

LARES – Laboratorij za sustave obnovljivih izvora energije

Mario Vašak¹, Nedjeljko Perić², Mato Baotić³ i Željko Ban⁴

¹ nije član HATZ-a

² član HATZ-a

³ član suradnik HATZ-a

Sažetak: *Prikazan je povijesni tijek razvoja i sadašnji trenutak Laboratorija za sustave obnovljivih izvora energije (LARES) na FERu. Laboratorij je nastao adresiranjem tehničkih izazova povezanih s upravljanjem pojedinačnih sustava obnovljivih izvora energije, sustava pohrane ili potrošača, s ciljevima njihove ekonomičnosti i dugovječnosti, a danas se mahom bavi upravljanjem njihovih složeno povezanih kombinacija, na razini zgrada i infrastrukture. Glavna metodološka odrednica LARESa su matematička optimizacija i prediktivno upravljanje.*

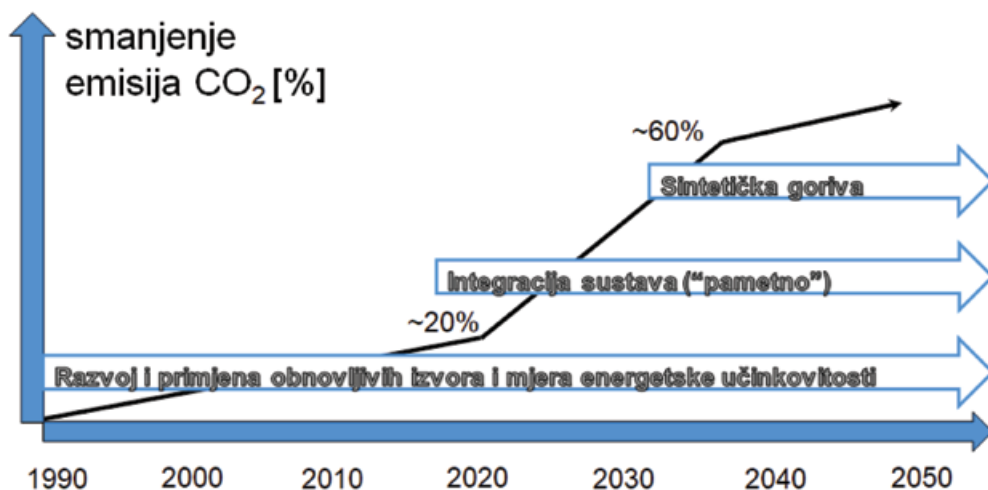
Ključne riječi: *LARES, obnovljivi izvor energije, sustav pohrane energije, zgrada, infrastruktura, prediktivno upravljanje.*

1. Uvod

Uklanjanje ugljičnog otiska energetskeg sustava nužan je odgovor civilizacije na prijetnju klimatskih promjena na Zemlji te je ono potrebno provesti kroz nekoliko nadolazećih desetljeća. Europska unija je u sklopu Europskog zelenog plana kao prvi cilj istaknula upravo cilj da Europa do 2050. godine postane prvim klimatski neutralnim kontinentom odnosno kontinentom bez ugljičnog otiska [1]. Njemačka je već izradila tehno-ekonomsku analizu optimalnog načina prelaska na energetske sustav bez ugljičnog otiska do 2050. godine [2] iz koje se može identificirati nekoliko faza ovog prelaska odnosno tzv. energetske tranzicije (vidi Sliku 1):

1. Razvoj individualnih sustava obnovljivih izvora energije i mjera energetske učinkovitosti (procjenjuje se za ovu fazu smanjenje emisija CO₂ od otprilike 0-20% u odnosu na referentnu 1990. godinu);

2. Integracija individualnih sustava: upravljanje potrošnjom u kombinaciji s kratkotrajnom pohranom energije, uz omogućavanje i iskorištavanje fleksibilnosti u potražnji energije, povezivanje različitih energetske sektora na strani potrošnje poput grijanja/hlađenja i elektromobilnosti (procjena smanjenja emisija CO₂ u opsegu 20-60%);
3. Sintetička goriva: korištenje električne energije iz obnovljivih izvora za proizvodnju sintetičkih goriva u velikim razmjerima, povećano korištenje sintetičkih goriva za prijevoz (procjena smanjenja emisija CO₂ u opsegu 60-80%);
4. Uvoz preostalih nedostajućih količina obnovljive energije iz udaljenih krajeva što omogućuje potpuno napuštanje korištenja fosilnih goriva u krajnjoj potrošnji (procjena smanjenja emisija CO₂ u opsegu 80-100%).



Slika 1: Ključni elementi uklanjanja ugljičnog otiska iz energetskog sustava Njemačke do 2050. godine, prema [2].

Laboratorij za sustave obnovljivih izvora energije (engl. Laboratory for Renewable Energy Systems, LARES), kao istraživački laboratorij na Sveučilištu u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva (FER), tijekom svog dosadašnjeg razvoja prati navedene trendove, pri čemu se njihov tehnički obuhvat neprestano širi uz brojne istraživačko-razvojne izazove. Pritom se u LARES njeguje pristup rješavanju ovih izazova s pozicije teorije i primjene sustava automatskog upravljanja te matematičke optimizacije kako bi se tehničke sustave nužne za uklanjanje ugljičnog otiska energetskog sektora učinilo čim učinkovitijima, u energetskom, ekološkom i ekonomskom smislu.

U nastavku ovoga rada dan je u odjeljku 2 povijesni pregled razvoja LARES-a od njegovih neformalnih početaka, preko izgradnje laboratorijskih kapaciteta i službene uspostave pa sve do danas. Potom su u odjeljku 3 sažeta sadašnja istraživačka usmjerenja LARESa, te je pregled zaokružen zaključkom.

