

# UPRAVLJANJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

---

**Poljak, Ante**

**Master's thesis / Specijalistički diplomski stručni**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split / Sveučilište u Splitu**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:228:455045>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-05**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of University Department of Professional Studies](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij elektrotehnike

**ANTE POLJAK**

**Z A V R Š N I R A D**

**UPRAVLJANJE ELEKTROENERGETSKOG  
SUSTAVA**

Split, lipanj 2023.

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE**

Specijalistički diplomski stručni studij elektrotehnike

**Predmet:** Elektroenergetski kabeli

**Z A V R Š N I R A D**

**Kandidat:** Ante Poljak

**Naslov rada:** Upravljanje elektroenergetskog sustava

**Mentor:** viši predavač, dipl.ing. Eduard Škec

Split, lipanj 2023.

# SADRŽAJ

SAŽETAK .....	3
1. UVOD.....	3
1.1. Kratki pregled teme.....	6
2. ELEKTROENERGETSKI SUSTAVI.....	7
2.1. Osnovni pojmovi.....	8
2.2. Vrste elektroenergetskih sustava.....	11
2.3. Funkcionalna struktura elektroenergetskog sustava .....	14
3. UPRAVLJANJE ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVOM.....	18
3.1. Uvod.....	18
3.2. Skladištenje energije .....	20
3.3. Planiranje, vođenje i nadzor sustava .....	23
3.4. Problemi u upravljanju elektroenergetskim sustavom.....	24
4. SUSTAV ZA NADZOR I UPRAVLJANJE (SCADA) .....	27
4.1. Osnovni pojmovi.....	28
4.2. Funkcionalnost SCADA sustava.....	28
4.3. Primjer implementacije SCADA sustava u Elektrodalmaciji Split .....	29
4.3.1. Automatizacija srednjenaponske mreže po dubini .....	32
5. REGULACIJA NAPONA I SNAGE.....	35
5.1. Regulacija napona .....	35

5.2. Regulacija snage .....	36
5.3. Regulacija napona i snage u elektroenergetskim sustavima .....	38
6. PRIMJENE NAPREDNIH TEHNOLOGIJA U UPRAVLJANJU ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA.....	40
6.1. Primjena naprednih algoritama u upravljanju elektroenergetskim sustavima .....	40
6.2. Primjena umjetne inteligencije u upravljanju elektroenergetskim sustavima.....	43
6.3. Primjena blockchain tehnologije u upravljanju elektroenergetskim sustavima.....	46
6.4. Primjena interneta stvari (IoT) u upravljanju elektroenergetskim sustavima.....	47
7. ZAKLJUČAK .....	50
LITERATURA .....	53
POPIS SLIKA .....	53

## SAŽETAK

### UPRAVLJANJE ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Ovaj završni rad predstavlja analizu upravljanja energijom, fokusirajući se na ulogu u različitim industrijama i sektorima. Rad istražuje prednosti i izazove povezane s praksama upravljanja energijom, kao što su energetska učinkovitost, obnovljiva energija i očuvanje energije. U radu se naglašavaju strategije za provedbu praksi održivog upravljanja energijom u različitim sektorima, uključujući industriju, građevinarstvo i transport, dok procjenjuje utjecaj vladinih politika, propisa i poticaja na usvajanje praksi održivog upravljanja energijom. Istraživanje pruža detaljan pregled trenutnog stanja praksi upravljanja energijom i njihove primjene u različitim industrijama. Studija doprinosi boljem razumijevanju praksi održivog upravljanja energijom i ima za cilj potaknuti njihovo usvajanje za održiviju budućnost. Osim toga, istraživanje istražuje primjenu naprednih tehnologija, uključujući napredne algoritme, umjetnu inteligenciju, blockchain tehnologiju i Internet stvari (IoT), u upravljanju energetske sustavima. Ovaj rad nudi sveobuhvatnu perspektivu praksi upravljanja energijom i njihovu važnost u promicanju održivog razvoja u različitim segmentima. Nalazi ovog istraživanja daju vrijedne uvide i preporuke za buduća istraživanja u navedenoj oblasti.

**Ključne riječi:** upravljanje energijom, održivi razvoj, obnovljivi izvori energije, energetska učinkovitost, napredne tehnologije.

## **SUMMARY**

### **POWER SYSTEM MANAGEMENT**

This paper presents an analysis of energy management, focusing on its role in different industries and sectors. The paper explores the benefits and challenges associated with energy management practices, such as energy efficiency, renewable energy and energy conservation. The paper highlights strategies for implementing sustainable energy management practices in various sectors, including industry, construction and transportation, while assessing the impact of government policies, regulations and incentives on the adoption of sustainable energy management practices. The research provides a detailed overview of the current state of energy management practices and their application in various industries. The study contributes to a better understanding of sustainable energy management practices and aims to encourage their adoption for a more sustainable future. In addition, the research explores the application of advanced technologies, including advanced algorithms, artificial intelligence, blockchain technology and the Internet of Things (IoT), in the management of energy systems. This paper offers a comprehensive perspective of energy management practices and their importance in promoting sustainable development in various segments. The findings of this research provide valuable insights and recommendations for future research in the aforementioned area.

**Keywords:** energy management, sustainable development, renewable energy sources, energy efficiency, advanced technologies.

## 1. UVOD

U modernom svijetu energija je ključna za održanje gospodarstva i poticanje ljudskog razvoja. Očekuje se da će rast stanovništva, gospodarski razvoj i urbanizacija nastaviti povećavati svjetsku potražnju za energijom. Međutim, ova sve veća potražnja za energijom ima značajne posljedice za okoliš, uključujući emisije stakleničkih plinova, onečišćenje zraka i iscrpljivanje prirodnih resursa. Posljedično, postoji sve veća potražnja za praksama održivog upravljanja energijom kako bi se riješili ti problemi. Ovaj završni rad ispituje gospodarenje energijom i njegovu ulogu u postizanju održivog razvoja. Ispitati će se definicija i značaj upravljanja energijom, zajedno s njegovim prednostima, izazovima i strategijama provedbe. Osim toga, dati će se pregled trenutnog stanja praksi gospodarenja energijom i njihove implementacije u različitim industrijama, kao što su industrija, strukture i transport. Osim toga, u radu će se raspravljati o ulozi vladinih politika, propisa i poticaja u poticanju usvajanja praksi održivog upravljanja energijom.

Nastojati će se dati sveobuhvatan pregled gospodarenja energijom i njegovu ulogu u postizanju održivog razvoja kao zaključak. Naglasit će prednosti, izazove i strategije provedbe praksi održivog upravljanja energijom te rasvijetliti njihovu primjenu u različitim industrijama. Kreatori politika, stručnjaci za upravljanje energijom i drugi dionici energetskog sektora zainteresirani za promicanje održivog razvoja smatrat će rezultate istraživanja korisnima.

Odabir teme upravljanja energijom i održivog razvoja motiviran je hitnom potrebom rješavanja ekoloških izazova koje nameće sve veća globalna potražnja za energijom. Korištenje fosilnih goriva uzrokovalo je značajne ekološke probleme kao što su klimatske promjene, onečišćenje zraka i iscrpljivanje prirodnih resursa. Kako bi se smanjili negativni učinci potrošnje energije i promicao održivi razvoj, ključno je istražiti i usvojiti prakse održivog upravljanja energijom.

Uz to, sve veća potražnja za energijom, za koju se predviđa da će nastaviti rasti zbog rasta stanovništva i gospodarskog razvoja, naglašava potrebu za održivim praksama upravljanja energijom. Međunarodna agencija za energiju (IEA) predviđa da će globalna potražnja za energijom porasti za 50 posto do 2050. godine, pri čemu će dvije trećine tog povećanja doći iz zemalja u razvoju (IEA, 2023.) .



Stoga je potrebno istražiti i primijeniti prakse održivog upravljanja energijom kako bi se zadovoljila rastuća potražnja za energijom uz minimaliziranje utjecaja na okoliš. Smanjenjem emisija stakleničkih plinova, onečišćenja zraka i iscrpljivanja resursa, prakse gospodarenja energijom kao što su energetska učinkovitost, obnovljiva energija i očuvanje energije mogu biti ključni u postizanju održivog razvoja.

Ovo su ciljevi ovog završnog rada:

- Detaljan opis gospodarenja energijom i njegovu ulogu u postizanju održivog razvoja
- Analizirati prednosti i poteškoće praksi upravljanja energijom, kao što su energetska učinkovitost, obnovljiva energija i očuvanje energije.
- Naglasiti strategije za provedbu praksi održivog upravljanja energijom u različitim sektorima, uključujući industriju, građevine i transport.
- Procijeniti utjecaj vladinih politika, propisa i poticaja na usvajanje praksi održivog upravljanja energijom.
- Opisati trenutno stanje praksi upravljanja energijom i njihove primjene u raznim industrijama.
- Doprinijeti trenutnom razumijevanju praksi održivog upravljanja energijom i potaknuti njihovo usvajanje za održiviju budućnost.

Cilj je pružiti sveobuhvatnu i pronicljivu analizu upravljanja energijom i njegove uloge u postizanju održivog razvoja postizanjem ovih ciljeva. Ovo istraživanje će kreatorima politika, stručnjacima za upravljanje energijom i drugim dionicima u energetske sektoru zainteresiranim za promicanje održivog razvoja pružiti vrijedne uvide u prednosti, izazove i strategije provedbe praksi održivog upravljanja energijom.

Struktura ovog završnog rada sastoji se od 8 poglavlja koja su organizirana logičnim slijedom kako bi pružila sveobuhvatnu analizu tematike upravljanja elektroenergetskim sustavom.

Prvo poglavlje, Uvod, daje čitatelju pregled rada, uključujući motivaciju za temu, ciljeve rada, kratak pregled teme i strukturu rada.

Poglavlje 2, Elektroenergetski sustavi, pokriva temeljne koncepte i elemente elektroenergetskih sustava, kao što su vrste elektroenergetskih sustava, njihova funkcionalna struktura i elementi koji sačinjavaju te sustave.

Poglavlje 3, Upravljanje energijom, pokriva upravljanje elektroenergetskim sustavima, uključujući skladištenje energije, planiranje, rad i kontrolu elektroenergetskih sustava, kao i probleme koji se javljaju pri upravljanju tim sustavima.

Poglavlje 4, Nadzorno upravljanje i prikupljanje podataka (SCADA), fokusirano je na osnovne koncepte SCADA sustava, njihovu funkcionalnost i primjenu u elektroenergetskim sustavima, kao i na primjeru njihove implementacije u HEP – ODS d.o.o. Elektrodalmaciji Split.

Poglavlje 5, Regulacija napona i snage, pokriva regulaciju napona i snage u elektroenergetskim sustavima.

Poglavlje 6, Napredne tehnologije u upravljanju elektroenergetskim sustavom, pokriva napredne tehnologije, kao što su napredni algoritmi, umjetna inteligencija, blockchain tehnologija i Internet stvari (IoT) i njihove primjene u elektroenergetskim sustavima.

Poglavlje 7, Pregled dosadašnjih radova na temi, daje pregled dosadašnjih radova na upravljanju elektroenergetskim sustavom i kritičku analizu postojećih rješenja.

Konačno, Poglavlje 8, Zaključak, sažima glavne nalaze rada, postizanje ciljeva rada i daje preporuke za buduća istraživanja na tom području. Rad završava dijelom s referencama, koji daje popis izvora korištenih u radu.

## 1.1. Kratki pregled teme

Svrha ovog poglavlja je dati pregled predmeta vođenja elektroenergetskog sustava. Ističe se značaj elektroenergetskih sustava u suvremenom društvu, njihove funkcije i utjecaj na okoliš.

Funkcija elektroenergetskih sustava u opskrbi električnom energijom kućanstava, poduzeća i industrije ključna je. Kompleksne mreže generatora, transformatora, prijenosnih vodova i distribucijskih mreža čine te sustave. Primarne funkcije elektroenergetskih sustava su učinkovita i pouzdana proizvodnja, prijenos i distribucija električne energije do potrošača.

