

LABORATORIJA ZA PAMETNE MREŽE U SVRHU EDUKACIJE INŽINJERA BUDUĆNOSTI

Luka Strezoski

Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija
lukastrezoski@uns.ac.rs

Kratak sadržaj: Ovaj rad predstavlja razvoj i primenu napredne Laboratorije za pametne mreže na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, ističući njegove različite primene u akademskim istraživanjima i industrijskim primenama. Rad detaljno prikazuje testno okruženje kontrolnog centra pametne mreže uspostavljeno u Laboratoriji, opisujući njegove parametre dizajna, operativne sposobnosti i obrazovne implikacije. Detaljno je opisana svaka komponenta kontrolnog centra, ali i modelovanje realne elektroenergetske mikromreže u testnom okruženju, ističući njegove arhitektonske nijanse, funkcionalnu dinamiku i prilagodljivost za simuliranje različitih scenarija mreže. Diskusija sintetizuje nalaze iz ovih istraživanja, ističući potencijal testnog okruženja da poveže teorijsko znanje i praktične primene u evoluirajućem domenu tehnologije pametnih mreža.

Ključne reči: laboratorija za pametne mreže, elektroenergetski sistem, inženjer elektroenergetike.

SMART GRID LABORATORY FOR EDUCATION OF ENGINEERS OF THE FUTURE

Abstract: This paper presents the development and application of an advanced Smart Grid Laboratory at the Faculty of Technical Sciences, University of Novi Sad, highlighting its various applications in academic research and industrial practice. The paper details the smart grid control center test environment established in the Laboratory, describing its design parameters, operational capabilities, and educational implications. Each component of the control center is described in detail, as well as the modeling of a real electric power microgrid in the test environment, highlighting its architectural nuances, functional dynamics, and adaptability for simulating different network scenarios. The discussion synthesizes findings from this research, emphasizing the potential of the test environment to bridge theoretical knowledge and practical applications in the evolving domain of smart grid technology.

Key Words: smart grid lab, power systems, engineers of the future.

1. UVOD

U poslednjih nekoliko decenija, energetska sektor je doživeo značajne transformacije, posebno u smislu prelaska na održive i vrlo interkonektovane sisteme, takozvane Pametne mreže [1-6]. Pametne mreže su se istakle kao ključna tehnologija u ovom prelasku, omogućavajući efikasnu integraciju konvencionalnih i obnovljivih energetskih resursa. Ove promene su najuočljivije na nivou distributivnih mreža, uglavnom zahvaljujući uvođenju i širenju distribuiranih energetskih resursa (DER), koji uključuju fotovoltaične sisteme, kompaktne vetrogeneratore, rešenja za skladištenje energije i električna vozila sa pripadajućom infrastrukturu za punjenje. Takođe, DER obuhvataju tehnike upravljanja potražnjom i inicijative za energetska efikasnost. Da bi se efikasno nadgledala, upravljala, zaštitila i optimizovala ovakva mreža, uvedena su napredna rešenja prilagođena operaterima distributivnih sistema. Ipak, tradicionalno osoblje kontrolnih centara nije dovoljno opremljeno ili obučeno da prihvati nove tehnologije i reši nove izazove [7-10].

Zbog potrebe za razumevanjem složenosti i potencijala pametnih mreža, razvijena su specijalizovana laboratorijska okruženja za analizu Pametnih mreža. Ova okruženja su sposobna da emuliraju stvarne scenarije, čime se povezuju teorijski okviri sa njihovim praktičnim primenama [11-18]. Laboratorija za pametne mreže, na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, razvila je jedan od najsavremenijih okruženja, koji omogućava simulaciju ili emulaciju različitih uslova unutar evoluirajuće distributivne mreže. Ovaj rad se fokusira na opis laboratorijske postavke, pružajući uvid u njegovu arhitekturu i mogućnosti, kao i predstavljanje eksperimenata sprovedenih unutar njega na realnoj mikromreži. Cilj je da se istakne preciznost i kontrola koja se može postići sa ovim naprednim postavkama.

Ova laboratorija nije samo tehnički alat, već i obrazovna platforma koja omogućava studentima i istraživačima da steknu praktično iskustvo u radu sa pametnim mrežama. S obzirom na brz razvoj tehnologija u oblasti pametnih mreža, ovakva praksa je neophodna za buduće inženjere i tehničare kako bi ostali u toku sa najnovijim trendovima i izazovima u industriji. Navedena laboratorija takođe služi kao temelj za razvoj i testiranje novih algoritama i metodologija za kontrolu, zaštitu, upravljanje i optimizaciju pametnih mreža, čime se doprinosi napretku u ovoj oblasti

rapidnog napretka.