2. Povijesni pregled razvoja Laboratorija

LARES neformalno funkcionira s istraživačkim usmjerenjem na obnovljive izvore energije od ranih 2000.-ih godina kada je naglasak i u svijetu bio na razvoju individualnih sustava obnovljivih izvora energije. Istraživanje i razvoj u ovom danas vrlo širokom i razgranatom području pokrenuo je idejni začetnik Laboratorija prof. emer. dr. sc. Nedjeljko Perić. On je usmjerio jedan dio tadašnje neformalne istraživačke grupe Advanced Control Team (ACT), okupljene oko profesora Nedjeljka Perića i Ivana Petrovića u Zavodu za automatiku i računalno inženjerstvo (ZARI) FERa, u istraživanje sustava za pretvorbu energije vjetra u električnu energiju te pripadnih sustava automatskog upravljanja. U početku je navedena skupina pokrenula Laboratorij za obnovljive izvore energije (LOIE). Sam ACT njegovao je sustavski pristup upravljanju različitim tehničkim sustavima temeljen na matematičkim optimizacijama, modelskom prediktivnom upravljanju i drugim naprednim tehnikama upravljanja te je isti primijenjen i na sustav upravljanja vjetroagregatom. Istraživanje i razvoj provedeni su uz usku suradnju s Končar – Institutom za elektrotehniku d.d. koji je kao sastavnica tvrtke Končar Elektroindustrija d.d. bio posvećen tadašnjem strateškom usmjerenju tvrtke u razvoj sustava obnovljivih izvora energije s naglaskom na vjetroagregate i vjetroelektrane.



Slika 2: Vjetroagregat KO-VA 57/1 tvrtke Končar.

2.1. Istraživanje obnovljivih izvora i energetske učinkovitosti

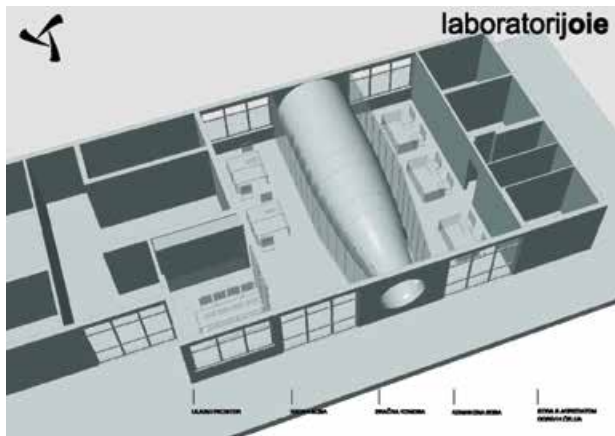
Glavni istraživač u području energije vjetra unutar tadašnjeg LOIE bio je dr. sc. Mate Jelavić. Njegovo je istraživanje u području upravljanja vjetroagregatom bilo financirano od strane Končar – Instituta za elektrotehniku d.d., u koji je i prešao 2008. g., no i prije i poslije odlaska u Institut intenzivno je surađivao s ostalim istraživačima u Laboratoriju i dijelio svoja bogata saznanja iz prakse. Dr. Jelavić dizajnirao je sustav nadgledanja i upravljanja Končarevih vjetroagregata snage 1 i 2.5 MW [3] koji su u uspješnoj funkciji u vjetroelektrani Pometeno brdo, a u sklopu koje su rađena brojna eksperimentalna

istraživanja istraživačkog tima iz LARESa. Prikaz Končareva vjetroagregata snage 1 MW dan je na Slici 2.

Važnost eksperimentalnih istraživanja konceptata automatskog upravljanja u sustavima obnovljivih izvora energije bila je misao vodilja tadašnjeg neformalnog voditelja Laboratorija prof. dr. sc. Nedjeljka Perića pri izgradnji laboratorijskih kapaciteta za istraživanje obnovljivih izvora energije baš na FERu. Prvotno je 2007. na 13. katu neboderske zgrade FERa (zgrada C FERa) izgrađen i opremljen laboratorijski prostor za istraživanje energije vjetra u sklopu kojeg je izgrađen vjetrotunel sa skaliranim vjetroagregatom koji posjeduje sve komponente upravljanja kao i veliki vjetroagregat megavatne skale – generator s upravljivim momentom te sustav zakreta lopatica. Naknadno je u konstrukciju vjetrotunela/vjetroagregata ugrađen mehanički sklop za generiranje strukturnih oscilacija vjetroagregata te sustav upravljanja za kompenzaciju vibracija.

Važan doprinos izgradnji laboratorijskih kapaciteta za energiju vjetra dali su, uz prof. emer. dr. sc. Nedjeljka Perića, također i dr. sc. Mate Jelavić te prof. dr. sc. Branimir Matijašević (Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, FSB), prof. dr. sc. Milan Kostelac (FSB), prof. dr. sc. Hrvoje Domitrović i Stjepan Mikac, dipl. ing. [4]. Arhitektonski su laboratorij osmislile arhitektice Dubravka Vranić i Ivana Perić.