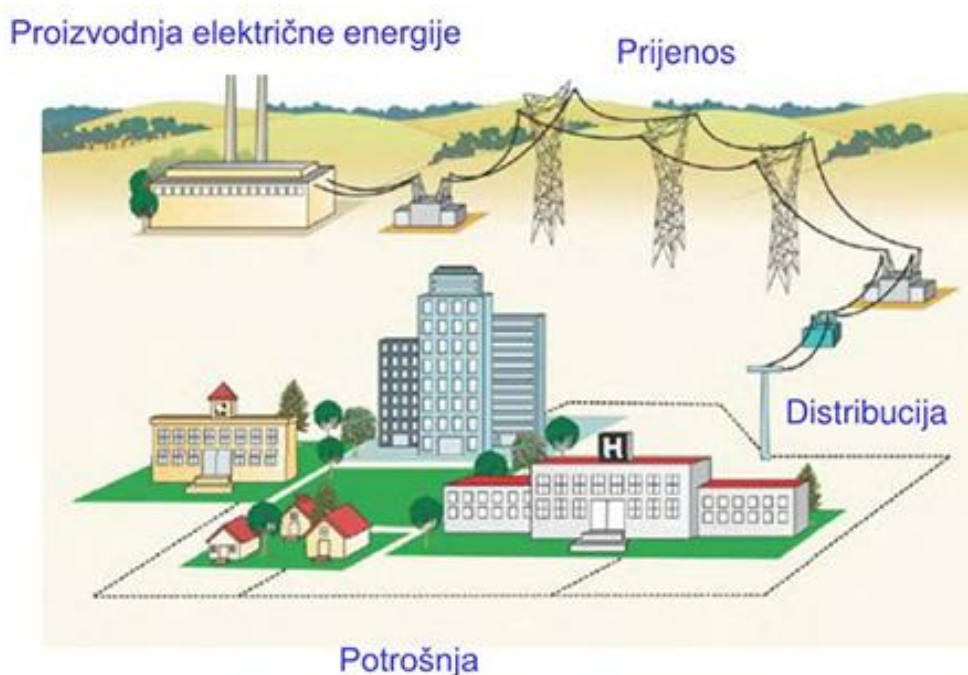
Međutim, proizvodnja i distribucija električne energije imaju značajan utjecaj na okoliš. Ispuštanje stakleničkih plinova u atmosferu izgaranjem fosilnih goriva u energetske postrojenjima pridonosi klimatskim promjenama. Osim toga, izgradnja dalekovoda i druge električne infrastrukture ima posljedice za okoliš, kao što su promjene u korištenju zemljišta i gubitak staništa. Sve veća važnost pridaje se upravljanju elektroenergetskim sustavima za rješavanje ovih problema. Učinkovito upravljanje zahtijeva usklađivanje potražnje za električnom energijom s dostupnom opskrbom uz smanjenje utjecaja na okoliš.

U ovom radu će se dati sveobuhvatna analiza upravljanja elektroenergetskim sustavima, uključujući temeljne koncepte, funkcije i elemente takvih sustava, kao i poteškoće koje su svojstvene njihovom upravljanju. Osim toga, istražiti će primjenu najsuvremenijih tehnologija, poput umjetne inteligencije, blockchaina i interneta stvari, u upravljanju elektroenergetskim sustavima.

## 2. ELEKTRONERGETSKI SUSTAVI

Energetski sustavi koji proizvode, prenose i šire električnu energiju igraju ključnu ulogu u suvremenom društvu. Složene mreže fizičkih, društvenih i ekonomskih sustava daju energiju za industrijske, komercijalne i stambene primjene. Ovo poglavlje će pokriti temeljne koncepte i komponente elektroenergetskih sustava. Ispitat će različite oblike elektroenergetskih sustava, njihove funkcionalne strukture i komponente koje čine te sustave.

Upravljanje proizvodnjom, distribucijom i potrošnjom električne energije zahtijeva sveobuhvatno poznavanje energetske sustava. Ovo poglavlje će pružiti pozadinske informacije potrebne za razumijevanje rada elektroenergetskih sustava, koji će biti detaljnije istraženi u sljedećim poglavljima.



**Slika 1.** Dijelovi elektroenergetskog sustava [2]

## 2.1. Osnovni pojmovi

Složeno i interdisciplinarno, proučavanje energetske sustava zahtijeva razumijevanje temeljnih načela koja upravljaju proizvodnjom, prijenosom i distribucijom električne energije. Ovo poglavlje će pružiti pregled temeljnih koncepata koji stoje u osnovi elektroenergetskih sustava, uključujući proizvodnju, distribuciju, prijenos i skladištenje energije.

Proces pretvaranja različitih oblika energije u električnu energiju poznat je kao proizvodnja električne energije. Fosilna goriva, nuklearna energija i obnovljivi izvori energije poput sunca, vjetrova i hidroelektrane najčešće su vrste energije koje se koriste za proizvodnju električne energije.

Fosilna goriva kao što su ugljen, nafta i prirodni plin i dalje su najpopularniji izvori energije za proizvodnju električne energije. Međutim, rastuća zabrinutost oko utjecaja fosilnih goriva na okoliš potaknula je prijelaz na obnovljive izvore energije poput sunca, vjetrova i hidroelektrane.

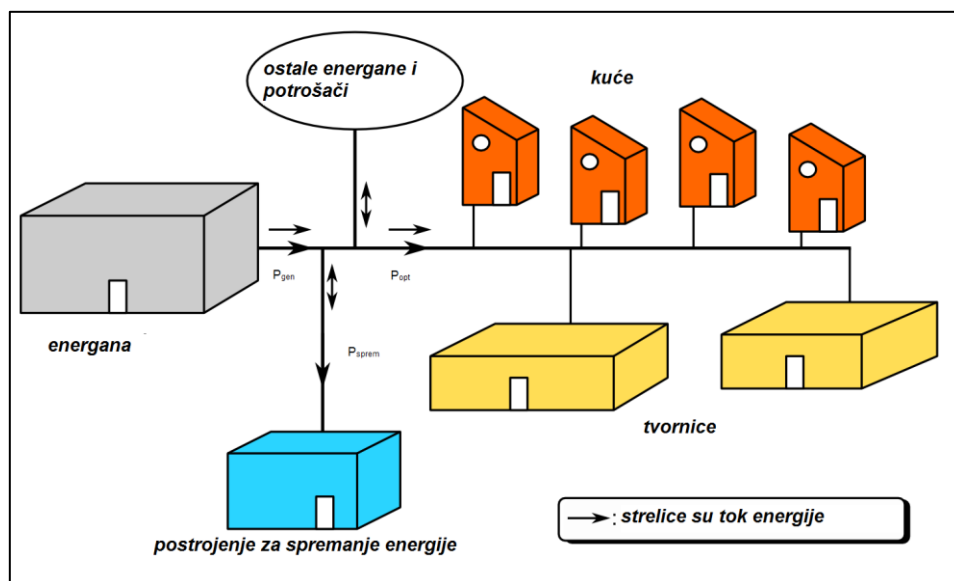
Zbog svoje održivosti i smanjenog utjecaja na okoliš, obnovljivi izvori energije postaju sve važniji u proizvodnji električne energije. Međunarodna agencija za energiju (IEA) predviđa da će do 2050. godine 85 posto globalne proizvodnje električne energije dolaziti iz obnovljivih izvora energije [1].

Nakon proizvodnje električne energije, ona se mora prenijeti i distribuirati do potrošača. Prijenos električne energije uključuje prijenos električne energije visokog napona na velike udaljenosti, obično visokonaponskim dalekovodima. Lokalne distribucijske mreže koriste se za prijenos električne energije niskog napona od visokonaponskih dalekovoda do individualnih potrošača.

Mreža prijenosa i distribucije električne energije zbog svoje složenosti zahtijeva sofisticirane sustave upravljanja i nadzora. SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sustavi koriste se za nadzor i upravljanje prijenosnom i distribucijskom mrežom. Ovi sustavi daju podatke o performansama mreže u stvarnom vremenu i omogućuju prepoznavanje i ispravljanje grešaka.

Skladištenje energije postaje sve važnija komponenta elektroenergetskih sustava. Svrha sustava za pohranu energije je pohraniti višak električne energije proizveden u vrijeme niske potražnje i isprazniti ga u vrijeme velike potražnje.

Najzastupljeniji oblik skladištenja energije u elektroenergetskim sustavima su baterije. Međutim, koriste se i druge metode skladištenja energije kao što su zamašnjaci, skladištenje energije komprimiranim zrakom i pumpano skladištenje hidroelektrane.



Slika 2. Spremanje električne energije [6]

Integracija sustava za pohranu energije s obnovljivim izvorima energije poput energije vjetera i sunca ključna je za dobivanje održivog i pouzdanog sustava električne energije. Sustavi za pohranu energije pomažu u ublažavanju varijabilnosti i isprekidanosti obnovljivih izvora energije, čime se poboljšava njihova integracija u mrežu.

Temeljni koncepti elektroenergetskih sustava uključuju skladištenje, proizvodnju, prijenos i distribuciju energije. Integracija obnovljivih izvora energije i sustava za pohranu energije ključna je za postizanje održivog i pouzdanog elektroenergetskog sustava. Pomak prema obnovljivim izvorima energije i sustavima za skladištenje energije rezultat je rastuće potražnje za električnom energijom i rastuće zabrinutosti oko utjecaja fosilnih goriva na okoliš.

Upravljanje opterećenjem bitna je komponenta elektroenergetskih sustava. Upravljanje opterećenjem je regulacija potražnje električne energije radi održavanja pouzdanosti elektroenergetske mreže.

Tijekom dana postoje razdoblja intenzivne potražnje i razdoblja minimalne potražnje. Upravljanje potražnjom za električnom energijom ključno je za osiguranje stabilnosti elektroenergetskog sustava tijekom razdoblja najveće potražnje.

Upravljanje opterećenjem može se postići različitim sredstvima, kao što su programi za odgovor na potražnju, cijene prema vremenu korištenja i integracija sustava za pohranu energije.

Stupanj električne energije isporučene potrošačima naziva se kvalitetom električne energije. Neodgovarajuća kvaliteta električne energije može uzrokovati oštećenje električne opreme, smanjenje produktivnosti i povećanje troškova energije.

Fluktuacije napona, padovi i porasti napona te harmonijska izobličenja primarni su čimbenici koji utječu na kvalitetu električne energije. Oscilacije napona mogu biti uzrokovane varijacijama u zahtjevima elektroenergetskog sustava, dok padove i udare napona mogu uzrokovati kvarovi na prijenosnoj i distribucijskoj mreži. Korištenje nelinearnih ulaza, poput računala i drugih elektroničkih uređaja, može uzrokovati harmonijsko izobličenje.

Upravljanje kvalitetom električne energije bitno je za učinkovit i pouzdan rad elektroenergetskih sustava. Korištenje regulatora napona, harmoničkih filtara i drugih uređaja za kondicioniranje energije može poboljšati kvalitetu električne energije.

Elektroenergetski sustavi moraju dati prednost energetskej učinkovitosti. Povećanje energetske učinkovitosti može smanjiti potrošnju energije, troškove energije, emisije stakleničkih plinova i druge negativne utjecaje na okoliš.

Energetska učinkovitost može se postići na više načina, uključujući ugradnju energetske učinkovite rasvjete, uređaja i opreme, kao i sustava upravljanja energijom i automatizacije zgrada.

Integracija obnovljivih izvora energije i sustava za pohranu energije još je jedan ključni aspekt energetske učinkovitosti. Integracija obnovljivih izvora energije i sustava za pohranu energije može pomoći u smanjenju troškova energije i emisija stakleničkih plinova smanjenjem potražnje električne energije iz mreže.

Proizvodnja, prijenos i distribucija energije, kao i skladištenje energije, upravljanje potražnjom, kvaliteta električne energije i energetska učinkovitost temeljni su koncepti elektroenergetskih sustava. Ove su ideje bitne za postizanje održivog i pouzdanog elektroenergetskog sustava koji može zadovoljiti sve veću potražnju za električnom energijom, a istovremeno minimalizirati utjecaj fosilnih goriva na okoliš.

## **2.2. Vrste elektroenergetskih sustava**

Elektroenergetski sustavi su ključni za učinkovitu i pouzdanu isporuku električne energije od izvora do potrošača. Oni obuhvaćaju različite komponente, kao što su generatori, transformatori, dalekovodi i distribucijske mreže, koje rade usklađeno kako bi osigurale stalnu opskrbu električnom energijom. Elektroenergetski sustavi mogu se klasificirati u nekoliko tipova na temelju faktora kao što su izvori proizvodnje, geografski opseg i arhitektura mreže. Ovo poglavlje ima za cilj pružiti pregled različitih vrsta elektroenergetskih sustava i njihovih karakteristika.