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

U ovom delu je detaljno opisana Laboratorija za pametne mreže, sa svim svojim komponentama [19]. Ovakva postavka omogućava studentima i istraživačima Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu da vrše kompletne analize elektroenergetskih sistema i pametnih mreža, osećajući se kao da su u stvarnom kontrolnom centru elektroenergetskog preduzeća. U nastavku je svaka komponenta laboratorijske postavke, detaljno opisana.

A. Advanced Distribution Management System (ADMS)

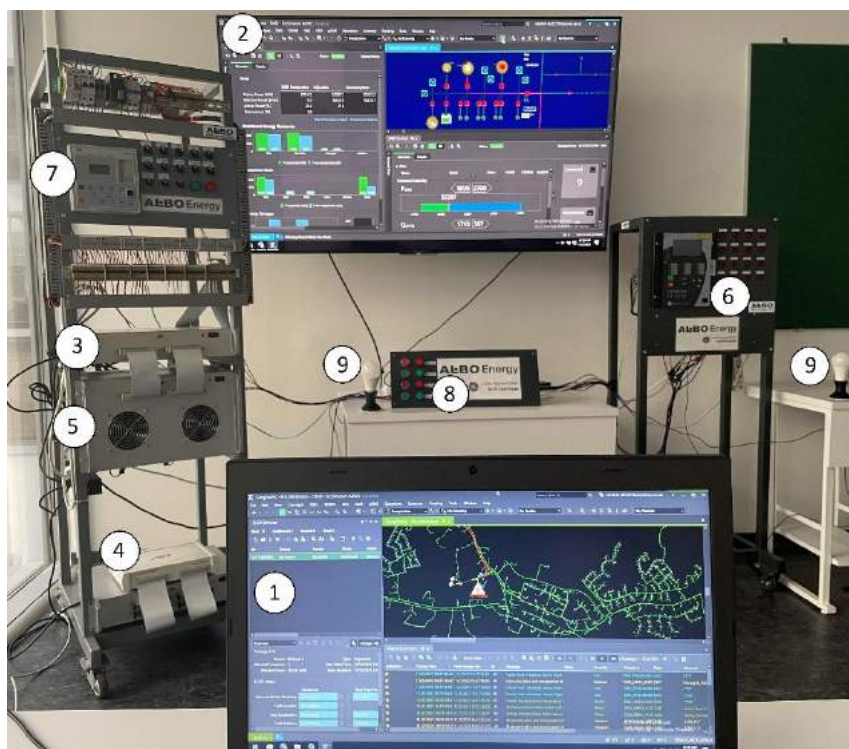
Na Slici 1, EcoStruxure ADMS kompanije Schneider Electric (označen kao ①), pruža sveobuhvatno rešenje za upravljanje mrežom, kombinujući alate za nadzor, analizu, kontrolu, optimizaciju, planiranje i obuku inženjera. Sistem funkcioniše na osnovu predstavljanja celokupne električne distributivne mreže, i 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 Prekidima 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 Management System (DERMS)

EcoStruxure DERMS, označeno brojem ② na Slici 1, je sofisticirani softver prilagođen elektroenergetskim preduzećima za upravljanje distribuiranih energetske resursa (DER). Nudeći nadzor u realnom vremenu, prognoze za kratkoročni i srednjoročni period, kao i intuitivnu kontrolu DER-ova, obuhvata napredne module za upravljanje ograničenjima, optimizaciju mreže i neometanu integraciju novih DER-ova. Sposobnosti DERMS rešenja su ogromne, a obuhvataju 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 elektroenergetskim preduzećima.

C. Hardware in the Loop tehnologija (HIL)

HIL postavka, razvijena od strane kompanije Typhoon HIL, a označena kao ③ na Slici 1, služi kao precizan alat za modelovanje mikromreža i distribuiranih energetske resursa (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-a. Sa HIL-om, može se proučavati ponašanje mikromreže u različitim scenarijima u realnom vremenu, beležeći vremenske odzive na nivou milisekunde.