Ubrzo potom prof. dr. sc. Željko Ban i prof. dr. sc. Nedjeljko Perić nadodali su ovom sustavu i eksperimentalni postav za sustav pohrane energije temeljen na vodikovoj tehnologiji. To je bilo usko vezano uz istraživanja koje je prof. Ban provodio vezano



Slika 3: Tlocrtni pogled na prostor Laboratorija na 13. katu neboderske zgrade FERa.

uz upravljanje energetskim pretvaračima za svežnjeve gorivnih članaka uz značajan doprinos dr. sc. Tonija Bjažića. Kombiniranjem obnovljivih izvora sa sustavima pohrane naglašena je već i u samim početcima Laboratorija jasna vizija da je sustave nestalnih obnovljivih izvora energije potrebno uvezivati sa sustavima pohrane s ciljem osiguranja stabilne opskrbe trošila obnovljivom energijom. Na Slici 3. dan je tlocrtni prikaz laboratorijskog prostora s vjetrotunelom u sredini te

dvije prostorije za "simulacijski" i "eksperimentalni" rad, lijevo i desno od tunela, kao i s malom prostorijom za elektrolizator, pohranu vodika (metalhidridni spremnik) i svežanj gorivnih članaka izvedenom uz sve mjere protueksplozijske zaštite. Slika 4. daje prikaz laboratorijskog vjetroagregata u vjetrotunelu te uvid u izgled novoizgrađenih laboratorijskih prostora, a Slika 5. fotografiju iz prostorije s vodikovom tehnologijom. U nepromijenjenom tlocrtnom obliku ovaj se laboratorijski prostor održao do danas. Zajedno s dizajnom i izgradnjom prostora dizajniran je i prvi logo LARES-a koji LARES duguje dizajnerskoj inspiraciji Katarine Perić, mag. art. Taj logo dan je na Slici 6.



Slika 4: Laboratorijski vjetroagregat u vjetrotunelu i uređeni laboratorijski prostori na 13. katu neboderske zgrade FERa.



Slika 5: Eksperimentalni postav za istraživanje vodikove tehnologije u sklopu LARES-a (lijevo je metalhidridni spremnik, a u središnjem dijelu fotografije, u pozadini, je svežanj gorivnih članaka).



Slika 6: Prvi logo LARESa.

Kao što će se pokazati još dosta puta u godinama koje slijede, sustavski pristup istraživanju kroz principe automatskog upravljanja i optimizacije prirodno je od istraživanja pojedinačnog sustava vjetroagregata vodio do istraživanja vjetroelektrana u kojima skupina vjetroagregata treba koordiniranim upravljanjem ostvariti čim bolje vladanje, i u smislu planirane isporuke energije u mrežu i u smislu čim manjeg kumulativnog zamaranja konstrukcija pojedinih vjetroagregata. LARES je 2008. otpočeo ovu istraživačku temu provedbom svog prvog projekta financiranog iz EU fondova – radi se o EU FP7 projektu pod nazivom AEOLUS – Distributed Control of Large-scale Off-shore Wind Farms (2008.-2011.) na kojem je FER bio partner, koordinator je bilo Sveučilište u Aalborgu, a ključan industrijski partner bio je Vestas. Istraživanje na ovome projektu sa strane FERa neformalno je vodio prof. dr. sc. Mato Baotić (formalni voditelj bio je prof. dr. sc. Nedjeljko Perić), uz velik doprinos dr. sc. Vedrane Spudić i dr. sc. Mate Jelavića. Konačno rješenje za upravljanje vjetroelektranom bilo je u domeni modelskog prediktivnog upravljanja [5].

Daljnji razvoj obnovljivih izvora vezanih uz fazu 1 energetske tranzicije [2] i dalje sadrži brojne tehničke izazove te LARES kontinuirano odgovarajućim istraživačkim projektima ostaje prisutan u tom dijelu sve do danas [6-10]. Poglavitito se to odnosi na projekt MultiWind (2008.-2011.) u kojem su važnu istraživačku ulogu, uz prof. Perića (voditelja projekta) i dr. sc. Matu Jelavića, imali dr. sc. Vlaho Petrović i dr. sc. Nikola Hure, te na suradnju s Laboratorijem za numeričku mehaniku FSBA koji vodi prof. dr. sc. Zdenko Tonković te s kojim LARES uz partnerstvo s Građevinskim fakultetom Sveučilišta u Rijeci provodi projekte iz naprednog upravljanja vjetroagregatom za očuvanje cjelovitosti konstrukcije (CEEStructHealth – Centre of Excellence for Structural Health (2013.-2015.) i ZaCjel – Zaštita cjelovitosti konstrukcija u energetici i transportu (2020.-2023.)). U sklopu CEEStructHealth zanimljivo je napomenuti da je uz značajne napore dr. sc. Nikole Hurea i Gorana Benčića iz Končar Inženjeringa za energetiku i transport d.d. uspostavljena mogućnost razvoja i testiranja naprednih algoritama upravljanja uključujući prediktivne algoritme od simulacijske okoline s detaljnim aerodinamičkim simulatorom do prijenosa koda u ciljanu

implementacijsku platformu samog vjetroagregata. To je iskorišteno za uspostavu nadbrzinske zaštite temeljene na invarijantnim skupovima [9] na samom KO-VA 57/1 vjetroagregatu. Time su se otvorile izuzetno velike mogućnosti za daljnji rad, no nažalost one nisu dalje kapitalizirane. Ključnom se odrednicom za smanjenje udjela istraživanja u domeni energije vjetra u LARESu od 2011. godine nadalje pokazuje napuštanje strateškog usmjerenja na razvoj vjetroagregata u koncernu Končar.