Centralizirane elektroenergetske sustave, poznate i kao konvencionalni elektroenergetski sustavi, karakteriziraju velika postrojenja za proizvodnju električne energije koja proizvode električnu energiju na središnjoj lokaciji, obično daleko od krajnjih potrošača. Proizvedena energija se zatim prenosi na velike udaljenosti visokonaponskim dalekovodima i konačno distribuira krajnjim korisnicima putem lokalnih distribucijskih mreža.[8]

Centralizirani elektroenergetski sustavi bili su dominantan oblik elektroenergetskog sustava desetljećima i nastavljaju igrati značajnu ulogu u zadovoljavanju globalne potražnje za energijom. Općenito se oslanjaju na fosilna goriva, kao što su ugljen, prirodni plin i nafta, kao i na nuklearnu i hidropotencijal za proizvodnju električne energije. Centralizirani elektroenergetski sustavi mogu postići ekonomiju razmjera i opskrbiti strujom velika



geografska područja. Međutim, također imaju velike gubitke u prijenosu i distribuciji, utjecaja na okoliš i nedostatka otpornosti na lokalne poremećaje [8].

Decentralizirani elektroenergetski sustavi, također su poznati kao distribuirani energetske resursi (DER), uključuju proizvodnju električne energije bliže točki potrošnje integracijom manjih izvora električne energije. DER-ovi uključuju obnovljive izvore energije kao što su solarni fotonaponski (eng. Photovoltaics - PV) paneli, vjetroturbine i male hidroelektrane, kao i neobnovljive izvore poput turbina na prirodni plin i dizelskih generatora [3].

Decentralizirani elektroenergetski sustavi nude nekoliko prednosti u odnosu na centralizirane sustave, uključujući smanjene gubitke u prijenosu i distribuciji, povećanu pouzdanost i otpornost sustava te potencijal manjeg utjecaja na okoliš. Oni također mogu olakšati integraciju varijabilnih obnovljivih izvora energije, kao što su solarna energija i energija vjetra, u mrežu i podržati prijelaz na energetske sustav s niskim udjelom ugljika. Međutim, decentralizirani elektroenergetski sustavi predstavljaju izazove vezane uz stabilnost mreže, kontrolu i koordinaciju, kao i povećanu složenost u planiranju i radu sustava [3].

Mikromreže su lokalizirani elektroenergetski sustavi koji mogu raditi neovisno ili u koordinaciji s glavnom mrežom, pružajući povećanu fleksibilnost i kontrolu nad proizvodnjom, skladištenjem i potrošnjom električne energije. Obično se sastoje od distribuiranih izvora proizvodnje, sustava za pohranu energije i kontroliranih opterećenja, kojima upravlja lokalni kontroler koji može optimizirati rad mikromreže na temelju čimbenika kao što su potražnja za električnom energijom, proizvodni kapacitet i uvjeti mreže.

Mikromreže mogu ponuditi nekoliko prednosti, poput poboljšane pouzdanosti, elastičnosti i energetske učinkovitosti, kao i smanjenog utjecaja na okoliš. Mogu biti osobito korisni u udaljenim i ruralnim područjima s ograničenim pristupom glavnoj mreži, kao i u urbanim sredinama gdje mogu podržati kritičnu infrastrukturu tijekom prekida mreže. Međutim, mikromreže također predstavljaju izazove povezane s njihovom integracijom s glavnom mrežom, zahtjevima za upravljanjem i komunikacijom te potrebom za učinkovitim regulatornim okvirima i tržišnim mehanizmima koji bi olakšali njihovu široku primjenu [9].

Nanomreže predstavljaju još manju skalu elektroenergetskih sustava, koji obično opslužuju pojedinačne zgrade, domove ili male zajednice. Karakterizira ih minimalan broj izvora

proizvodnje i opterećenja, obično se oslanjaju na obnovljive izvore energije, kao što su solarni PV paneli ili male vjetroturbine, u kombinaciji sa sustavima za pohranu energije poput baterija ili gorivih ćelija. Nanomreže mogu raditi neovisno ili biti integrirane u veću mikromrežu ili glavnu mrežu.

Nanomreže mogu pružiti nekoliko prednosti, uključujući povećanu energetska učinkovitost, smanjene emisije stakleničkih plinova i povećanu energetska neovisnost za krajnje korisnike. Oni također mogu podržati razvoj održivijih, otpornijih i učinkovitijih zgrada i zajednica. Međutim, slično mikromrežama, nanomreže se suočavaju s izazovima povezanim s njihovom integracijom s glavnom mrežom, zahtjevima za upravljanjem i komunikacijom te potrebom za odgovarajućim regulatornim okvirima i tržišnim mehanizmima koji bi podržali njihovu implementaciju [9].

Izvanmrežni sustavi odnose se na elektroenergetske sustave koji nisu povezani s većom središnjom mrežom, obično opslužuju udaljene ili izolirane zajednice bez pristupa glavnoj mreži. Ovi se sustavi mogu oslanjati na jedan izvor proizvodnje energije ili kombinaciju izvora, uključujući tehnologije obnovljive energije poput solarne PV, vjetroelektrane ili male hidroelektrane, kao i neobnovljive izvore poput dizelskih generatora. Sustavi za pohranu energije, poput baterija, također se mogu integrirati u sustave izvan mreže kako bi se osigurala pouzdana opskrba električnom energijom.

Izvanmrežni sustavi mogu pružiti osnovne energetske usluge udaljenom i nedovoljno opskrbljenom stanovništvu, pridonoseći poboljšanim životnim uvjetima, gospodarskom razvoju i društvenom blagostanju. Oni također mogu podržati globalnu tranziciju prema održivijim i decentraliziranijim energetska sustavima. Međutim, izvanmrežni sustavi mogu se suočiti s izazovima povezanim s visokim troškovima instalacije, rada i održavanja, kao i potrebom za izgradnjom kapaciteta, razvojem lokalnih vještina i učinkovitim političkim okvirima za podršku njihovoj implementaciji i održivosti [13].

Elektroenergetski sustavi mogu se klasificirati u nekoliko tipova na temelju faktora kao što su izvori proizvodnje, geografski opseg i arhitektura mreže. Centralizirani elektroenergetski sustavi, koje karakteriziraju velika postrojenja za proizvodnju električne energije, već su desetljećima dominantan oblik elektroenergetskog sustava. Međutim, sve veća primjena decentraliziranih energetska sustava, mikromreža, nanomreža i izvanmrežnih sustava

transformira energetska krajolika, nudeći nove mogućnosti i izazove za učinkovito i održivo upravljanje elektroenergetskim sustavima.

### **2.3. Funkcionalna struktura elektroenergetskog sustava**

Elektroenergetski sustav složena je mreža međusobno povezanih komponenti koje zajedno stvaraju, prenose i distribuiraju električnu energiju od izvora do krajnjih korisnika. Funkcionalna struktura elektroenergetskog sustava može se podijeliti u tri glavne faze: proizvodnja električne energije, prijenos električne energije i distribucija električne energije [9]. Ovo poglavlje pružit će pregled funkcionalne strukture elektroenergetskih sustava, fokusirajući se na uloge i odgovornosti svake faze i uključene ključne komponente.

Proizvodnja električne energije je proces pretvaranja primarnih izvora energije, kao što su fosilna goriva, nuklearno gorivo ili obnovljivi izvori energije, u električnu energiju. Izbor primarnog izvora energije i vrste tehnologije proizvodnje električne energije ovisi o čimbenicima kao što su dostupnost resursa, trošak, učinkovitost i ekološka razmatranja [13].

Postrojenja za proizvodnju električne energije mogu se općenito kategorizirati u dvije vrste: konvencionalna i obnovljiva. Konvencionalne elektrane oslanjaju se na fosilna goriva (ugljen, naftu ili prirodni plin) ili nuklearnu energiju za proizvodnju električne energije i uključuju tehnologije kao što su parne turbine, plinske turbine i elektrane s kombiniranim ciklusom. Postrojenja za proizvodnju obnovljive energije, s druge strane, koriste prirodne resurse poput sunca, vjetra, vode, geotermalne energije i energije biomase za proizvodnju električne energije koristeći tehnologije poput solarnih fotonaponskih (PV) panela, vjetroturbina i hidroelektričnih turbina [11]

Objekti za proizvodnju električne energije mogu varirati u veličini i kapacitetu, u rasponu od velikih centraliziranih postrojenja do malih decentraliziranih i distribuiranih izvora proizvodnje. Ovisno o vrsti i veličini postrojenja za proizvodnju električne energije, proizvedena električna energija se ili izravno dovodi u prijenosni sustav ili se preko transformatora povezuje s distribucijskom mrežom [7].

Prijenos električne energije odnosi se na proces prijenosa električne energije visokog napona od postrojenja za proizvodnju električne energije do trafostanica smještenih u blizini centara

potražnje. Primarna svrha prijenosnog sustava je osigurati učinkovit i pouzdan prijenos električne energije na velike udaljenosti uz minimiziranje gubitaka [9].

Prijenosne mreže sastoje se od visokonaponskih dalekovoda, trafostanica i transformatora koji međusobno povezuju objekte za proizvodnju električne energije s distribucijskim mrežama. Prijenosni vodovi su obično nadzemni vodovi ili podzemni kabeli dizajnirani za prijenos električne energije na naponima u rasponu od 69 kV do 765 kV.

Trafostanice igraju ključnu ulogu u prijenosnom sustavu, obavljajući funkcije kao što su transformacija napona, preklapanje i zaštita. Transformatori smješteni u trafostanicama odgovorni su za pretvaranje visokog napona prenesene električne energije u niže napone pogodne za distribuciju krajnjim korisnicima [8].



**Slika 3.** Trafostanica 110/20 kV – HEP ODS d.o.o.

Distribucija električne energije je posljednja faza u elektroenergetskom sustavu, odgovorna za isporuku električne energije od trafostanica do krajnjih korisnika, uključujući stambene, komercijalne i industrijske potrošače. Primarna funkcija distribucijskog sustava je osigurati pouzdanu i sigurnu opskrbu potrošača električnom energijom na odgovarajućim naponskim razinama.

Distribucijske mreže sastoje se od dalekovoda nižeg napona, distribucijskih transformatora i raznih sklopnih i zaštitnih uređaja koji povezuju trafostanice s pojedinačnim potrošačima. Distribucijski vodovi mogu biti nadzemni ili podzemni. Distribucijski transformatori pretvaraju napon električne energije primljen iz prijenosnog sustava na još niže razine pogodne za potrošnju krajnjeg korisnika [8].

Uz tri primarna stupnja elektroenergetskog sustava, postoje i druge ključne komponente i funkcije potrebne za učinkovit i pouzdan rad sustava. To uključuje:

- Operacije i kontrola sustava
- Zaštita i pouzdanost mreže.

Operacije i kontrola sustava: obuhvaćaju praćenje, koordinaciju i upravljanje sustavima za proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije u stvarnom vremenu kako bi se održala stabilnost, pouzdanost i učinkovitost mreže. Operatori sustava odgovorni su za osiguravanje kontinuirane ravnoteže između ponude i potražnje električne energije, upravljanje zagušenjem prijenosnog sustava i koordinaciju rada postrojenja za proizvodnju električne energije i drugih resursa mreže. Operacije i kontrola sustava oslanjaju se na napredne tehnologije komunikacije i upravljanja, kao što su sustavi nadzorne kontrole i prikupljanja podataka (SCADA), sustavi upravljanja energijom (EMS) i sustavi upravljanja distribucijom (DMS), za prikupljanje, analizu i dijeljenje informacija u stvarnom vremenu o statusu elektroenergetskog sustava i podržavaju procese donošenja odluka.

Zaštita i pouzdanost mreže: Zaštita i pouzdanost mreže uključuje implementaciju različitih uređaja, strategija i propisa kako bi se osigurao siguran i neprekidan rad elektroenergetskih

sustava u slučaju poremećaja ili kvarova. Zaštitni uređaji, kao što su prekidači strujnog kruga, osigurači i releji, dizajnirani su za otkrivanje i izolaciju kvarova, sprječavanje oštećenja opreme i minimiziranje prekida usluge. Pouzdanost mreže kritičan je aspekt elektroenergetskih sustava jer izravno utječe na kvalitetu opskrbe električnom energijom i zadovoljstvo potrošača. Održavanje pouzdanosti mreže zahtijeva kontinuirano ulaganje u infrastrukturu, kao i razvoj i provedbu standarda i propisa koji reguliraju planiranje, projektiranje i rad elektroenergetskih sustava [7].

