budući rad, a sadržaj laboratorijskih vježbi prilagođen je potrebama industrijskih subjekata.

Obnovljivi izvori energije zbog svoje varijabilnosti i stohastičke prirode proizvodnje uzrokuju promjene u upravljanju elektroenergetskim sustavom, a sve više se povećava i broj električnih vozila kao posebne vrste trošila. Osim navedenog, u svijetu se značajni naponi usmjeravaju na povećanje fleksibilnosti elektroenergetskog sustava te se, uz distribuiranu proizvodnju i spremnike energije, sve više razvijaju i mikromreže koje uključuju i napredna trošila. Kako bismo našim studentima osigurali znanja iz naprednih tehnologija koje su sve prisutnije u elektroenergetskom sustavu, odlučili smo rekonstruirati postojeći laboratorij te ga pretvoriti u Laboratorij za napredne elektroenergetske mreže (Smart Grid Lab). Predviđeno je da se uz postojeću AC mikromrežu izgradi i DC mikromreža, koja će uključivati različite obnovljive izvore energije i spremnike energije, posebne baterijske spremnike koji se koriste u električnim automobilima, različita napredna trošila te AC/DC pretvarače i DC/AC izmjenjivače kojima će se omogućiti povezivanje AC i DC mikromreža. U radu su opisane nove komponente AC i DC mikromreža, kao i koncept budućeg laboratorija koji će omogućiti dodatna ispitivanja i istraživanja te pridonijeti izobrazbi studenata i mladih istraživača.

Ključne riječi: laboratorij za napredne elektroenergetske mreže, mikromreže, obnovljivi izvori energije, spremnici energije, električna vozila, napredna trošila, obrazovanje

DEVELOPMENT OF THE POWER SYSTEM SIMULATIONS LABORATORY

SUMMARY

This paper describes components of the Power System Simulations Laboratory at the University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing, along with the exercises that students and researchers are able to perform. The miniature electric power system in the Laboratory represents Croatian electric power system. This is a useful way to train students for their future work in the industry. The exercises are designed to emulate specific issues of the Croatian power system.

The output of the renewable energy sources is variable and of stochastic nature, which requires changes in the current practices of the power system operation. On the other hand, growing environmental awareness and strong political impetus have promoted plug-in hybrid vehicles as an attractive means of transportation. Many researchers are investigating the problem of increasing the flexibility of electric power systems. Along with the distributed multi-generation units and energy storage, microgrids are being developed at a fast pace, including demand-responsive loads. In order to provide the students with the necessary knowledge of advanced and smart technologies, we

decided to modernize the current laboratory and transform it into Smart Grid Laboratory (SGLab). Along with the existing AC microgrid, a new DC microgrid is being developed. It will comprise different renewable energy sources and energy storage, batteries types being used to run electric vehicles, different demand-responsive loads, as well as AC/DC converters and DC/AC inverters to allow interaction between the AC and DC microgrids. The paper will also describe new components of these microgrids, as well as the new laboratory concept that will allow additional testing and contribute to the improved and modern education of students and researchers.

Key words: smart grid laboratory, microgrids, renewable energy sources, energy storage, electric vehicles, demand-responsive loads, education

1. UVOD

Laboratorij za električna postrojenja osnovan je 60-ih godina prošlog stoljeća kako bi se studentima pružio uvid u praktične primjene naučenih teorijskih znanja što bi u stvarnom elektroenergetskom sustavu bilo preskupo ili čak nemoguće za izvesti [1]. Laboratorij je osmišljen kao približna reprezentacija hrvatskog elektroenergetskog sustava s modelima termoelektrane i hidroelektrane (podjednake snage), radnih, induktivnih i kapacitivnih opterećenja te modela prijenosne mreže.