Istraživanju u sklopu Laboratorija pridružio se značajnije od 2008. godine i prof. dr. sc. Mario Vašak čije je istraživanje također bilo metodološki usmjereno na modelsko prediktivno upravljanje i matematičke optimizacije. Njegov ulazak u istraživačke aktivnosti Laboratorija vezan je uz nekoliko stvari: i) zaokruživanje eksperimentalnih postava Laboratorija fotonaponskom elektranom i mikromrežom, ii) istraživanje postupaka upravljanja generatorom vjetroagregata otpornog na kvarove kroz FP7 SEE-ERA.net PLUS projekt MONGS – Monitoring of Wind Turbine Generator Systems 2010.-2012. na kojem je FER bio partner i prof. dr. sc. Mario Vašak voditelj ispred FERa, ključni istraživač bio je doc. dr. sc. Vinko Lešić, koordinator projekta je bio prof. Thomas Wolbank s TU Beč, a partner uz FER i Elektrotehnički fakultet iz Podgorice, te iii) istraživanje energetske učinkovitog upravljanja klimatizacijom kao najvećim energetske potrošačem u zgradi. Ovim potonjim je istraživačka djelatnost LARESa proširena i na mjere energetske učinkovitosti koje su komplementarne obnovljivim izvorima energije u procesu smanjenja ugljičnog otiska energetske sustava, te su zajedno s obnovljivim izvorima karakteristične za fazu 1 energetske tranzicije [2].

U razdoblju do 2013. godine Laboratorij je upotpunjen fotonaponskom elektranom snage 21 kWp izgrađenom na krovu neboderske zgrade FER-a zajedno s mjernim sustavom za karakterizaciju Sunčeva ozračenja (Slika 7.). Fotonaponska elektrana je zajedno s vjetroagregatom i postavom za pohranu energije korištenjem baterijskih spremnika i vodikove tehnologije uključena putem odgovarajućih pretvarača snage u laboratorijsku mikromrežu LARESa. Izgradnja je provedena kao dio aktivnosti podizanja istraživačkih kapaciteta FERa kroz EU FP7 projekt ACROSS – Centre of Research Excellence for Advanced Cooperative Systems (2011.-2015.) kojem je koordinator bio prof. dr. sc. Ivan Petrović, a sama izgradnja fotonaponske elektrane provedena je pod vodstvom prof. dr. sc. Marija Vašaka. Vezano uz fotonaponski sustav, Sunčevo ozračenje i mikromrežu u Laboratoriju proveden je niz značajnih istraživanja u kojima su ključnu provedbenu ulogu imali dr. sc. Marko Gulin i dr. sc. Tomislav Pavlović [11-13]. Istraživanja u sklopu Laboratorija vezano za upravljanje pretvaračima provodila je i dr. sc. Tamara Hadjina, dr. sc. Goran Kujundžić provodio je istraživanja vezano za upravljanje sustavima s baterijskim spremnicima [14,15], a dr. sc. Aleksander Radovan vezano uz kratkotrajnu prognozu Sunčeva ozračenja [16].



Slika 7: Fotonaponska elektrana, sustav za mjerenje Sunčeva ozračenja i istraživači iz LARESa na krovu neboderske zgrade FERa.

2.1. Istraživanje integracije u zgradama i infrastrukturi

Od 2010. godine nadalje u Laboratoriju je sve izraženije usmjerenje na povezivanje distribuiranih obnovljivih izvora energije na zgradi u jedinstvenu cjelinu mikromreže zgrade koja ima cilj ostvarenja optimalnog profila razmjene energije s vanjskim distribucijskim energetske mrežama, pri čemu se objedinjeno razmatra i mogućnosti oblikovanja čim povoljnijeg profila potrošnje energije zgrade uz udovoljenje svim komfornim zahtjevima. Time se istraživanje širi na sustave upravljanja koji integriraju pojedine cjeline zgrade što odgovara značajkama faze 2 energetske tranzicije [2] u koju LARES ulazi istraživački pravovremeno u odnosu na period 2020.-ih kada je projicirana šira ekspanzija tehnika pametne integracije u energetske sustavima s velikim udjelom obnovljive energije. Ovdje tehnike upravljanja i estimacije u složenim sustavima, koje su u suštini temeljna ekspertiza članova Laboratorija, dolaze do punog izražaja.

Prvi takav integracijski projekt bio je HRZZ projekt Microgrid – Optimiranje sustava obnovljivih izvora električne energije povezanih u mikromrežu (2011.-2014.), suradni projekt s FSBom, Državnim hidrometeorološkim zavodom (DHMZ) i Končar – Institutom za elektrotehniku d.d. koji je vodio prof. dr. sc. Mato Baotić. Zanimljiva crtica jest da se od tada Laboratorij, tada još neformalno, na prijedlog prof. dr. sc. Mate Baotića, počinje nazivati njegovim današnjim imenom – Laboratorij za sustave

obnovljivih izvora energije. Akronim LARES vezan uz engleski naziv Laboratorija ostao je nepromijenjenim – od Laboratory for Renewable Energy Sources prije ove izmjene do Laboratory for Renewable Energy Systems nakon nje. Novim nazivom jače se naglašava sustavski pristup temeljen na principima automatskog upravljanja i matematičke optimizacije u kojem obnovljivi izvori energije predstavljaju dio cjelokupnog razmatranog sustava. Zbog tendencije povećanja udjela nestalnih obnovljivih izvora energije u energetske sustavima i sveprisutnosti obnovljive energije u različitoj infrastrukturi i u zgradama, naziv Laboratorija ostaje trajno aktualan.