Funkcionalna struktura elektroenergetskih sustava može se podijeliti u tri glavne faze: proizvodnja električne energije, prijenos električne energije i distribucija električne energije. Svaki stupanj ima specifične uloge, odgovornosti i komponente koje osiguravaju učinkovitu i pouzdanu pretvorbu, transport i isporuku električne energije od proizvodnih izvora do krajnjih korisnika. Dodatne funkcije, kao što su rad i kontrola sustava te zaštita i pouzdanost mreže, također su bitne za ukupnu izvedbu i stabilnost elektroenergetskog sustava.

Razumijevanje funkcionalne strukture elektroenergetskih sustava ključno je za učinkovito upravljanje i rad tih sustava, kao i za razvoj novih tehnologija i strategija usmjerenih na poboljšanje njihove učinkovitosti, održivosti i otpornosti u suočavanju s rastućim energetske potrebama i izazovima.

### **3. UPRAVLJANJE ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVOM**

U ovom poglavlju istražiti ćemo različite aspekte upravljanja energetske sustavom, uključujući upravljanje elektroenergetskim sustavima, skladištenje energije, planiranje sustava, rad i upravljanje te izazove povezane s upravljanjem elektroenergetskim sustavima. Rasprava će pružiti dubinsko razumijevanje metoda, tehnologija i strategija koje se koriste u upravljanju energetske sustavom kako bi se osigurala učinkovita, pouzdana i održiva isporuka energije kako bi se zadovoljili rastući zahtjevi modernog svijeta.

#### **3.1. Uvod**

Upravljanje elektroenergetskim sustavima je složen i multidisciplinarni proces koji obuhvaća različite aspekte, kao što su planiranje sustava, rad i upravljanje, kako bi se osigurala učinkovita, pouzdana i održiva isporuka električne energije. U ovom odjeljku raspravljat će se o ključnim aspektima upravljanja elektroenergetskim sustavom te metodama i tehnologijama koje se koriste za rješavanje izazova povezanih s tim [14].

Planiranje sustava uključuje projektiranje i razvoj infrastrukture za proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije kako bi se zadovoljile sadašnje i buduće energetske potrebe. Planeri moraju uzeti u obzir čimbenike kao što su rast opterećenja, tehnološki napredak, ekonomska i regulatorna ograničenja i zabrinutost za okoliš kako bi razvili robusna i troškovno učinkovita rješenja.

Rad sustava odnosi se na upravljanje energetske resursima u stvarnom vremenu kako bi se održala stalna ravnoteža između ponude i potražnje električne energije, osiguravajući stabilnost mreže i minimizirajući gubitke u sustavu. Operatori sustava odgovorni su za praćenje stanja sustava, koordinaciju rada jedinica za proizvodnju električne energije i mrežnih resursa te provedbu korektivnih radnji kao odgovor na poremećaje sustava [8]

Upravljanje sustavom obuhvaća primjenu različitih upravljačkih strategija i tehnika za održavanje stabilnosti, pouzdanosti i učinkovitosti elektroenergetskih sustava. To uključuje kontrolu napona i frekvencije, upravljanje reaktivnom snagom i analizu nepredviđenih situacija i odgovor.

Upravljanje elektroenergetskim sustavima suočava se s brojnim izazovima, poput povećanja potražnje za energijom, starenja infrastrukture, integracije obnovljivih izvora energije i rastuće složenosti modernih elektroenergetskih sustava. Ovi izazovi zahtijevaju inovativna rješenja, tehnologije i strategije za poboljšanje učinkovitosti, pouzdanosti i održivosti elektroenergetskih sustava.

Jedan od glavnih izazova je integracija obnovljivih izvora energije, kao što su solarna energija i energija vjetra, koji imaju promjenjive i povremene izlazne karakteristike. To zahtijeva napredne tehnike upravljanja i optimizacije, kao i rješenja za pohranu energije, kako bi se održala stabilnost mreže [14].

Infrastruktura koja stari još je jedan značajan izazov koji dovodi do povećanih gubitaka sustava i smanjene pouzdanosti. Rješavanje ovog problema zahtijeva nadogradnju infrastrukture, zamjenu i modernizaciju, kao i napredne strategije upravljanja imovinom.

Rastuća složenost modernih elektroenergetskih sustava, potaknuta proliferacijom distribuiranih energetske resursa (DER) i tehnologija pametnih mreža, također predstavlja izazov za upravljanje elektroenergetskim sustavom. To zahtijeva usvajanje naprednih alata za modeliranje, simulaciju i analizu, kao i inovativne tehnologije upravljanja i komunikacije [8].

Upravljanje elektroenergetskim sustavom je složen proces koji obuhvaća planiranje, rad i upravljanje sustavom. Rješavanje izazova povezanih s upravljanjem elektroenergetskim sustavom zahtijeva inovativna rješenja, tehnologije i strategije koje poboljšavaju performanse i otpornost elektroenergetskih sustava u suočavanju s rastućim energetske potrebama i izazovima.





**Slika 4.** Nacionalni dispečerski centar - HOPS

### **3.2. Skladištenje energije**

Skladištenje energije ima ključnu ulogu u upravljanju elektroenergetskim sustavima, jer omogućuje veću fleksibilnost i pouzdanost u radu mreže. Integracija obnovljivih izvora energije, poput sunca i vjetra, uvodi varijabilnost i isprekidanost u opskrbu električnom energijom, što predstavlja izazove za održavanje stabilnosti sustava i uravnoteženje ponude i potražnje [15]. Sustavi za pohranu energije mogu pomoći u rješavanju ovih izazova pohranjivanjem viška energije kada je dostupna i otpuštanjem kada je to potrebno, čime se poboljšava stabilnost mreže, učinkovitost i ukupna izvedba sustava [16]. U ovom odjeljku raspravljat će se o različitim tehnologijama pohrane energije i njihovim primjenama u elektroenergetskim sustavima.

Postoji nekoliko dostupnih tehnologija za pohranu energije, svaka sa svojim jedinstvenim karakteristikama, prednostima i nedostacima. Neke od najčešćih tehnologija za pohranu energije uključuju:

- Pumpna hidro akumulacija (PHS)
- Skladištenje energije komprimiranim zrakom (CAES)
- Sustavi za pohranu energije iz baterija (BESS)
- Pohrana energije na zamašnjaku (FES)

pumpna hidro akumulacija (PHS) najraširenija je i najzrelija tehnologija skladištenja energije, koja čini preko 95% globalnog kapaciteta skladištenja energije. PHS sustavi pohranjuju energiju pumpanjem vode iz nižeg rezervoara u viši rezervoar kada ima struje u izobilju, a zatim otpuštanjem pohranjene vode kroz turbinu za proizvodnju električne energije kada je potražnja velika [15].

Skladištenje energije komprimiranim zrakom (CAES): CAES sustavi skladište energiju komprimiranjem zraka u podzemnim pećinama ili drugim skladišnim objektima, a zatim otpuštanjem komprimiranog zraka kroz turbinu za proizvodnju električne energije kada je to potrebno. CAES sustavi imaju veliki kapacitet pohrane energije i relativno niske kapitalne troškove, što ih čini prikladnima za velike primjene pohrane energije [16].

Sustavi za pohranu energije iz baterija (BESS): Sustavi za pohranu energije iz baterija koriste elektrokemijske procese za pohranjivanje i oslobađanje energije, što ih čini vrlo učinkovitima i sposobnima za brzo vrijeme odziva. Litij-ionske baterije su baterijska tehnologija koja se najčešće koristi za pohranu energije zbog svoje visoke gustoće energije, dugog vijeka trajanja i nižih troškova. Druge tehnologije baterija, kao što su olovno-kisele, natrij-sumporne i protočne baterije, također imaju primjenu u elektroenergetskim sustavima [16].

Pohrana energije na zamašnjaku (FES): Sustavi za pohranu energije na zamašnjaku pohranjuju energiju u obliku rotacijske kinetičke energije pomoću rotora koji se okreće. Kada je potrebna energija, kinetička energija rotora pretvara se natrag u električnu energiju putem generatora. FES sustavi imaju visoku gustoću snage, brzo vrijeme odziva i dug životni ciklus, što ih čini prikladnima za kratkoročno skladištenje energije i aplikacije za kvalitetu električne energije [15].

Skladištenje toplinske energije (TES): Sustavi za skladištenje toplinske energije pohranjuju energiju u obliku topline ili hladnoće, koja se kasnije može pretvoriti u električnu energiju pomoću termodinamičkih procesa. TES sustavi mogu se koristiti i za kratkoročne i za dugoročne aplikacije za pohranjivanje energije i obično se koriste u kombinaciji s postrojenjima za koncentriranu solarnu energiju (CSP) za pohranu i otpremu solarne energije [16].

Sustavi za pohranu energije imaju različite primjene u elektroenergetskim sustavima, uključujući:

- Niveliranje opterećenja i smanjivanje vršne potrošnje
- Integracija obnovljivih izvora energije
- Pomoćne usluge
- Distribuirana pohrana energije
- Mikromreže i otočni sustavi

Niveliranje opterećenja i smanjivanje vršne potrošnje: Sustavi za pohranu energije mogu se koristiti za pohranjivanje viška energije tijekom razdoblja niske potražnje i oslobađanje tijekom razdoblja velike potražnje, učinkovito izravnavajući opterećenje i smanjujući potrebu za skupim vršnim elektranama [16].

Integracija obnovljivih izvora energije: Sustavi za pohranu energije mogu pomoći u ublažavanju varijabilnosti i isprekidanosti obnovljivih izvora energije pohranjivanjem viška energije kada je dostupna i otpuštanjem kada je to potrebno, čime se poboljšava pouzdanost i stabilnost mreže [15].

Pomoćne usluge: Sustavi za pohranu energije mogu pružiti različite pomoćne usluge mreži, kao što su regulacija frekvencije, kontrola napona i rezerva vrtnje, koje su ključne za održavanje stabilnosti i pouzdanosti sustava [16].

Distribuirana pohrana energije: Distribuirani sustavi pohrane energije, kao što su sustavi za pohranu baterije, mogu se instalirati na razini krajnjeg korisnika kako bi se osiguralo rezervno napajanje, poboljšala kvaliteta energije i smanjila vršna potražnja, čime se povećava ukupna učinkovitost i otpornost mreže [15].

Mikromreže i otočni sustavi: Sustavi za pohranu energije mogu igrati ključnu ulogu u radu mikromreža i otočnih sustava, osiguravajući pouzdanu opskrbu električnom energijom i olakšavajući integraciju obnovljivih izvora energije [16].

Sustavi za pohranu energije ključni su za učinkovito upravljanje elektroenergetskim sustavima, budući da pružaju fleksibilnost, pouzdanost i otpornost u suočavanju sa sve većom integracijom obnovljivih izvora energije i rastućim izazovima mreže. Različite tehnologije pohrane energije, kao što su pumpano hidro pohranjivanje, pohranjivanje energije komprimiranim zrakom, baterijski sustavi pohranjivanja energije, pohranjivanje energije na zamašnjaku i pohranjivanje toplinske energije, nude jedinstvene mogućnosti i prednosti koje se mogu iskoristiti za poboljšanje performansi i održivosti elektroenergetskih sustava.

### **3.3. Planiranje, vođenje i nadzor sustava**

Učinkovito planiranje, rad i upravljanje elektroenergetskim sustavima ključni su za osiguranje pouzdane i učinkovite isporuke električne energije, kao i za održavanje stabilnosti i sigurnosti sustava. To uključuje donošenje strateških odluka o proizvodnji, prijenosu i distribuciji električne energije, kao i integraciji obnovljivih izvora energije i sustava za pohranu energije [17].

Planiranje u elektroenergetskim sustavima uključuje dugoročne aktivnosti kao što su proširenje kapaciteta, planiranje prijenosne mreže i integracija obnovljivih izvora energije, kao i kratkoročne aktivnosti kao što su predviđanje opterećenja, predanost jedinica i ekonomično otpremanje. Ove aktivnosti planiranja imaju za cilj optimizirati performanse sustava, minimizirati troškove i ispuniti regulatorne zahtjeve, uzimajući u obzir neizvjesnosti i potencijalne nepredviđene situacije [17].