Udjel obnovljivih izvora energije (OIE), posebice vjetroelektrana, u elektroenergetskim sustavima (EES) u svijetu vrlo se brzo povećava posljednjih godina, a taj trend se očekuje i u budućnosti. S obzirom na tu činjenicu u planu je laboratorij modernizirati te vjerno prikazati sve veću penetraciju obnovljivih izvora u sustav kao i distribuirane proizvodnje [2]. U Hrvatskoj gotovo sav instalirani kapacitet obnovljivih izvora predstavljaju vjetroelektrane. Do 2015. godine instalirano je gotovo 300 MW. Proizvodnja u vjetroelektranama iznosila je 329 GWh, odnosno oko 2,61%, dok su termoelektrane proizvodile 39,93%, a hidroelektrane 36,44%. Sustavi fotonaponskih solarnih panela doprinosili su sa svega 2 GWh.

S obzirom na stohastičku prirodu proizvodnje električne energije iz OIE vrlo je teško planirati njihovu proizvodnju što operatorima sustava značajno otežava vođenje sustava. Visoki stupanj penetracije OIE čija proizvodnja varira uzrokuje promjene dinamike pogona EES-a što može dovesti do značajnih poremećaja koji za posljedicu mogu imati ispadne iz pogona dijelova EES [3]. Uz povećanje nesigurnosti proizvodnje, očekivan je porast nesigurnosti potrošnje zbog sve većeg broja električnih vozila u sustavu. Značajni naponi usmjeravaju se na povećanje fleksibilnosti elektroenergetskog sustava kako bi sustav bio u stanju prihvatiti velike količine OIE.

Kako bi se moglo kvalitetno laboratorijski istraživati navedene probleme u laboratorij će se ugraditi napredne tehnologije kako bi se realizirala napredna elektroenergetska mreža (engl. smart grid). Uz postojeću izmjeničnu mikromrežu izgraditi će se istosmjerna mikromreža koja će obuhvaćati obnovljive izvore energije, distribuiranu proizvodnju, spremnike energije i napredna trošila (koja će uključivati i električna vozila). Mikromreže će biti povezane AC/DC pretvaračima i DC/AC izmjenjivačima kako bi se energija mogla prenositi iz jedne mikromreže u drugu u ovisnosti o zahtjevima vođenja predmetnog sustava te će biti moguće njegov rad pri povećanim uvjetima nesigurnosti kao i simulacija različitih poremećaja. Opisanim nadogradnjama postojeći laboratorij će se pretvoriti u Laboratorij za napredne elektroenergetske mreže (SGLab).

2. LABORATORIJ ZA ELEKTRIČNA POSTROJENJA

2.1. Izgled laboratorija

Laboratorij za električna postrojenja zauzima prostor od 200 m² i smješten je u prizemlju Fakulteta elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu. Izgrađen je 60-ih godina prošlog stoljeća.

Laboratorij za električna postrojenja zamišljen je kao minijturni elektroenergetski sustav koji je približan model hrvatski elektroenergetski sustav. Hrvatski elektroenergetski sustav većinom čine hidroelektrane (2,141 GW) i termoelektrane (1,893 GW) uz hrvatski udio zajedničke nuklearne elektrane Slovenije i Hrvatske (344 MW). U laboratoriju se nalazi model elektroenergetskog sustava sa 7 čvorišta i 11 vodova sa sustavom upravljanja, s mini hidroelektranom (20 kVA, cos fi 0,5), modelnom termoelektranom (15 kVA, cos fi 0,86), modelnom mini kogeneracijskom elektranom (1,5 kVA, cos fi 0,8) kW i modelnom mikro hidroelektranom s asinkronim generatorom (0,2 kVA).

Primarnu opremu modela termoelektrane E1 (Slika 1) čine istosmjerni motor koji simulira parnu turbinu, sinkroni generator, generatorske sabirnice, prekidači i rastavljači, a opremljena je

sekundarnom opremom u vidu mjernih transformatora, zaštitnih releja (Iskra) i upravljačkog sustava. Uključen je i mrežni sinkroskop. U nastavku su navedeni parametri generatora termoelektrane (Tablica) i parametri pogonskog stroja (Tablica).