Uslijedio je prvi projekt vezan uz energetske učinkovito upravljanje zgradama pod nazivom ENHEMS Buildings – Enhancement of Research, Development and Technology Transfer Capacities in Energy Management Systems for Buildings (2013.-2015.) kojim je snažno istraživački pokrenut i segment energetske učinkovitog upravljanja u zgradi. Projekt je bio financiran iz IPA III.c prepristupnih fondova EU za Republiku Hrvatsku, a vodio ga je prof. dr. sc. Mario Vašak. U sklopu ovog projekta započeta je izgradnja infrastrukture živućeg laboratorija za energetske učinkovito upravljanje klimatizacijom u zgradi – sustav koji omogućuje prediktivno upravljanje uspostavljen je na 9. i 10. katu neboderske zgrade FERa. Istraživanje je bilo vezano samo za tzv. razinu zone odnosno upravljanje klimatizacijom za održavanje komfora. Vrlo je važno napomenuti da je kroz ovaj projekt uspostavljena stalna suradnja LARESa s DHMZom koji je na ovome projektu bio partner. Kroz projekt je uspostavljena mreža za mjerenje Sunčeva ozračenja širom Hrvatske čime se postavljaju temelji za uspostavljanje sustava prognoziranja Sunčeva ozračenja za različite potrebe na cijelom njenom teritoriju jer se prognostički modeli za ozračenja od tada mogu podešavati na temelju mjerenja ozračenja relevantnih za cjelokupni teritorij Hrvatske. DHMZ je u sklopu projekta uspostavio prognostičku podršku za ključne meteorološke varijable, uključivo i Sunčevo ozračenje, za nebodersku zgradu FERa i od tada do danas stalno generira prognoze za FERovu zgradu na satnoj rezoluciji svakih 6 sati za 72 sata unaprijed. DHMZ to od 2015. godine do danas provodi bez ikakve novčane kompenzacije i za to mu LARES duguje izuzetnu zahvalnost.

Potom se HRZZ projektom 3CON – Control-based Hierarchical Coordination of Large Consumers for Integration in Smart Grids (2014.-2017.) pod vodstvom prof. dr. sc. Marija Vašaka počinje razmatrati koordinacija između razine mikromreže i razine zona u zgradi, pri čemu svoja istraživanja združuju doc. dr. sc. Vinko Lešić (upravljanje mikromrežom i koordinacija) i doc. dr. sc. Anita Banjac (upravljanje grijanjem/hlađenjem u zonama zgrade) [17]. Istraživanje u ovome području kulminiralo je projektom 3Smart – Smart Building – Smart Grid – Smart City (2017.-2019.) financiranim iz Programa transnacionalne suradnje Dunav (Interreg Dunav) na kojem je koordinator bio prof. dr. sc. Mario Vašak. U sklopu ovog projekta cjelokupna je neboderska zgrada FERa opremljena odgovarajućom senzorskom i informacijsko-tehnološkom (IT) podrškom koja omogućuje prediktivno upravljanje klimatizacijom

u 248 ureda smještenih kroz 13 katova zgrade od otprilike 10.000 m², prediktivno upravljanje pripremom medija za grijanje odnosno hlađenje zgrade (toplinska stanica odnosno rashladnik) i prediktivno upravljanje na razini mikromreže zgrade korištenjem potpuno upravljivog Li-ion baterijskog sustava 32 kWh/10 kW uvezanog s mjerilima potrošnje zgrade i fotonaponskim sustavom. Pritom je uspostavljen princip hijerarhijske koordinacije među svim sustavima uz velik doprinos doc. dr. sc. Anite Banjac, dr. sc. Nikole Hurea i dr. sc. Hrvoja Novaka [18]. Projekt je proveden uz suradnju s FER-ovim Laboratorijem za napredne elektroenergetske mreže (izv. prof. dr. sc. Tomislav Capuder) s ciljem uvezivanja sustava zgrade u naprednu elektroenergetsku distribucijsku mrežu uz uspostavljene principe odziva potrošnje na koje je prilagođeno cjelokupno koordinirano upravljanje na sve tri razine u zgradi. Projekt 3Smart je uz zgradu FERa uključivao uspostavu sustava prediktivnog upravljanja na pilotima u staroj upravnoj zgradi Hrvatske elektroprivrede (HEP) u Ulici grada Vukovara u Zagrebu, osnovnoj školi u Idriji (Slovenija), osnovnoj školi i staračkom domu u Stremu (Austrija), zgradi Elektroprivrede Hrvatske Zajednice Herceg Bosne u Tomislavgradu (Bosna i Herecegovina) te zgradi EONa u Debrecenu (Mađarska). Time su istraživači u LARES-u stekli značajnu ekspertizu uspostave IT infrastrukture za sustave naprednog upravljanja u zgradama koje su kapitalizirali kroz naredne projekte vezane uz prediktivno upravljanje u zgradama s hrvatskim tvrtkama Klimaprema (PC-ATE Buildings 2018.-2022.), King ICT (Inuking 2020.-2023.) i Iskon Internet (SUPEER 2020.-2023.), te kroz međunarodni projekt Store4HUC (2019.-2022.) financiran iz sheme Interreg središnja Europa.

Još jedan naglašeni smjer istraživanja u LARES pokrenut je 2012. godine EU FP7 projektom UrbanWater – Intelligent Urban Water Management System (2012.-2015.) koji je sa strane FERa kao partnera vodio prof. dr. sc. Mario Vašak, a koordinator projekta bila je tvrtka Aqualia iz Španjolske. Projekt se ticao vođenja sustava pripreme i distribucije vode u gradovima, a zadatak LARESa bio je predviđanje potrošnje vode po točkama distribucijskog sustava, adaptivno određivanje cijena vode s ciljem oblikovanja potrošnje i prepoznavanje potrošnje vode na individualnim uređajima u kućanstvu iz potpisa na mjerilu potrošnje. Time je istraživački rad LARESa proširen i na razmatranje različite infrastrukture u kojoj je odgovarajućim upravljačkim akcijama potrebno osigurati učinkovit rad. U periodu 2013.-2016. u LARES-u je proveden EU FP7 projekt DYMASOS – Dynamic Management of Physically Coupled Systems of Systems koji je koordinirao TU Dortmund i u kojem je uz FER sudjelovao niz značajnih europskih istraživačkih centara iz područja automatskog upravljanja – ETH Zürich, TU Sevilja i dr. Projekt je na FERu vodio prof. dr. sc. Mato Baotić, a naglasak je bio na koordiniranom upravljanju infrastrukturom, uz studiju slučaja elektrodistribucijske mreže HEP Operatora distribucijskog sustava u gradu Koprivnici, pri čemu je pokazano kako je prediktivnim upravljanjem rekonfiguracijom mreže moguće postići značajno smanjenje gubitaka u mreži [19]. Uz ovaj značajan rezultat, prof. dr. sc. Mato Baotić je u suradnji s doc. dr. sc. Branimirom Novoselnikom razvio