Rad elektroenergetskih sustava uključuje praćenje i upravljanje različitim komponentama sustava u stvarnom vremenu, kao što su generatori, transformatori i prekidači, kako bi se održao protok snage, razine napona i frekvencija unutar prihvatljivih granica. Napredni sustavi upravljanja, kao što su sustavi nadzorne kontrole i prikupljanja podataka (SCADA) i

sustavi upravljanja energijom (EMS), koriste se za prikupljanje podataka u stvarnom vremenu i olakšavanje donošenja odluka u radu elektroenergetskih sustava.

Strategije upravljanja u elektroenergetskim sustavima uključuju primarnu regulaciju, koja uključuje lokalne i automatske odgovore na odstupanja frekvencije, i sekundarnu regulaciju, koja je usmjerena na centralizirano upravljanje proizvodnjom i prijenosom električne energije radi održavanja ravnoteže frekvencije i snage. Tercijarna kontrola, također poznata kao optimalna kontrola protoka energije, ima za cilj optimizirati ukupnu učinkovitost sustava prilagodbom parametara proizvodnje i prijenosa energije.

Ukratko, planiranje, rad i kontrola ključni su aspekti upravljanja elektroenergetskim sustavima, osiguravajući pouzdanu i učinkovitu isporuku energije uz održavanje stabilnosti i sigurnosti sustava. Ove aktivnosti uključuju donošenje strateških odluka, nadzor i kontrolu komponenti sustava u stvarnom vremenu i implementaciju različitih strategija upravljanja za optimizaciju performansi sustava[17].

### **3.4. Problemi u upravljanju elektroenergetskim sustavom**

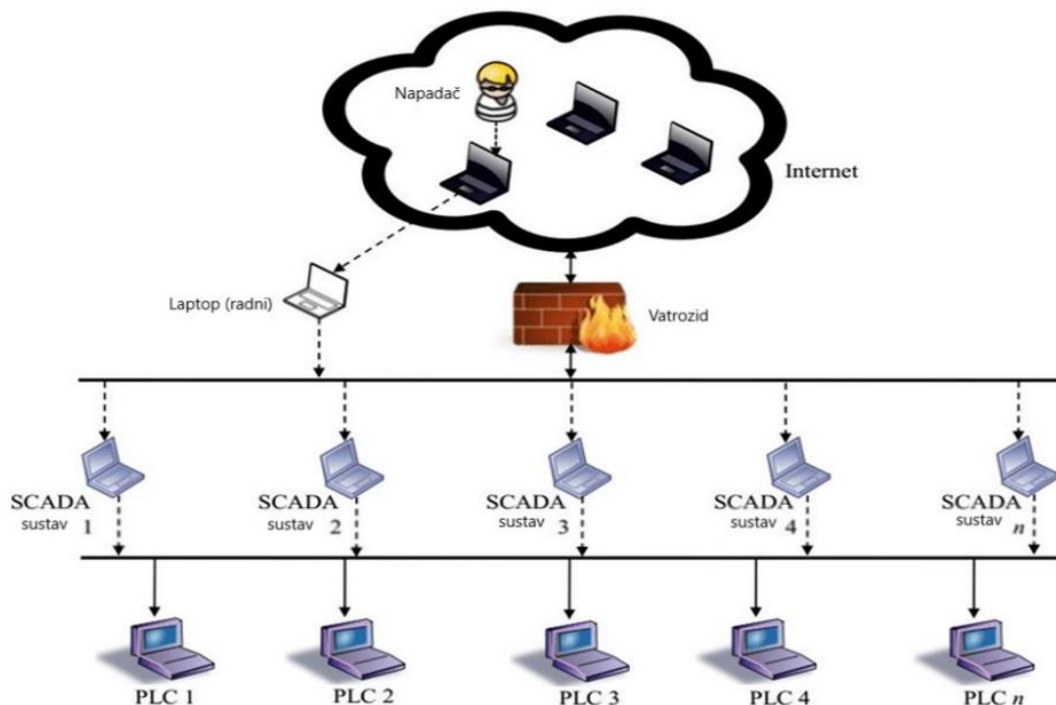
Upravljanje elektroenergetskim sustavima postaje sve složenije zbog raznih čimbenika kao što su integracija obnovljivih izvora energije, napredak tehnologije i razvoj regulatornih okvira. U ovom odjeljku ukratko se govori o nekim od ključnih izazova s kojima se suočava upravljanje elektroenergetskim sustavom.

Integracija obnovljivih izvora energije: Sve veći prodor obnovljivih izvora energije, poput sunca i vjetra, uvodi varijabilnost i povremenost u opskrbu električnom energijom, postavljajući izazove za održavanje stabilnosti sustava i uravnoteženje ponude i potražnje [15]. Učinkovita integracija obnovljive energije zahtijeva napredne tehnike predviđanja, sustave za pohranu energije i fleksibilne strategije upravljanja mrežom.

Starenje infrastrukture: Mnogi elektroenergetski sustavi diljem svijeta suočavaju se s izazovima povezanim sa starenjem infrastrukture, što dovodi do povećanog rizika od kvara opreme, prekida napajanja i smanjene pouzdanosti sustava. Nadogradnja i modernizacija

infrastrukture, kao i provedba proaktivnih strategija održavanja i upravljanja imovinom, ključni su za rješavanje ovog izazova [20].

Kibernetička sigurnost: Sve veća digitalizacija i međusobna povezanost elektroenergetskih sustava čini ih ranjivijima na kibernetičke napade, što predstavlja značajnu prijetnju sigurnosti, pouzdanosti i privatnosti sustava [26]. Razvijanje snažnih mjera kibernetičke sigurnosti i implementacija najboljih praksi za informacijsku sigurnost ključni su za zaštitu elektroenergetskih sustava od potencijalnih kibernetičkih prijetnji.



**Slika 5.** Primjer kibernetičkog napada na SCADA sustav [18]

Regulatorni i tržišni izazovi: Elektroenergetski sustavi rade unutar složenih regulatornih i tržišnih okruženja, što može stvoriti izazove u smislu provedbe politike, pristupa mreži i mehanizama određivanja cijena. Svladavanje ovih izazova zahtijeva temeljito razumijevanje regulatornog krajolika i sposobnost prilagodbe promjenjivim tržišnim uvjetima [20].

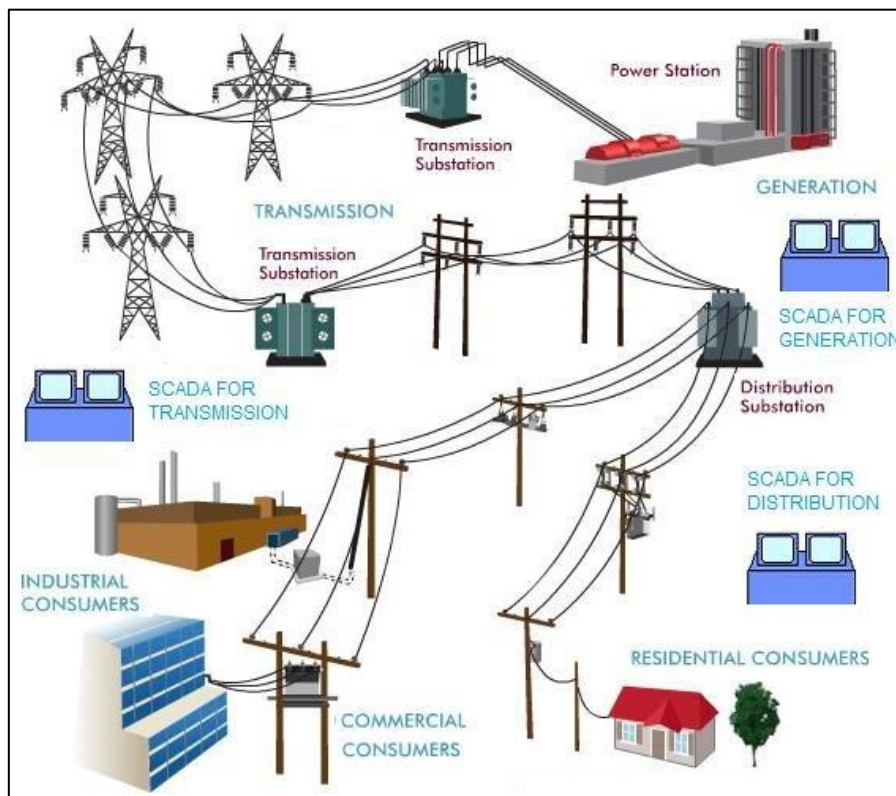
Upravljanje na strani potražnje: Sve veći naglasak na energetskej učinkovitosti i upravljanju na strani potražnje predstavlja nove izazove za operatore elektroenergetskih sustava u smislu

implementacije programa za odgovor na potražnju, distribuiranih energetske resursa i tehnologija pametnih mreža. Učinkovito upravljanje na strani potražnje zahtijeva naprednu mjernu infrastrukturu, praćenje u stvarnom vremenu i mogućnosti analize podataka [20].

Upravljanje elektroenergetskim sustavom suočava se s različitim izazovima povezanima s integracijom obnovljivih izvora energije, starenjem infrastrukture, kibersigurnošću, regulatornim i tržišnim čimbenicima te upravljanjem na strani potražnje. Rješavanje ovih izazova zahtijeva kombinaciju tehnoloških inovacija, političke podrške i strateškog planiranja kako bi se osigurala pouzdanost, stabilnost i održivost elektroenergetskih sustava.

#### 4. SUSTAV ZA NADZOR I UPRAVLJANJE (SCADA)

U ovom poglavlju istražiti ćemo ključnu ulogu SCADA sustava u upravljanju elektroenergetskim sustavima. Započet ćemo s predstavljanjem osnovnih koncepata i komponenti SCADA sustava, uključujući njihovu arhitekturu te hardverske i softverske elemente koji čine njihov temelj. Zatim ćemo proniknuti u temeljne funkcionalnosti SCADA sustava, koji obuhvaćaju prikupljanje podataka, nadzor, kontrolu i obradu podataka. Ove sposobnosti omogućuju učinkovito upravljanje različitim aspektima elektroenergetskih sustava.



Slika 6. SCADA za primjer elektroprivrede [19]



## **4.1. Osnovni pojmovi**

Sustavi za nadzor i prikupljanje podataka (SCADA) ključni su za upravljanje i nadzor industrijskih procesa, uključujući elektroenergetske sustave. Oni pružaju podatke u stvarnom vremenu i mogućnosti kontrole kako bi se osigurao nesmetan rad. Arhitektura SCADA sustava sastoji se od nekoliko razina: razine polja, razine upravljanja i razine nadzora. Ovi slojevi rade usklađeno na prikupljanju i obradi podataka, omogućujući operaterima donošenje informiranih odluka i kontrolu različitih aspekata sustava.

Ključne komponente SCADA sustava uključuju senzore, aktuatore, udaljene terminalne jedinice (RTU), programabilne logičke kontrolere (PLC), sučelja čovjek-stroj (HMI) i komunikacijske mreže. Svaka komponenta igra ključnu ulogu u ukupnom funkcioniranju SCADA sustava. Senzori i aktuatori prikupljaju podatke s terena, dok RTU i PLC-ovi obrađuju i prenose te podatke na nadzornu razinu, gdje operateri mogu komunicirati sa sustavom putem HMI-ja.

SCADA softver odgovoran je za prikupljanje podataka, obradu, vizualizaciju i kontrolu, omogućujući operaterima da učinkovito upravljaju sustavom. Time se osigurava učinkovit i pouzdan rad elektroenergetskog sustava.

## **4.2. Funkcionalnost SCADA sustava**

SCADA sustavi nude širok raspon funkcionalnosti koje ih čine nezamjenjivima za upravljanje i nadzor složenih procesa, poput elektroenergetskih sustava. Ključne funkcionalnosti uključuju prikupljanje podataka, nadzor, kontrolu i obradu podataka [22].

Prikupljanje podataka uključuje prikupljanje informacija u stvarnom vremenu s raznih terenskih uređaja, kao što su senzori i aktuatori, i prijenos tih podataka u kontrolni centar.

Nadzor je još jedna bitna funkcija SCADA sustava. Kontinuiranim promatranjem performansi sustava, operateri mogu otkriti anomalije, potencijalne kvarove ili neučinkovitosti i poduzeti odgovarajuće korektivne radnje.