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

D. Kontroler invertora

AIT kontroler, označen kao ④ na Slici 1, je prilagodljivo rešenje namenjeno različitim aplikacijama pretvarača snage, kao što su trofazni fotovoltaiici, 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. AIT Data Logger beleži relevantne podatke u CSV formatu, dopunjen AIT Scope/Phasor/Locus alatom za sveobuhvatnu analizu strujnih i naponskih oblika. Integrisane zaštite jačaju zaštitu hardvera, uz prilagođena podešavanja firmvera za povećanu sigurnost. Što se tiče komunikacije, AIT 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 kao ⑤ na Slici 1, 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

Multilin F650 Bay Controller kompanije General Electric, označen kao ⑥ na Slici 1, predstavlja savremenu tehnologiju zaštite, dizajniranu za kontrolu i zaštitu energetske sistema. Pored ovih uloga, olakšava merenje, analizu i upravljanje preko različitih naponskih nivoa u industrijskim sistemima. Uređaj je integrisan sa protokolima kao što su IEC 61850, IEC 60870-5-103/104, IEC 62439/PRP/HSR i IEEE 802.1D/RSTP. Sposoban je za primarnu ili sekundarnu zaštitu različitih sistema, detekciju kvara visoke brzine i zaštitu međusobne povezanosti distribuirane generacije. ABB REF615, označen kao ⑦ na Slici 1, prilagođen je za zaštitu dalekovoda i kablovskih dovodnih uređaja u distributivnim energetske sistemima koji mogu imati različite konfiguracije distribucije, sa ili bez distribuirane proizvodnje energije. Njegov zaštitni paket uključuje usmerene i neusmerene prekoračenja struje, zaštitu od zemljospoja, funkcionalnosti zasnovane na naponu i frekvenciji.

G. Simulator prekidača

Prilagođeni simulator prekidača, označen kao ⑧ na Slici 1, omogućava simulaciju komandi otvaranja i

zatvaranja usmerenih na prekidač. Ovaj simulator je povezan sa izlazima za isključivanje zaštitne opreme, osiguravajući odziv kontrole sa ovih izlaza. Dodatno, povezan je sa fizičkim potrošačima, označenim kao ⑨ na Slici 1, kako bi pružio vizuelni prikaz svog operativnog stanja. Svi opisani elementi su međusobno povezani koristeći industrijske standardne interfejsa i protokole.

3. STUDIJE REALNE ELEKTROENERGETSKE MIKROMREŽE U LABORATORIJ ZA PAMETNE MREŽE

Sve opisane studije rađene su na realnoj mikromreži, modelovanoj u ADMS-u i HIL-u, kako je detaljno opisano u referenci [19]. Komunikacija između ADMS-a i HIL-a koristi industrijske standardne interfejsa podržane od strane oba okruženja. To omogućava ADMS-u da šalje komande kontroleru mikromreže koji se nalazi unutar HIL-a kako bi efikasno simulirao razmenu komunikacije između kontrolnog centra i terenske infrastrukture. Specifična ponašanja uređaja unutar mikromreže, njihova interoperabilnost, kao i njihovi dinamički odgovori na različite uslove mreže, mogu se emulirati unutar HIL-a.

U nastavku su opisane dve različite analize izvršene u Laboratoriji za pametne mreže, koje studentima i istraživačima pružaju kompletan uvid u vođenje realnih elektroenergetskih sistema.

A. Smanjenje potrošnje

Aplikacija za smanjenje potrošnje integrisana je u DMS modul ADMS softvera. Aplikacija radi sa uređajima pod SCADA kontrolom, osiguravajući koordinisani odgovor tokom scenarija smanjenja opterećenja. Primarna funkcija aplikacije za smanjenje opterećenja je da identifikuje prekidače koji treba da rade kako bi se postigli određeni zahtevi za smanjenje opterećenja definisani od strane korisnika. Odgovorna je za izdavanje komandi za otvaranje i zatvaranje ovih prekidača, shodno tome, osiguravajući preciznu kontrolu nad procesom smanjenja opterećenja. Simulator prekidača koji je povezan sa fizičkim opterećenjem može se kontrolisati pomoću GE Multilin F650 kontrolera. SCADA komunikacija između kontrolera i ADMS-a uspostavlja se preko DNP3 protokola. To znači da se fizičko opterećenje može povezati/isključiti na daljinu iz ADMS-a. Tokom eksperimenta, simulira se značajno preopterećenje. Aplikacija za smanjenje opterećenja iz ADMS-a pokreće se na tom delu mreže. Kao rezultat smanjenja opterećenja, pomenuti prekidač sa kontrolnom tačkom bio je prisutan na listi kandidata za prekidače. Kada je započelo izvršavanje smanjenja opterećenja, prekidači su se postepeno isključivali sa liste kandidata kako bi se postigao željeni nivo smanjenja opterećenja. U jednom trenutku, komanda za prebacivanje "otvori" poslata je GE Multilin F650 Bay kontroleru koji je poslao signal simulatoru prekidača (fizički uređaj) koji je promenio stanje sa zatvorenog na otvoreno i kao posledica toga, opterećenje je bilo isključeno.