i važne teoretske rezultate o računski efikasnom načinu parametarske koordinacije niza neovisnih sustava povezanih zajedničkim ograničenjima [20].

Važan daljnji rezultat u upravljanju infrastrukturom postignut je kroz već spomenuti projekt 3CON, a tiče se upravljanja vučnih sila željezničkih kompozicija napajanih iz iste elektrovođne podstanice na koje je dr. sc. Hrvoje Novak primijenio principe prediktivnog upravljanja i hijerarhijske koordinacije te pokazao značajnu mogućnost ušteda [21, 22].

Primjena prediktivnog upravljanja u infrastrukturi dovela je u nastavku do aktualnog Obzor 2020 projekta REWAISE – Resilient Water Innovation for Smart Economy (2020.-2025.) u sklopu kojeg je LARES zadužen za i) uspostavu sustava za pomoć pri donošenju odluka na temelju prediktivnog upravljanja i optimizacije u sva četiri sustava u urbanom vodnom ciklusu – postrojenju za pripremu pitke vode, vodoopskrbnom sustavu, kanalizaciji i postrojenju za pročišćavanje otpadnih voda – te za ii) njihovu međusobnu koordinaciju na principu tržišnih mehanizama ponude i potražnje. Projekt u LARESu vodi prof. dr. sc. Mario Vašak, a koordinator je tvrtka Aqualia iz Španjolske.

Razmatrajući segmente distribucijskih mreža odnosno cjelokupnih vodnih sustava te prometne infrastrukture koji su obuhvaćeni istraživanjima u LARESu, može se reći da je opseg istraživanja proširen na infrastrukturu pametnih gradova i zajednica. Tome svjedoče i nedavno pokrenuti projekti upravljanja rasvjetom u gradovima te urbane i pametne poljoprivrede – projekti SmartCityLight (2020.-2023.) i AgroSPARC (2019.-2023.) koje vodi doc. dr. sc. Vinko Lešić, kao i projekti koje provodi prof. dr. sc. Željko Ban u dijelu elektromobilnosti: projekt izgradnje punionice za električne bicikle akronima PUELBI, koji on i koordinira, (2020.-2023.) te projekti razvoja sustava neprekidnog napajanja za željezničku i industrijsku infrastrukturu Mareton (2018.-2022.) i Mareton-2 (2020.-2023.). Također se u području elektromobilnosti provodi i projekt EVBattPredtect vezan uz zaštitu baterija električnog vozila od prekomjernog starenja, a vodi ga prof. dr. sc. Mario Vašak u suradnji s tvrtkom Rimac Technology.

U jeku različitih istraživanja u LARESu, Laboratorij je službeno oformljen kao istraživački laboratorij FERa odlukom Fakultetskog vijeća FERa na njegovoj 681. redovitoj sjednici od 17. listopada 2018. godine. Voditeljem LARESa imenovan je prof. dr. sc. Mario Vašak.

3. Sadašnja istraživačka usmjerenja u LARESu

Laboratorij za sustave obnovljivih izvora energije danas broji oko 45 istraživača te četvero administrativnog osoblja. Ukupno je 8 istraživača u znanstveno-nastavnom

zvanju od docenta naviše. To su: prof. dr. sc. Mario Vašak (voditelj Laboratorija), prof. emer. dr. sc. Nedjeljko Perić, prof. dr. sc. Željko Ban, prof. dr. sc. Mato Baotić, prof. dr. sc. Jadranko Matuško, doc. dr. sc. Branimir Novoselnik, doc. dr. sc. Vinko Lešić i doc. dr. sc. Anita Banjac. Također je 7 istraživača s doktoratom znanosti: dr. sc. Nikola Hure, dr. sc. Hrvoje Novak, dr. sc. Nigar Ahmed, dr. sc. Damir Muha, dr. sc. Slaven Begović, dr. sc. Marijo Šundrica i dr. sc. Husam Shaheen. Osoblje laboratorija smješteno je u već spomenutim prostorima 13. kata, a također i u uredima na 9. i 2. katu neboderske zgrade FERa. Dio laboratorijskih prostora nalazi se i u suterenu neboderske zgrade.

U LARES-u se trenutno provodi preko 20 istraživačko-razvojnih projekata. Danas je glavni naglasak u radu LARES-a velika potreba za integracijom individualnih sustava obnovljivih izvora, pohrane i potrošnje u sustavima naprednih zgrada, infrastruktura i gradova, gdje koncepti upravljanja i estimacije temeljeni na matematičkoj optimizaciji postaju neminovni.

Kako se energetske tranzicije, zbog nestalnih izvora obnovljive energije, mijenja paradigma energetskih sustava iz „proizvodnja slijedi potrošnju“ u „potrošnja slijedi proizvodnju“, ova neminovnost posebno proizlazi iz potrebe da sustavi upravljanja u zgradama i infrastrukturi pametnih gradova podržavaju mehanizam odziva potrošnje. Pritom postaje ključno da se metodama matematičke optimizacije i prediktivnog upravljanja dan za danom odlučuje o sudjelovanju zgrade odnosno infrastrukture u usluzi odziva potrošnje te o iznosu fleksibilnosti potrošnje koju se nudi, a potom je potrebno upravljanjem na pomičnom horizontu omogućiti optimalan rad zgrade odnosno infrastrukture uračunavši potencijalnu mogućnost poziva za pružanje fleksibilnosti u potrošnji i različite poremećaje.