Tablica I. Parametri generatora termoelektrane

| | |
|------------------|------------|
| S_n | 15 kVA |
| U_n | 380 V |
| $\cos \varphi_n$ | 0,86 |
| n_n | 1000 o/min |
| x_d | 0,363 |
| x_d' | 0,27 |
| x_d'' | 0,042 |

Tablica II. Parametri pogonskog stroja termoelektrane

| | |
|------------------|------------|
| P_n | 14 kW |
| U_n | 220 V |
| $\cos \varphi_n$ | 0,86 |
| n_n | 1000 o/min |

Druga elektrana sa slike 1 predstavlja model hidroelektrane E2 s Pelton turbinom nazivnog protoka 27 l/s. U podrumu ispod laboratorija nalazi se rezervoar sa 7000 litara vode iz kojeg se voda pumpa pod tlakom od 7 bara, na taj način simulirajući pad veličine 70 m. Što se tiče primarne i sekundarne opreme, hidroelektrana je opremljena slično termoelektrani. Zaštita je izvedena „Brown Boveri“ relejima. Agregat je opskrbljen turbinskim regulatorom brzine vrtnje, a regulacija se provodi otklanjačem mlaza kako bi se osigurao konstantan protok u krugu centrifugalna pumpa – turbina – rezervoar. Parametri generatora hidroelektrane navedeni su u Tablica . Uz modelnu hidroelektranu ugrađen je i frekvencijski regulator kojim se može simulirati njihanje vode u dovodnom sustavu elektrane.

Tablica III. Parametri generatora hidroelektrane

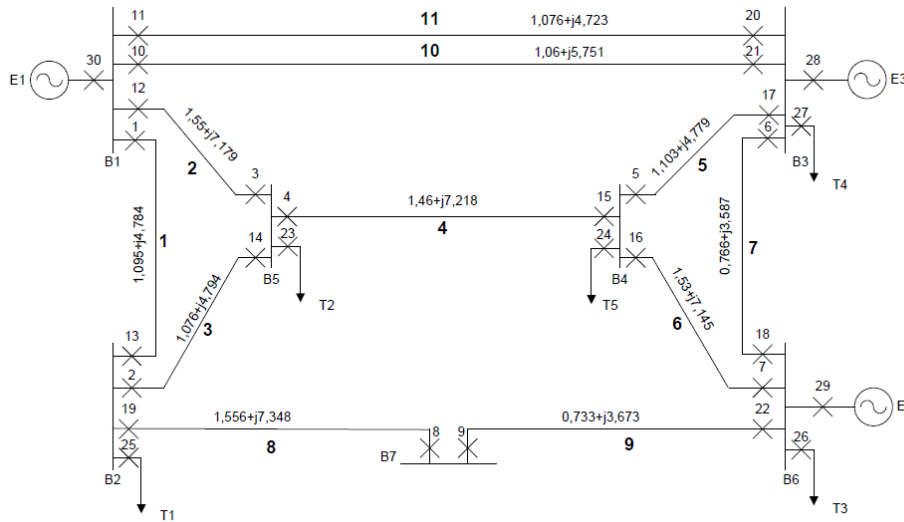
| | |
|------------------|--------|
| S_n | 20 kVa |
| U_n | 380 V |
| $\cos \varphi_n$ | 0,5 |
| x_d | 0,8 |
| x_d' | 0,093 |
| x_d'' | 0,093 |
| x_i | 0,13 |
| x_0 | 0,04 |

Navedeni modeli elektrana mogu raditi paralelno te mogu biti sinkronizirani na krutu mrežu E3.



Slika 1. Model elektroenergetskog sustava

Slika 2. prikazuje konfiguraciju mreže. Modeli vodova s prekidačima i rastavljačima simuliraju visokonaponsku prijenosnu mrežu koja se može konfigurirati na različite načine. Opisana mreža zapravo predstavlja izmjeničnu mikromrežu. Jer se prema definiciji mikromreža sastoji od lokalizirane, uglavnom samodostatne skupine potrošača i proizvođača, što je ovdje zapravo slučaj jer se istraživanja mogu provoditi neovisno od spoja na krutu mrežu ili u paralelnom radu sa elektroenergetskim sustavom fakulteta. Pri tome je postojeća mikromreža na krutu mrežu spojena preko jednog susretnog mjesta priključka (engl. Point of Common Coupling - PCC) što je glavno obilježje mikromreže.