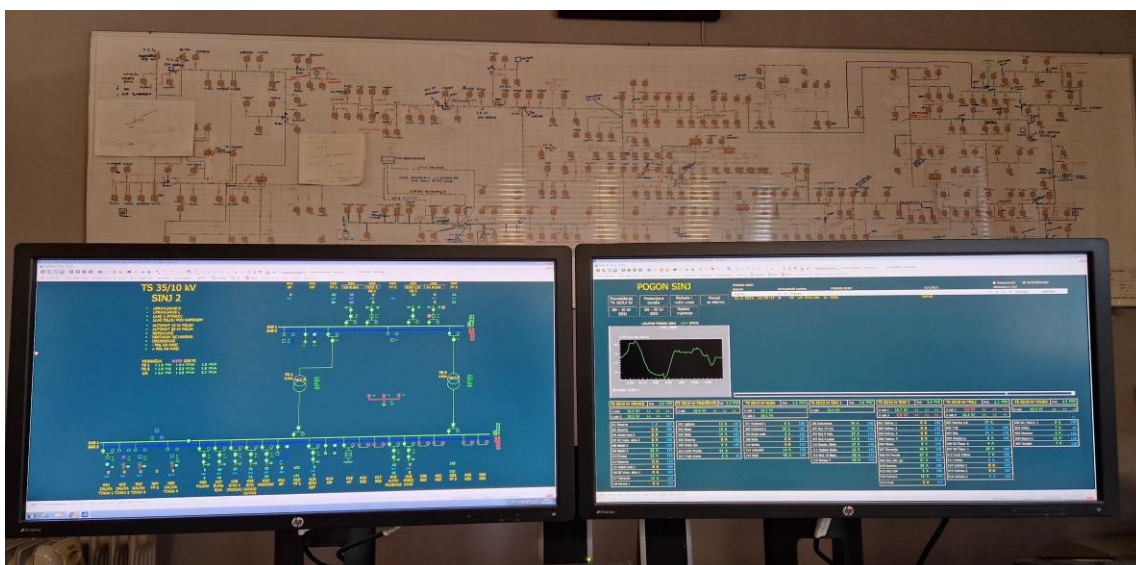
Funkcionalnost upravljanja omogućuje operaterima upravljanje različitim aspektima sustava na daljinu, poput podešavanja zadanih vrijednosti ili pokretanja određenih radnji. Ova sposobnost daljinskog upravljanja sustavom ključna je za osiguravanje glatkog rada i održavanje stabilnosti sustava.

Obrada podataka sastavni je dio SCADA sustava, budući da uključuje filtriranje, agregiranje i analizu prikupljenih podataka kako bi se generirali smisleni uvidi za operatore. Ovi uvidi omogućuju operaterima da optimiziraju performanse sustava, povećaju učinkovitost i proaktivno riješe potencijalne probleme.

Funkcionalnost SCADA sustava je od vitalnog značaja za učinkovito upravljanje i nadzor elektroenergetskih sustava, budući da operaterima pruža podatke u stvarnom vremenu i mogućnosti upravljanja potrebne za održavanje pouzdanosti i učinkovitosti sustava [21].

#### 4.3. Primjer implementacije SCADA sustava u Elektrodaljaciji Split

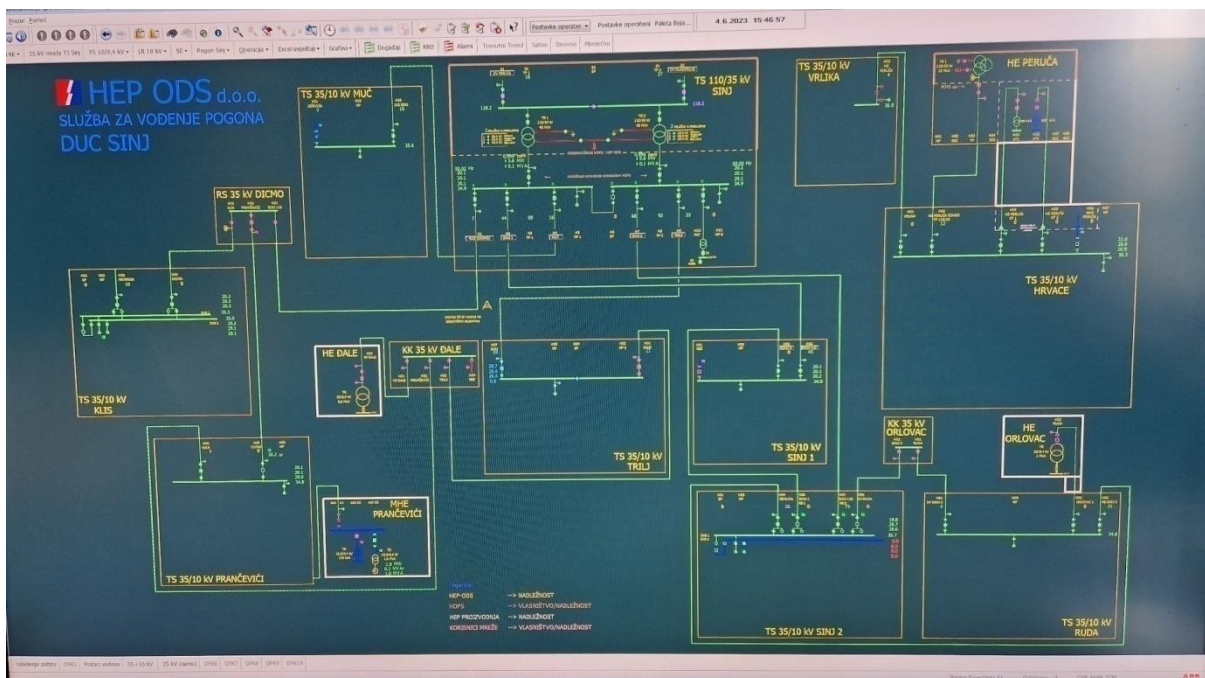
SCADA sustavi igraju ključnu ulogu u upravljanju i nadzoru distribucijske mreže u HEP ODS - u Elektrodaljacija Split pružajući dispečerima podatke u stvarnom vremenu i mogućnosti upravljanja. Za pristup SCADA sustavu koristi se aplikacija WS500 koja je osnovno grafičko sučelje za dispečera. Na njoj se prikazuju sve slike i stanja procesnih podataka i objekata u sustavu, izdaju komande, pokreću potrebne funkcije [23].



Slika 7. Aplikacija WS 500 za pristup SCADA sustavu – [TJ Sinj]

SCADA sustavi olakšavaju nadzor i kontrolu trafostanica, transformatora i druge bitne opreme. Omogućuju dispečerima upravljanje protokom opterećenja, održavaju napon unutar dozvoljenih granica otkrivaju i izoliraju kvarove, pridonoseći pouzdanosti i stabilnosti elektroenergetskog sustava.

U upravljanju kvalitetom električne energije, SCADA sustavi se koriste za praćenje i analizu različitih parametara kao što su napon, struja, frekvencija i harmonici. Ove informacije pomažu dispečerima da identificiraju probleme s kvalitetom električne energije, poduzmu korektivne radnje i održe ukupnu kvalitetu isporučene električne energije.



**Slika 8.** Uklopno stanje distribucijske mreže na području Sinja [TJ Sinj]

Svi elementi u sustavu podijeljeni su prema definiranim sustavima, njihovim podsustavima i stanicama. Ovi sustavi i podsustavi određuju i granice nadležnosti pojedinih dispečera.

Za lakše snalaženje u sustavu svaka slika ima pridružen jedan od sustava i podsustava, a slike stanica imaju pridruženu i stanicu, kako bi dispečer na osnovu određene slike mogao brže

dobiti informacije iz procesa. Za to se koriste liste alarma, događaja i Kronološki registrator događaja (KRD).

Svi događaji u SCADA sustavu obrađuju se na SCADA serverima, a na zahtjev dispečera prikazuju se na različitim listama:

- Lista događaja
- Lista alarma
- Lista KRD-a

Lista događaja prikazuje sve događaje u sustavu redom kako su obrađeni na računalu (svi zapisi su zelene boje)

Lista alarma prikazuje samo alarme u sustavu koji mogu biti trenutni i trajni (trenutni su zelene boje, trajni žute), potvrđeni i nepotvrđeni (nepotvrđeni alarmi trepere crvenom bojom ili imaju zvjezdicu ispred alarmnog retka). Lista alarma je ustvari izvadak iz liste događaja i zapisi u njoj su privremenog karaktera. Alarmi iz liste nestaju ako su trenutni i potvrđeni, a ako su trajni nakon što se stanje kvara izmjeni.

Lista KRD-a kronološki soritra događaje prema vremenu nastanka dobivenog signala daljinske stanice u milisekundnoj rezoluciji.

Dodatno se liste filtriraju prema slici koja je odabrana na prikazu i ovisno o sustavu, podsustavu i stanici pridruženima slici. Ako prije poziva neke liste nismo odabrali sliku s pridruženim sustavom, podsustavom ili stanicom pojavit će se poruka o greški i lista se neće otvoriti.

Tako npr. ako imamo odabranu sliku cijelog energetskeg sustava, pozivom bilo koje liste dobiti ćemo podatke za cijeli energetski sustav, dok ćemo za sliku mreže 35 kV dobiti podatke samo iz dijela mreže 35 kV, a za sliku stanice samo podatke o toj stanici. Za lakše snalaženje na vrhu svake liste napisan je i dio sustava koji je odabran [23].

Vrijeme	Operater	Opis događaja	Operater
13:56:55		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC PREKIDAC	ISKLJUCEN
13:56:55		SI PRISOJE 1 NESTANAK 230 V AC	PRORADA
13:56:55		35 SINJ 1 10 kv J08 MP OPCI START	B
13:56:55		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC START IO>	B
13:56:55		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC START USMJ IO>	B
13:56:55		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC GRUPA APU	PRORADA
13:56:55		35 SINJ 1 10 kv J08 MP GRUPA	PRORADA
13:56:55		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC APU UKLOP	PRORADA
13:56:55		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC APU BRZI U TIJEKU	PRESTANAK
13:56:56		SI PRISOJE 1 NESTANAK 230 V AC	PRESTANAK
13:56:56		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC PREKIDAC	ISKLJUCEN
13:56:56		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC APU UKLOP	PRESTANAK
13:56:56		SI LR SICRZDI IO> VODI	ISPAD
13:56:56		35 SINJ 1 10 kv J08 MP GRUPA	PRESTANAK
13:56:56		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC GRUPA APU	PRESTANAK
13:56:57		SI LR SICRZDI IO> VODI	U REDU
13:56:57		SI LR SICRZDI POMOĆNO NAPAJANJE KVAR	PRORADA
13:56:57		SI LR SICRZDI POMOĆNO NAPAJANJE KVAR	PRESTANAK
13:58:27		35 SINJ 1 10 kv J08 MP OPCI START	PRORADA
13:58:27		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC START IO>	B
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC START USMJ IO>	B
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC GRUPA	PRORADA
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC START IO>	PRORADA
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC START IO>	PRESTANAK
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC IO>	B
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC APU BRZI U TIJEKU	PRORADA
13:58:28		SI PRISOJE 1 NESTANAK 230 V AC	PRORADA
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC USMJ IO>	PRORADA
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC IO>	PRESTANAK
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC USMJ IO>	PRESTANAK
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC PREKIDAC	ISKLJUCEN
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC START IO>	PRESTANAK
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC START USMJ IO>	PRESTANAK
13:58:28		SI LR SICRZDI IO> VODI	ISPAD
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J08 MP OPCI START	PRESTANAK
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC GRUPA APU	PRORADA
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J08 MP GRUPA	PRORADA
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC GRUPA	PRORADA
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC APU UKLOP	PRESTANAK
13:58:28		35 SINJ 1 10 kv J02 KUKUZOVAC APU UKLOP	PRORADA

Slika 9. Primjer signala SCADA sustava (Lista događaja) [TJ Sinj]