Također se dužna pažnja posvećuje algoritmima optimalnog zajedničkog rada sustava za slučaj kada oni čine pravno monolitnu cjelinu (primjerice klimatizacija i mikromreža u zgradi), kao i algoritmima međusobne koordinacije pravno razdvojenih sustava (primjerice više zgrada s različitim vlasnicima). Primjer pristupa za koordinaciju pravno monolitnih sustava jest hijerarhijska koordinacija, a za koordinaciju pravno razdvojenih sustava jest mehanizam autonomnog trgovanja koji se u sklopu projekta PC-ATE Buildings uvodi u zajednicu zgrada koje su okupljene pod istim agregatorom za pružanje fleksibilnosti energetske sustavu.

Korištenje algoritama optimizacije i prediktivnog upravljanja kroz različite se projekte prirodno raslojilo na tri međusobno povezane razine, pri čemu su pojedini projekti mahom fokusirani na jednu do maksimalno dvije od njih:

1. Optimalno parametriranje sustava zgrade ili infrastrukture pri radu na duljim vremenskim skalama (npr. tjedan, mjesec, godina), uz određivanje optimalne politike rada;

2. Određivanje optimalnog načina rada parametriranog sustava na kraćoj vremenskoj skali (npr. jedan dan unaprijed) kojim se omogućuje nastup na tržištima energije i fleksibilnosti u smislu generiranja različitih ponuda;
3. Rad u stvarnom vremenu kojim se prediktivnim upravljanjem omogućuje čim bolje slijeđenje ranije danih ponuda na tržištima energije i fleksibilnosti često na način da se između različitih mogućih scenarija rada minimizira štetu za najgori slučaj.

Iako se tek očekuje puni zamah pametne integracije sustava u sklopu faze 2 energetske tranzicije [2], naslonjeno na nju nastoji se i istraživački poduprijeti fazu 3 energetske tranzicije [2] u kojoj na scenu dolaze sintetička goriva. LARES od polovice 2020. godine sudjeluje u projektu DanuP2Gas – Innovative model to drive energy security and diversity in the Danube Region via combination of bioenergy with surplus renewable energy u sklopu kojeg se razmatra parametriranje i rad elektroplinskih čvorišta kod kojih se susreću energetske vektore biomase, plina, električne i toplinske energije te se također i isprepliću s mobilnošću pogonjenom vodikom. Pritom se pojavljuju različiti oblici sintetičkih goriva, uključivo i vodik, za koji je vrlo izvjesno da postaje medij za pohranu velikih količina obnovljive energije. LARES zasad pristupa izazovu elektroplinskih čvorišta kroz DanuP2Gas projekt kroz prizmu optimalnog parametriranja brojnih podsustava elektroplinskog čvorišta, a istraživanje planira nastaviti dalje kroz odziv potrošnje koji takva čvorišta mogu pružati elektroenergetskoj i plinskoj distribucijskoj odnosno prijenosnoj mreži.

S obzirom da je LARES usmjeren na sustave upravljanja koji objedinjuju različite domene i ekspertize u izazovnom području niskoenergetskih zgrada i infrastrukture, prirodno je da bude jako dobro povezan s drugim istraživačkim laboratorijima na FERu i šire. LARES je dio Centra za umjetnu inteligenciju FERa koji obuhvaća veći broj istraživačkih laboratorija FERa okupljenih oko teme umjetne inteligencije, a također kroz brojne projekte surađuje s različitim istraživačkim laboratorijima FERa. To su: Laboratorij za autonomne sustave i mobilnu robotiku (LAMOR, voditelj prof. dr. sc. Ivan Petrović), Laboratorij za električne strojeve, učinsku elektroniku i pogone (LESUEP, voditelj prof. dr. sc. Damir Žarko), Laboratorij za informacijsku sigurnost i privatnost (LISP, voditelj prof. dr. sc. Stjepan Groš), Laboratorij za mehatroničke sustave (LAMES, voditelj prof. dr. sc. Jadranko Matuško), Laboratorij za napredne elektroenergetske mreže (SGLab, voditelj prof. dr. sc. Igor Kuzle), Laboratorij za robotiku i inteligentne sustave upravljanja (LARICS, voditelj prof. dr. sc. Zdenko Kovarić), Laboratorij za odziv potrošnje (DRLab, voditelj prof. dr. sc. Hrvoje Pandžić).

Veliki broj kvalitetnih sadašnjih i budućih istraživačkih rezultata predstavlja i veliki izazov za istraživače LARESa da svoja istraživanja značajnije usmjeravaju na

primjene u raznim gospodarskim sektorima, pri čemu je ključni partner Inovacijski centar Nikola Tesla (ICENT).

4. Zaključak

Laboratorij za sustave obnovljivih izvora energije (engl. Laboratory for Renewable Energy Systems, LARES) nastao je početkom 2000.-ih godina sistematizacijom nastojanja da se napredne tehnike upravljanja primijene u sustavima obnovljivih izvora energije. Kroz godine značajno je širio svoj istraživački opseg, u skladu s tehničkim potrebama i izazovima energetske tranzicije koja je danas u punom zamahu. Laboratorij se danas bavi brojnim problemima optimiranja i upravljanja složenih sustava zgrada i infrastrukture.