Slika 2. Konfiguracija mreže

Vodovi su fizički smješteni u podrumu, a njihovi parametri prikazani su u Tablica .

Tablica IV. Parametri vodova

| | R | X |
|--------|-------|-------|
| Vod 1 | 1,095 | 4,784 |
| Vod 2 | 1,55 | 7,179 |
| Vod 3 | 1,076 | 4,794 |
| Vod 4 | 1,46 | 7,218 |
| Vod 5 | 1,103 | 4,779 |
| Vod 6 | 1,53 | 7,145 |
| Vod 7 | 0,766 | 3,587 |
| Vod 8 | 1,556 | 7,348 |
| Vod 9 | 0,733 | 3,673 |
| Vod 10 | 1,06 | 5,751 |
| Vod 11 | 1,076 | 4,723 |

Modelna mini kogeneracijska elektrana predstavlja distribuiranu proizvodnju u sustavu i moguće ju je kao i modelnu mikro hidroelektranu s asinkronim generatorom priključivati u bilo koje čvorište modela elektroenergetske mreže te na taj način istraživati utjecaj distribuirane proizvodnje na statičko i dinamičko vladanje elektroenergetskog sustava. Također moguće je mijenjati pojedine parametre vodova te na taj način simulirati njihovu različitu duljinu tj. povećavati ili smanjivati udaljenost između čvorišta u sustavu.

Uz modele vodova, u laboratoriju postoje različiti tipovi opterećenja koji se mogu spajati u različita čvorišta modela elektroenergetskog sustava. Potrošači su koncipirani kao:

- Djelatni, jednofazne snage 16 kW sa 16 otcjepa. Žični otpornici smješteni su u podrumu laboratorija, a mijenjanje odcjeka moguće je preklopkama smještenim na zidu laboratorija (Slika 3.)
- Induktivni, jednofazne maksimalne snage 10 kVA s kontinuiranom regulacijom snage. Prigušnice su sa željezom s pomičnim jarmom kojeg pokreće mali elektromotor daljinski upravljani tipkalima.
- Kapacitivni, pojedinačne snage 1 kvar za napon 380 V. Priključci svakog kondenzatora izvedeni su na aparatne stezaljke čime je omogućeno proizvoljno kombiniranje jediničnih potrošača od 1 kvar i ostvarenje simetričnih ili nesimetričnih trofaznih potrošača.



Slika 3. Upravljanje opterećenjem

3. LABORATORIJ ZA NAPREDNE ELEKTROENERGETSKE MREŽE

EES budućnosti sastojat će se od velikog broja malih proizvodnih jedinica u kombinaciji s konvencionalnom proizvodnjom, s masovnom proizvodnjom iz OIE, što će uzrokovati dvosmjerne tokove snaga između prijenosne i distribucijske mreže kao i unutar distribucijske mreže. Ako se tome pridoda aktivna uloga potrošača vođenih cjenovnim signalima s tržišta bit će otežano održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje u sustavu. Stoga fleksibilnost postaje ključni atribut budućih elektroenergetskih mreža i središnji cilj modernizacije mrežne infrastrukture. Razvoj naprednih elektroenergetskih mreža (engl. Smart Grids) temelji se na upotrebi naprednih informacijskih i telekomunikacijskih tehnologija koje omogućuju integraciju i povezivanje proizvođača i potrošača svih veličina te različitih tehnologija.

Osnovna ideja naprednih mreža je povećanje kapaciteta, učinkovitosti i pouzdanost postojećih i novih elemenata elektroenergetskog sustava uz izbjegavanje velikih pojačanja mreže uz određene investicije u nadzornu i upravljačku opremu. Inteligentno praćenje i nadzor olakšava povezivanje i rad proizvođača svih veličina i različitih tehnologija, potrošači dobivaju bolje informacije i izbor opskrbe, a smanjuje se i štetni utjecaj na okoliš cijelog sustava opskrbe električnom energijom.