B. Testiranje relejne zaštite

Struja koja teče kroz jednu od kritičnih grana mikromreže, izračunata korišćenjem HIL postavke u režimu povezivanja sa mikromreže sa distributivnom mrežom, generisani su koristeći HIL Connect uređaj. HIL Connect uređaj je povezan sa zaštitnim relejom, i generisani odgovori struje kvara su poslani releju. Na taj način, isti događaj simuliran korišćenjem modela iz HIL postavke ponovljen je, ali sada sa stvarnim strujama. Pošto je zaštita od prekomerne struje releja bila podešena na vremenski određenu karakteristiku sa podešavanjima od 2500A i 0.2s, relej je isključio prekidač, kako se očekivalo, jer je RMS vrednost bila 7924A u sve tri faze [19]. Ista procedura je ponovljena sa strujnim odgovorima dobijenim u režimu izolovanog rada, međutim, u ovom slučaju, relej se nije isključio jer je RMS vrednost tog strujnog odgovora bila 1808A u sve tri faze. Odnos vrednosti struje u grani od interesa za režim rada povezanog sa mrežom i izolovanog režima je $7924/1808 = 4.38$. Dakle, kada mikromreža pređe na izolovani režim, struja kvara na početku izvoda je 4.38 puta manja nego u režimu povezanom sa mrežom. Pošto mikromreža može u svakom trenutku preći sa povezanog na izolovani režim, neophodno je obezbediti adaptivno podešavanje zaštite. Implementacija adaptivne zaštite treba da uključuje dva skupa podešavanja zaštite koja bi se menjala u zavisnosti od stanja glavnog prekidača. Na primer, prilikom prebacivanja sa povezanog na izolovani režim, zaštita releja treba da promeni podešavanje zaštite tako da podešavanje koje odgovara izolovanom režimu postane aktivno i obrnuto. Ovo će biti jedan od budućih istraživačkih pravaca u Laboratoriji za pametne mreže.

4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad ističe značajne napretke postignute u razvoju i implementaciji Laboratorije za pametne mreže na Fakultetu tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, naglašavajući njegov višestruki doprinos kako akademskoj zajednici, tako i industriji. Integracija stvarne mikromreže u laboratorijsku postavku ukazuje na njegovu primenljivost u stvarnom svetu i ističe složenosti povezane sa takvim integracijama. Kroz predstavljene studije slučaja, demonstrirana je sposobnost laboratorijske postavke u simuliranju važnih scenarija rada mreže, uključujući svest o mreži putem ADMS-a i HIL-a, ručnu i automatsku kontrolu terenskih uređaja za postizanje različitih ciljeva, kao i složene analiza kratkih spojeva i relejne zaštite unutar mikromreže.

Konačno, rad naglašava značaj predstavljene laboratorijske postavke, kao ključnog alata za obuku studenata i istraživača u radu sa budućim pametnim mrežama. Takva laboratorijska postavka omogućava praktično iskustvo u najnovijim tehnologijama i pruža neophodne veštine za suočavanje sa izazovima koji donose pametne mreže.

5. 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”.

6. 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, pp. 710-725, 2016.
- [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, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843720.
- [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. Bahrnamirad, "State of the Art in Research on Microgrids: A Review," in IEEE Access, vol. 3, pp. 890-925, 2015.
- [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, USA, 2021, pp. 1-6.
- [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, pp. 197–211, 2022.
- [19] L. Strezoski, N. Simic, K.A. Loparo, "Development and Implementation of a Smart Grid Laboratory Testbed: Exploring Academic, Research, and Industrial Applications", In Review, 2024 IEEE PES General Meeting.