### 4.3.1. Automatizacija srednjenaponske mreže po dubini

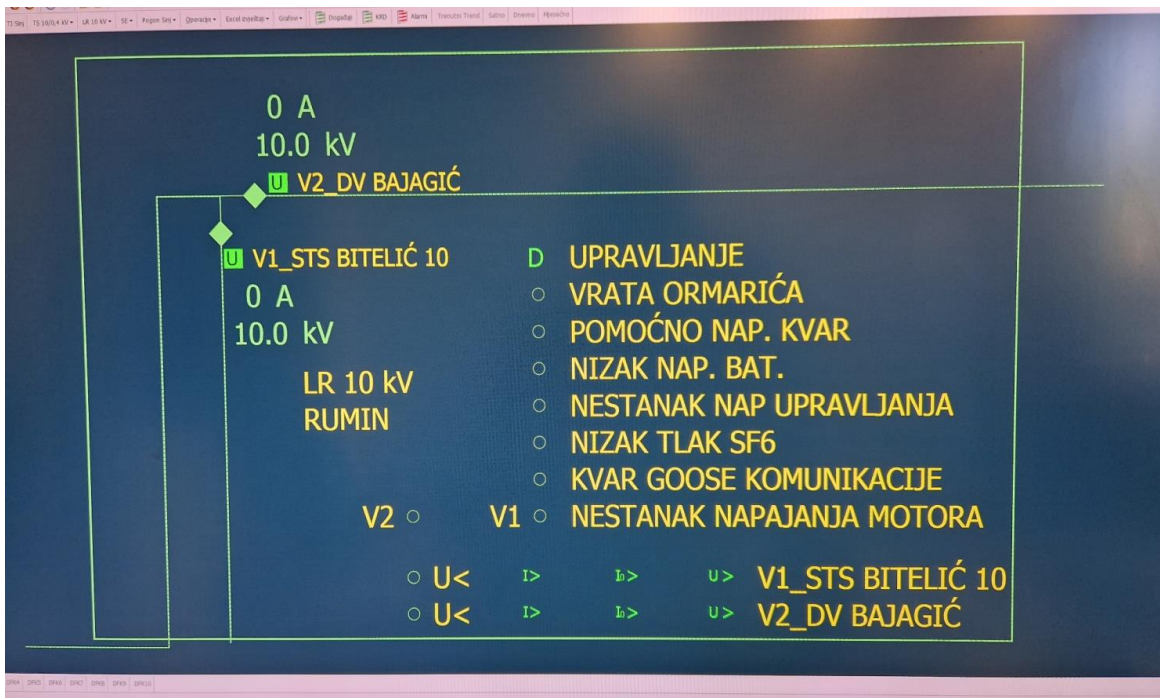
Implementacija naprava za automatizaciju po dubini mreže nužan je tehnološki iskorak prema naprednim mrežama te učinkovitijem gospodarenju mrežom. Postavljanje ovih uređaja u distributivnu mrežu uz dodatak sekundarne opreme za mjerenje, zaštitu, komunikaciju, napajanje i programsku podršku omogućuju automatizaciju funkcije detekcije i inicijalnog izoliranja kvara te brzi povratak napajanja. Uspješnost procesa ponovne uspostave normalnog pogonskog stanja mreže nakon kvara mjeri se u neisporučenoj električnoj energiji, a ovisi o lokaciji i broju upravljanih linijskih sklopki ili prekidača. Stoga je ispravan odabir broja i lokacije ugradnje ovih uređaja veoma važan za optimalan rad mreže. Rješenje ovog problema zahtjeva dobro poznavanje topologije mreža, tipova priključenih potrošača, statistike kvarova, vremenskih i geografskih uvjeta na trasi dalekovoda te primjenu odgovarajuće matematičke metode.



**Slika 10.** Stup srednjeg napona sa ugrađenom automatizacijskom opremom [TJ Sinj]

Najveći razlozi automatizacije srednjenaponske mreže su potpuni nadzor i kontrola nad elektro mrežom, brže otkrivanje i lociranje kvara tj. smanjenje trajanja vremena kvara kao i ograničavanje mjesta kvara na manje djelove. Prednosti korištenja sustava daljinskog nadzora i ugradnja daljiskih rastavnih sklopki s daljinskim upravljanjem prihvatljiv je model za veliki broj srednjenaponskih mreža jer je tehnički pouzdan, ostvaruje željene ciljeve postavljene u pogledu automatizacije, a financijski nije prezahtjevan. Funkcije automatizacije u

nadzemnim mrežama planiraju se ostvariti primjenom daljinski upravljivih SF6 rastavnih sklopki, dok će se u transformatorskim stanicama 20(10)/0,4 kV koristiti daljinski upravljivi integrirani SN sklopni blokovi [4]. Odabir broja i lokacija točki u mreži za ugradnju opreme za automatizaciju vrši se na temelju utvrđene metodologije i kriterija za ugradnju.



**Slika 11.** Upravljanje rastavnom sklopkom u SCADI [TJ Sinj]

Ukratko, SCADA sustavi su ključni za učinkovito upravljanje elektroenergetskim sustavima, budući da pružaju mogućnosti praćenja, kontrole i obrade podataka u stvarnom vremenu koje operaterima omogućuju održavanje pouzdanosti i performansi sustava.

Implementacija SCADA sustava u elektroenergetske sustave pokazala se korisnom u različitim aplikacijama, kao što su pametne mreže, vjetroelektrane i hidroelektrane, pružajući mogućnosti praćenja i upravljanja u stvarnom vremenu koje poboljšavaju performanse i pouzdanost sustava.

## 5. REGULACIJA NAPONA I SNAGE

### 5.1. Regulacija napona

Regulacija napona bitan je aspekt upravljanja elektroenergetskim sustavom, jer osigurava siguran i učinkovit rad električne opreme i održava stabilnost sustava. U elektroenergetskim sustavima, razine napona moraju se održavati unutar zadanih granica što je definirano normama kako bi se spriječilo oštećenje opreme, smanjili gubici energije i osigurala kvalitetna energija potrošačima [17].

Regulacija napona može se postići različitim tehnikama, uključujući:

- Transformator s promjenom odvoda
- Kompenzacija jalove snage
- Transformatori s promjenom opterećenja (LTC)
- Distribuirani izvori energije (DER)

Transformatori s promjenom odvoda naširoko se koriste u elektroenergetskim sustavima za prilagodbu razina napona kao odgovor na različite uvjete opterećenja. Ovi transformatori imaju više odvojaka na svojim namotima, što omogućuje podešavanje omjera napona između primarnog i sekundarnog namota prema željenom izlaznom naponu [24].

Kompenzacija jalove snage: Jalova snaga je neophodna za održavanje razine napona u elektroenergetskim sustavima. Upravljanjem proizvodnje, prijenosa i potrošnje jalove snage, razine napona mogu se učinkovito regulirati. Uređaji kao što su kondenzatorske baterije, sinkroni kondenzatori i statički VAR kompenzatori obično se koriste za kompenzaciju jalove snage [17].

Transformatori s promjenom opterećenja (LTC): LTC transformatori se koriste u distribucijskim sustavima za regulaciju naponskih razina na točki zajedničkog spajanja (PCC) između distribucijskog sustava i krajnjih korisnika. Ovi transformatori prilagođavaju svoj izlazni napon mijenjanjem položaja odvojaka u skladu s varijacijama opterećenja, čime se održava konstantna razina napona na PCC [24].



Distribuirani izvori energije (DER): DER, kao što su solarni paneli, vjetroturbine i sustavi za pohranu energije, također se mogu koristiti za regulaciju napona. Kontroliranjem izlaza ovih izvora, razine napona mogu se održavati unutar prihvatljivih granica. Napredne strategije upravljanja, kao što je Volt/VAR optimizacija, mogu se koristiti za maksimiziranje mogućnosti regulacije napona DER-ova [24].

Regulacija napona ključna je za održavanje stabilnosti sustava i osiguravanje sigurnog i učinkovitog rada električne opreme. Za postizanje učinkovite regulacije napona u elektroenergetskim sustavima mogu se upotrijebiti različite tehnike, uključujući promjenu odvoda transformatora, kompenzaciju jalove snage, LTC transformatore i DER.

## **5.2. Regulacija snage**

Regulacija snage, također poznata kao regulacija opterećenja i frekvencije ili regulacija aktivne snage, ključni je aspekt upravljanja elektroenergetskim sustavom. Cilj mu je održati ravnotežu između proizvedene i potrošene snage, osiguravajući stabilnost sustava i frekvenciju unutar prihvatljivih granica [24]. Regulacija snage posebno je važna u međusobno povezanim elektroenergetskim sustavima, gdje nagle promjene opterećenja ili proizvodnje mogu dovesti do odstupanja frekvencije i potencijalne nestabilnosti sustava.

Za regulaciju snage koristi se nekoliko tehnika i pristupa:

- Primarna kontrola
- Sekundarna regulacija
- Tercijarna kontrola
- Upravljanje na strani potražnje

Primarna kontrola: Ovo je prva linija obrane u održavanju ravnoteže snage i događa se unutar nekoliko sekundi nakon promjene frekvencije sustava. Primarna kontrola uključuje automatsku prilagodbu izlaza generatora putem regulatora brzine, koji reagiraju na odstupanja frekvencije promjenom mehaničke ulazne snage u generator. To pomaže vratiti frekvenciju sustava na njegovu nominalnu vrijednost i održati stabilnost [17].

Sekundarna regulacija: Također poznata kao automatska regulacija proizvodnje (AGC), sekundarna regulacija odgovorna je za fino podešavanje frekvencije sustava i razmjene snage između međusobno povezanih sustava. AGC djeluje u duljem vremenskom rasponu (obično u roku od nekoliko minuta) i prilagođava izlaz generatora na temelju kontrolnih signala primljenih iz centraliziranog kontrolnog centra. Sekundarna regulacija pomaže minimizirati odstupanja frekvencije i održavati željenu razmjenu snage između međusobno povezanih sustava [24].

Tercijarna kontrola: Tercijarna kontrola uključuje ručne ili automatizirane prilagodbe resursa za proizvodnju i prijenos energije kako bi se optimizirale performanse sustava. Obično se događa tijekom duljeg vremenskog razdoblja (od nekoliko minuta do sati) i uključuje radnje kao što su reprogramiranje proizvodnje, smanjenje opterećenja i prilagođavanje razmjene energije između međusobno povezanih sustava. Tercijarna kontrola ima za cilj optimizirati učinkovitost sustava, minimizirati operativne troškove i osigurati odgovarajuće rezerve snage za nepredviđene situacije [17].

Upravljanje na strani potražnje: Tehnike upravljanja na strani potražnje (DSM) također mogu doprinijeti regulaciji energije utječući na ponašanje potrošača i prilagođavajući potražnju za energijom. DSM strategije, kao što su programi odgovora na potražnju, cijene prema vremenu korištenja i mjere energetske učinkovitosti, mogu pomoći u smanjenju vršne potražnje, povećati fleksibilnost sustava i poboljšati ukupnu učinkovitost elektroenergetskog sustava [17].

Regulacija snage ključna je za održavanje ravnoteže između proizvodnje i potrošnje energije, osiguravajući stabilnost sustava i frekvenciju unutar prihvatljivih granica. Različite tehnike, uključujući primarnu regulaciju, sekundarnu regulaciju, tercijarnu regulaciju i upravljanje na strani potražnje, mogu se koristiti za postizanje učinkovite regulacije snage u elektroenergetskim sustavima.

### 5.3. Regulacija napona i snage u elektroenergetskim sustavima

Regulacija napona i snage ključni su aspekti upravljanja elektroenergetskim sustavom, jer osiguravaju stabilnost, učinkovitost i pouzdanost sustava. Oba aspekta su međusobno povezana, a njihova istovremena regulacija ključna je za održavanje željenih performansi elektroenergetskog sustava. Ovaj odjeljak daje kratak pregled kombinirane regulacije napona i snage u elektroenergetskim sustavima [17].

Koordinirane strategije regulacije napona i snage koriste se kako bi se postigla ravnoteža između održavanja razina napona unutar prihvatljivih granica i osiguravanja da proizvodnja energije odgovara potrošnji energije. Ove strategije uključuju različite komponente i upravljačke mehanizme, koji uključuju kontrolu uzbude generatora, promjenu odvoda transformatora, kompenzaciju jalove snage i upravljanje na strani potražnje [24].

Kontrola uzbude generatora igra vitalnu ulogu u regulaciji napona i snage. Podešavanjem struje uzbude može se kontrolirati izlazna jalova snaga generatora i napon na stezaljkama. To omogućuje regulaciju razina napona dok istovremeno pridonosi ravnoteži snage i stabilnosti sustava [17].