Dosadašnji elektroenergetski sustav s pretežito centraliziranom proizvodnjom električne energije transformirati će se u integriranu sigurnu mrežu koja kombinira klasičnu centraliziranu i decentraliziranu proizvodnju. U slučaju distribucijskih mreža koncept naprednih mreža povezuje se s integracijom: distribuirane proizvodnje, spremnika energije, električnih vozila, a obuhvaćena su i napredna brojila, te aktivno upravljanje potrošnjom (engl. demand response). Navedeni elementi mogu, a i ne moraju biti povezani u mikromreže. U slučaju prijenosnih mreža napredne mreže uključuju aktivnu infrastrukturu sposobnu za povećani prijenos električne energije uz kvalitetan nadzor, zaštitu i vođenje cjelokupnog prijenosnog EES-a.

Sve atraktivnije prijevozno sredstvo postaju električna vozila koja unose dodatnu nesigurnost u sustav sa strane potrošnje. Povećan broj nasumično spojenih vozila na distribucijsku mrežu može dovesti do značajnih negativnih posljedica.

Kako bi se omogućilo istraživanje novih tehnologija na elektroenergetski sustav odlučeno je napraviti dodatna financijska ulaganja u laboratorij te transformirati ga u laboratorij za napredne elektroenergetske mreže (SGLab).

U laboratorij će se dodatno ugraditi:

- 1) Solarni paneli – 32 fotonaponska modula
 - a. 10 modula od polikristalnog silicija (130 W električne energije po modulu u slučaju 1000 W/m^2 sunčevog zračenja s površinom ploče od 1 m^2)
 - b. 10 modula od monokristalnog silicija (140 W električne energije po modulu u slučaju 1000 W/m^2 sunčevog zračenja s površinom ploče od 1 m^2)
 - c. 6 modula različitih tehnologija pod različitim kutovima ugradnje, u svrhu dodatnih istraživanja
 - d. na krovu je instalirano 6 modula pojedinačne snage 200 W (Slika 4).
- 2) Skladište električne energije za simulaciju električnih vozila (Li-I baterije, 32x100Ah) (Slika 5)
- 3) Skladište električne energije (6x150 Ah)
- 4) Tri DC/AC industrijska izmjenjivača svaki snage 2250 VA/1800 W s kućištem
- 5) Dva trofazna industrijska pretvarača AC/DC snage 6000 W svaki
- 6) Modeli distribuirane proizvodnje (mikroturbina snage 5,5 kW) i
- 7) Vjetroturbina snage 600 W (Slika 6)