Literatura

- [1] Europska Komisija, 2021. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en, Pristupljeno: 2022-01-30.
- [2] Sterchele P.; Brandes, J.; Heilig J.; Wrede, D.; Kost, C.; Schlegl, T.; Andreas Bett, A. & Henning, H.-M: Paths to a Climate-neutral energy system: The German Energy Transition in its Social Context, Dostupan na <https://www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/paths-to-a-climate-neutral-energy-system.html>, Pristupljeno: 2022-01-30.
- [3] Jelavić, M.: Upravljanje vjetroagregatom s ciljem smanjenja dinamičkih opterećenja konstrukcije, doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2009.
- [4] Perić, N. ; Jelavić, M. ; Ban, Ž. ; Domitrović, H. ; Matijašević, B. ; Kostelac, M. & Mikac, S.: Wind turbine control research in the Laboratory for renewable energy sources, Zbornik skupa 2010 European Wind Energy Conference & Exhibition, Varšava, Travanj 2010., European Wind Energy Association, Varšava, (2010).
- [5] Spudić, V.; Jelavić, M. & Baotić, M.: Supervisory controller for reduction of wind turbine loads in curtailed operation, Control Engineering Practice, 36 (2015), str. 72-86, ISSN 0967-0661.
- [6] Lešić, V.; Vašak, M.; Perić, N.; Joksimović, G. & Wolbank, T.: Fault-tolerant Control of a Wind Turbine with Generator Stator Inter-turn Faults, Automatika, 54 (2013), Br. 1, str. 89-102, ISSN 0005-1144.
- [7] Lešić, V.; Vašak, M.; Perić, N.; Wolbank, T. & Joksimović, G.: Fault-tolerant Control of a Wind Turbine with a Squirrel-cage Induction Generator and Rotor Bar Defects, Automatika, 54 (2013), Br. 3, str. 316-328, ISSN 0005-1144.
- [8] Vašak, M.; Lešić, V.; Wolbank, T. & Perić, N. Generator-fault-tolerant Control for a Variable-speed Variable-pitch Wind Turbine. Patent US8,928,165 od 6. siječnja 2015.
- [9] Hure, N.; Vašak, M. Jelavić, M. & Perić, N.: Wind turbine overspeed protection based on polytopic robustly invariant sets, Wind Energy, 19 (2016), Br. 9, str. 1713-1731, ISSN 1095-4244.

- [10] Petrović, V.; Jelavić, M. & Baotić, M.: MPC framework for constrained wind turbine individual pitch control, *Wind Energy*, 24. (2021), Br. 1, str. 54-68, ISSN 1095-4244.
- [11] Gulin, M.; Vašak, M. & Perić, N.: Dynamical Optimal Positioning of a Photovoltaic Panel in All Weather Conditions, *Applied Energy*, 108 (2013), str. 429-438, ISSN 0306-2619.
- [12] Gulin, M.; Pavlović, T. & Vašak, M.: Photovoltaic panel and array static models for power production prediction: Integration of manufacturers' and on-line data. *Renewable Energy*, 97 (2016), str. 399-413, ISSN 0960-1481.
- [13] Gulin, M.; Pavlović, T. & Vašak, M.: A one-day-ahead photovoltaic array power production prediction with combined static and dynamic on-line correction. *Solar Energy*, 142 (2017), str. 49-60, ISSN 0038-092X.
- [14] Kujundžić, G.; Ileš, Š.; Matuško, J. & Vašak, M.: Optimal charging of valve-regulated lead-acid batteries based on model predictive control. *Applied Energy*, 187 (2017), str. 189-202, ISSN 0306-2619.
- [15] Vašak, M. & Kujundžić, G.: A Battery Management System for Efficient Adherence to Energy Exchange Commands under Longevity Constraints. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54 (2018), Br. 4, str. 3019-3033, ISSN 0093-9994.
- [16] Radovan, A.; Šunde, V.; Kučak, D. & Ban, Ž.: Solar Irradiance Forecast Based on Cloud Movement Prediction. *Energies* 14 (2021), Br. 13, članak broj 3775, 25 stranica, ISSN 1996-1073.
- [17] Lešić, V.; Martinčević, A. & Vašak, M.: Modular energy cost optimization for buildings with integrated microgrid. *Applied Energy*, 197 (2017), Str. 14-28, ISSN 0306-2619.
- [18] Vašak, M.; Banjac, A.; Hure, N.; Novak, H.; Marušić, D. & Lešić, V.: Modular Hierarchical Model Predictive Control for Coordinated and Holistic Energy Management of Buildings. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36 (2021), Br. 4, str. 2670-2682, ISSN 0885-8969.
- [19] Novoselnik, B.; Bolfek, M.; Bošković, M.; Baotić, M.: Electrical Power Distribution System Reconfiguration: Case Study of a Real-life Grid in Croatia. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (2017) Br. 1, Str. 61-66, ISSN 2405-8963.
- [20] Novoselnik, B.; Spudić, V. & Baotić, M.: Parametric Optimization Based MPC for Systems of Systems with Affine Coordination Constraints, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 65 (2020), Br. 2, str. 649-663, ISSN 0018-9286.
- [21] Novak, H.; Lešić, V. & Vašak, M.: Hierarchical Model Predictive Control for Coordinated Electric Railway Traction System Energy Management, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20 (2019). Br. 7, str. 2715-2727, ISSN 1524-9050.
- [22] Novak, H.; Lešić, V. & Vašak, M.: Energy-Efficient Model Predictive Train Traction Control With Incorporated Traction System Efficiency, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, (2021), Early Access, doi: 10.1109/TITS.2020.3046416, str. 1-12, ISSN 1524-9050.