Slika 4. Solarni paneli instalirani na krovu



Slika 5. Baterije



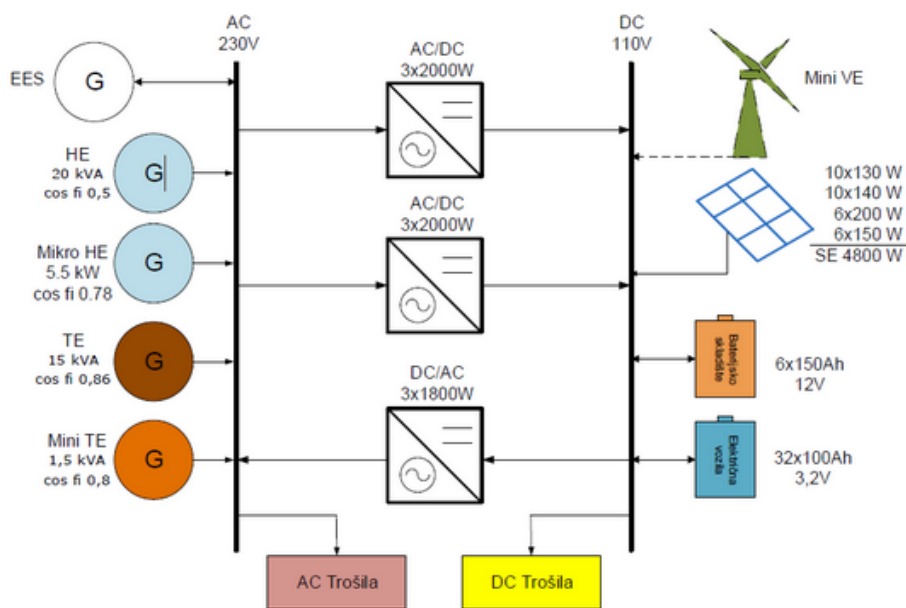
Slika 6. Vjetroelektrana

Većina novih elemenata već je nabavljena, a za nedostajuće elemente se traži izvor financiranja. Ugradnju će obaviti djelatnici FER-a kao i izradu SCADA sustava kojim će se nadzirati cijeli sustav i pojedini njegovi dijelovi.

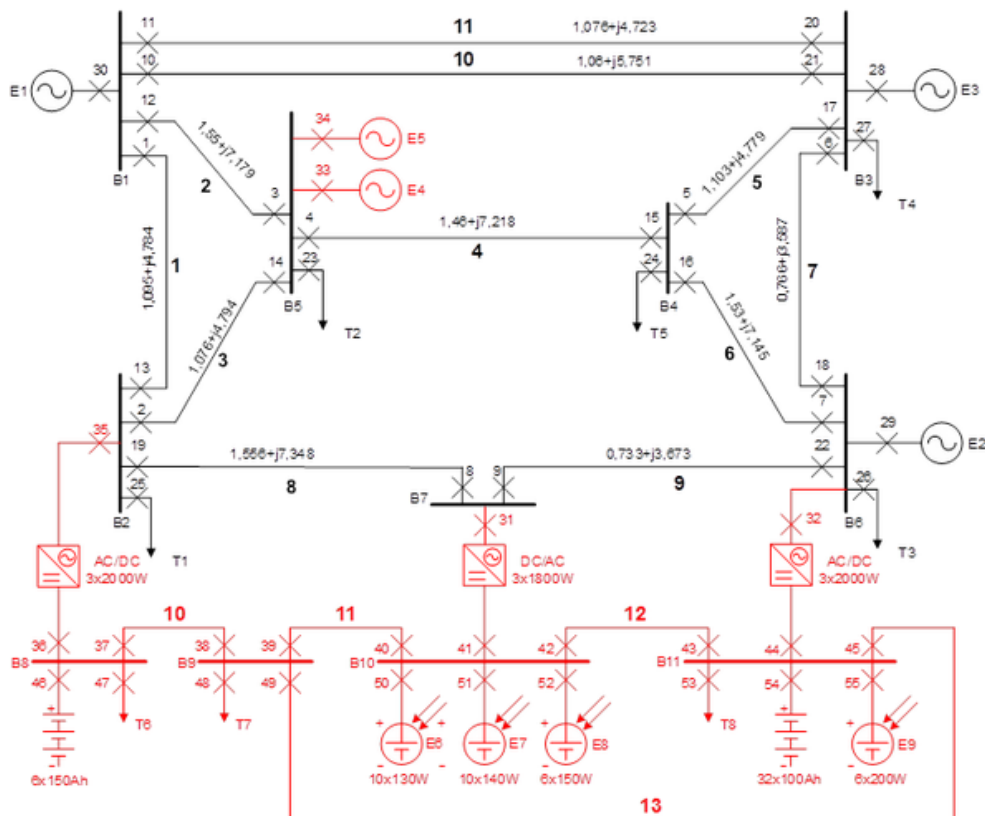
U planu je instalacija različitih obnovljivih izvora energije i distribuirane proizvodnje što predstavlja nešto više od 20% ukupne instalirane snage proizvodnih jedinica u laboratoriju, čime će se istraživati utjecaj njihove različite penetracije u sustav.

Potrebno je modernizirati sustave relejne zaštite postojećih i novih elektrana za što također još nisu pronađena sredstva.

Slika 7 prikazuje idejno rješenje budućeg laboratorija, dok Slika 8 detaljnije predstavlja strukturu izmjenične i istosmjernje mikromreže tzv. hibridna mikromreža.



Slika 7. Idejno rješenje laboratorija



Slika 8. Nova konfiguracija mreže

Da bi se istražio utjecaj DP i OIE na modelirani elektroenergetski sustav postojeći i budući distribuirani izvori će se združiti (agregirati) te će se na taj način formirati virtualna elektrana u kojoj je moguće kombinacijom i optimizacijom proizvodnje iz OIE i DP postići željenu injekciju snage u sustav. Na taj će se način rezultati dobiveni simulacijskim istraživanjima [5, 6] moći provjeriti i praktičnim ispitivanjima. Osim navedenog, DP priključena u mikromrežu imati će mogućnost sudjelovanja npr. u regulaciji frekvencije i snage razmjene cijelog EES-a te će se rad upravljačkog sustava mikromreže koordinirati s sustavom vođenja cijelog modeliranog sustava.

Većina distribuirane proizvodnje na mrežu je spojena preko energetskih pretvarača (engl. power converters) što omogućava fleksibilnost takvih izvora tj. sposobnost sustava da angažira svoje resurse u odgovoru na promjene u opterećenju. Fleksibilnost modela sustava dodatno će se povećati i dodavanjem spremnika energije čiji kapacitet je izračunat korištenjem za tu namjenu razvijenih algoritama [7]. Nova hibridna mikromreža imat će karakteristike fleksibilnog energetskog čvorišta te neće imati negativnih utjecaja na EES fakulteta jer će sustav vođenja, koji će se razviti, omogućiti da se sve nesigurnosti i varijabilnosti potrošnje i proizvodnje uravnoteže unutar nje same na način da preko susretnog mjesta mikromreže i EES-a teku planirani (ugovoreni) tokovi snaga.

4. ZAKLJUČAK

Laboratorij za električna postrojenja je zbog svoje veličine i nedostatka financijskih sredstava dugi niz godina bio zanemaren. Uviđena je vrijednost laboratorija i mogućnost koju pruža studentima i mladim znanstvenicima da naučena teorijska znanja isprobaju u praksi u kontroliranom okruženju te se poduzimaju koraci potrebni za modernizaciju laboratorija prema odrednicama koje propisuje Europska Unija svojim državama članicama glede povećanja udjela obnovljivih izvora energije u sustavu. Veći udio obnovljivih izvora energije i distribuirane proizvodnje predstavlja porast tzv. „zelene“ energije što posebno atraktivnim čini električna vozila koja će u laboratoriju biti simulirana Li-I baterijama. Uz izgradnju nove DC mikromreže koja će biti povezana s postojećom AC mikromrežom, potrebno je i obnoviti postojeću mrežu servisiranjem termoelektre i hidroelektre te zamijeniti njihove trenutne sustave zaštite izvedene elektromehaničkim relejima, modernim numeričkim relejima.

5. LITERATURA

- [1] H. Požar, „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, 4. izdanje, Zagreb, Hrvatska, Tehnička knjiga 1984.
- [2] I. Kuzle, J. Havelka, H. Pandžić, T. Capuder, „Hands-On Laboratory Course for Future Power System Experts“, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no. 4, 2014, pp. 1963-1971
- [3] D. Bertsimas, E. Litvinov, X. A. Sun, Z. Jinye, T. Tongxin, „Adaptive Robust Optimization for the Security Constrained Unit Commitment Problem“, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 1, 2013, pp. 52-63
- [4] http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/REN21_GSR_2010_full_revised%20Sept2010.pdf
- [5] H. Pandžić, I. Kuzle, Igor; T. Capuder, „Virtual Power Plant Mid-Term Dispatch Optimization“, Applied energy, vol. 101, no. 1, 2013, pp. 134-141
- [6] H. Pandžić, J.M. Morales, A.J. Conejo, I. Kuzle, „Offering model for a virtual power plant based on stochastic programming“, Applied energy, vol. 105, no. 5, 2013, pp. 282-292
- [7] T. Dragičević, H. Pandžić, D. Škrlec, I. Kuzle, J.M. Guerrero, D. Kirschen, „Capacity Optimization of Power Generation and Storage System in an Autonomous Telecommunication Facility“, IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 4, 2014, pp. 1367-1378