Promjena odvoda transformatora još je jedna tehnika koja se koristi za regulaciju napona i snage. Podešavanjem položaja slavine, omjer napona između primarnog i sekundarnog namota može se promijeniti, što utječe i na razine napona i protok snage u sustavu. To pomaže u održavanju razine napona unutar prihvatljivih granica i osigurava pravilnu distribuciju energije kroz sustav [24].

Uređaji za kompenzaciju jalove snage, kao što su baterije kondenzatora, sinkroni kondenzatori i statički VAR kompenzatori, koriste se za podršku regulaciji napona i ravnoteži snage. Ovi uređaji pomažu u održavanju razine napona pružanjem ili apsorpiranjem jalove snage, pridonoseći stabilnosti sustava i učinkovitim prijenosu energije [17].

Tehnike upravljanja na strani potražnje također mogu doprinijeti kombiniranoj regulaciji napona i snage. Utječući na ponašanje potrošača i prilagođavajući potražnju za električnom

energijom, ove tehnike pomažu u održavanju razina napona unutar prihvatljivih granica dok podržavaju ravnotežu između proizvodnje i potrošnje električne energije.



**Slika 12.** Regulacijska sklopka energetskog transformatora [25]

Regulacija napona i snage bitni su aspekti upravljanja elektroenergetskim sustavom, a njihova istovremena regulacija ključna je za postizanje stabilnosti, učinkovitosti i pouzdanosti sustava. Koordinirane strategije regulacije napona i snage uključuju različite komponente i upravljačke mehanizme, uključujući kontrolu uzbude generatora, promjenu odvoda transformatora, kompenzaciju jalove snage i upravljanje na strani potražnje.

## **6. PRIMJENE NAPREDNIH TEHNOLOGIJA U UPRAVLJANJU ELEKTROENERGETSKIM SUSTAVIMA**

Posljednjih godina elektroenergetska industrija svjedoči brzom usvajanju naprednih tehnologija za poboljšanje učinkovitosti, pouzdanosti i održivosti elektroenergetskih sustava. Ovo poglavlje ima za cilj istražiti različite inovativne tehnologije i metodologije koje su uvedene za poboljšanje rada i upravljanja elektroenergetskim sustavima. Ovo poglavlje pružit će pregled najsuvremenijih pristupa i tehnologija, uključujući napredne algoritme, umjetnu inteligenciju, blockchain tehnologiju i Internet stvari (IoT), te njihove primjene u upravljanju elektroenergetskim sustavima. Integracija ovih tehnologija mijenja način na koji se energetske sustavima upravlja i radi, omogućujući veću prilagodljivost, fleksibilnost i otpornost u suočavanju s rastućom složenošću i izazovima u energetske sektoru.

### **6.1. Primjena naprednih algoritama u upravljanju elektroenergetskim sustavima**

Primjena naprednih algoritama u upravljanju elektroenergetskim sustavima dobila je značajnu pozornost zbog njihovog potencijala za optimizaciju rada, kontrole i planiranja različitih aspekata elektroenergetskih sustava [27]. U ovom odjeljku raspravljat će se o nekim od široko prihvaćenih naprednih algoritama i njihovoj primjeni u upravljanju elektroenergetskim sustavima.

- Optimizacijski algoritmi
- Umjetne neuronske mreže (ANN)
- Neizrazita logika
- Sustavi s više agenata (MAS)

Optimizacijski algoritmi: Elektroenergetski sustavi uključuju složene procese donošenja odluka koji zahtijevaju učinkovite tehnike optimizacije kako bi se pronašla najbolja moguća rješenja. Različiti optimizacijski algoritmi, kao što su genetski algoritmi, optimizacija roja čestica i diferencijalna evolucija, korišteni su za izračun optimalnog protoka snage (OPF), posvećenost jedinice i ekonomske probleme dispečiranja [27]. Ovi algoritmi nude mogućnost pronalaženja gotovo optimalnih rješenja unutar razumnog računalnog vremena, povećavajući ukupnu učinkovitost sustava.

Genetski algoritmi (GA) tehnika su pretraživanja temeljena na populaciji inspirirana procesom prirodne selekcije i evolucije. GA se naširoko koriste u elektroenergetskim sustavima zbog svoje sposobnosti traženja globalnih optimuma u složenim prostorima pretraživanja. Osim OPF-a i problema vezanih uz jedinicu, GA su također primijenjeni na optimalno postavljanje uređaja za distribuiranu proizvodnju i kompenzaciju jalove snage [27].

Optimizacija roja čestica (PSO) još je jedan algoritam optimizacije inspiriran prirodom koji se temelji na društvenom ponašanju jata ptica ili jata riba. PSO je uspješno primijenjen na različite probleme optimizacije elektroenergetskog sustava, uključujući optimalno postavljanje jedinica za mjerenje fazora i optimalno otpremanje jalove snage. Jednostavnost i lakoća implementacije PSO-a čine ga atraktivnim izborom za optimizaciju elektroenergetskog sustava. Diferencijalna evolucija (DE) je algoritam optimizacije temeljen na populaciji koji je stekao popularnost u elektroenergetskim sustavima zbog svoje učinkovitosti u rješavanju kontinuiranih i diskretnih problema optimizacije. DE je korišten za rješavanje problema ekonomičnog dispečiranja opterećenja, planiranje širenja prijenosa i optimalno postavljanje kondenzatora u distribucijskim mrežama [32].

Umjetne neuronske mreže (ANN): ANN su vrsta algoritma strojnog učenja koji oponaša funkcioniranje ljudskog mozga, omogućujući sustavu da uči i prilagođava se na temelju ulaznih podataka. ANN-ovi su primijenjeni u elektroenergetskim sustavima za predviđanje opterećenja, dijagnozu kvarova i analizu stabilnosti napona. Sposobnost ANN-ova da uče iz povijesnih podataka i prepoznaju obrasce čini ih učinkovitim alatom za predviđanje i analizu ponašanja elektroenergetskog sustava. Kratkoročno predviđanje opterećenja ključna je zadaća u radu i planiranju elektroenergetskog sustava, budući da pomaže komunalnim preduzećima da učinkovito uravnoteže ponudu i potražnju. ANN-ovi su pokazali superiornu izvedbu u kratkoročnom predviđanju opterećenja u usporedbi s tradicionalnim statističkim metodama. Dodatno, ANN-ovi su korišteni za otkrivanje grešaka i klasifikaciju u elektroenergetskim sustavima, budući da mogu učinkovito identificirati vrstu, lokaciju i ozbiljnost grešaka na temelju mjerenja u stvarnom vremenu [32].

Neizrazita logika: neizrazita logika moćan je matematički alat koji se koristi za modeliranje složenih sustava s nesigurnim ili nepreciznim informacijama. Primijenjen je u upravljanju elektroenergetskim sustavima u različite svrhe, kao što su sheme rasterećenja, regulacija jalove snage i regulacija napona. Uključivanjem neizrazite logike, operateri

elektroenergetskog sustava mogu donositi bolje informirane odluke u neizvjesnim uvjetima, povećavajući pouzdanost i stabilnost sustava.

Sheme rasterećenja temeljene na neizrazitoj logici razvijene su za održavanje stabilnosti sustava tijekom nepredviđenih događaja, kao što je gubitak proizvodnog ili prijenosnog kapaciteta. Algoritmi rasterećenja temeljeni na neizrazitoj logici uzimaju u obzir različite čimbenike, uključujući napone sabirnice, frekvenciju sustava i prioritet opterećenja, kako bi odredili optimalnu strategiju rasterećenja. Slično tome, neizrazita logika korištena je za dizajn adaptivnih regulatora za regulaciju jalove snage i napona, nudeći poboljšane performanse u usporedbi s konvencionalnim tehnikama upravljanja [32].

Sustavi s više agenata (MAS): MAS su vrsta pristupa distribuirane umjetne inteligencije koji uključuje skup autonomnih agenata koji rade zajedno kako bi postigli određene ciljeve. U elektroenergetskim sustavima MAS se koristio za upravljanje potražnjom, integraciju distribuirane proizvodnje i zaštitu elektroenergetskog sustava. Decentralizirana priroda MAS-a omogućuje veću fleksibilnost i prilagodljivost u upravljanju složenim elektroenergetskim sustavima, posebno uz sve veću integraciju distribuiranih energetske izvora [35].

Upravljanje potražnjom (DSM) ima za cilj optimizirati korištenje električne energije utječući na obrasce potrošnje električne energije. MAS su korišteni za razvoj distribuiranih DSM algoritama koji koordiniraju rad fleksibilnih opterećenja, uređaja za pohranu energije i distribuiranih proizvodnih jedinica kako bi se smanjili ukupni troškovi sustava uz održavanje pouzdanosti. Nadalje, MAS se koristi za implementaciju decentraliziranih zaštitnih shema u elektroenergetskim sustavima, koje mogu učinkovito koordinirati rad zaštitnih releja i prekidača kao odgovor na kvarove [35].

Primjena naprednih algoritama u upravljanju elektroenergetskim sustavima pokazala se učinkovitom u optimizaciji rada, upravljanja i planiranja sustava, što dovodi do poboljšane učinkovitosti, pouzdanosti i stabilnosti. Iskorištavanjem snage ovih algoritama, operateri elektroenergetskih sustava mogu bolje upravljati rastućom složenošću i izazovima povezanim s modernim elektroenergetskim sustavima.

## 6.2. Primjena umjetne inteligencije u upravljanju elektroenergetskim sustavima

Primjena umjetne inteligencije (AI) u upravljanju elektroenergetskim sustavima postaje sve važnija zbog sve veće složenosti elektroenergetskih sustava i potrebe za učinkovitim, pouzdanim i prilagodljivim rješenjima. U ovom odjeljku raspravljat će se o različitim tehnikama umjetne inteligencije i njihovim primjenama u upravljanju elektroenergetskim sustavima, s fokusom na optimizaciju, predviđanje, kontrolu i zaštitu.

Umjetna inteligencija naširoko je prihvaćena za rješavanje problema optimizacije u elektroenergetskim sustavima, kao što su optimalan protok snage, posvećenost jedinice i ekonomično otpremanje. Tehnike umjetne inteligencije, uključujući genetske algoritme, optimizaciju roja čestica i umjetne neuronske mreže, primijenjene su za rješavanje ovih složenih problema optimizacije s većom učinkovitošću i preciznošću u usporedbi s tradicionalnim metodama [27]. Štoviše, optimizacijski algoritmi temeljeni na umjetnoj inteligenciji mogu se nositi s nesigurnostima i nelinearnostima u elektroenergetskim sustavima, što ih čini prikladnima za aplikacije u stvarnom vremenu. Optimiziranjem rada komponenti elektroenergetskog sustava, AI može doprinijeti povećanju učinkovitosti i isplativosti.

Točno predviđanje potražnje opterećenja, proizvodnje obnovljive energije i cijena električne energije ključno je za planiranje i rad elektroenergetskog sustava. Tehnike umjetne inteligencije, posebno umjetne neuronske mreže, vektorski strojevi za podršku i duboko učenje, pokazale su izvrsnu izvedbu u zadacima predviđanja zahvaljujući svojoj sposobnosti učenja iz povijesnih podataka i identificiranja složenih obrazaca. Modeli predviđanja temeljeni na umjetnoj inteligenciji mogu se prilagoditi promjenjivim uvjetima sustava i pružiti pouzdane prognoze, omogućujući operaterima elektroenergetskog sustava donošenje informiranih odluka. To zauzvrat pomaže u održavanju ravnoteže između ponude i potražnje, smanjenju operativnih troškova i povećanju pouzdanosti sustava.

Tehnike umjetne inteligencije korištene su za dizajniranje naprednih kontrolera za različite komponente elektroenergetskog sustava, kao što su generatori, transformatori i energetska elektronička pretvarači. Neizrazita logika, prediktivno upravljanje modelom i učenje s pojačanjem korišteni su za razvoj inteligentnih kontrolera koji mogu učinkovito upravljati elektroenergetskim sustavima u različitim radnim uvjetima. Strategije upravljanja temeljene



na umjetnoj inteligenciji mogu poboljšati stabilnost sustava, poboljšati kvalitetu električne energije i optimizirati korištenje resursa, pridonoseći ukupnoj izvedbi elektroenergetskih sustava. Ovo je osobito važno u kontekstu moderne elektroenergetske mreže, gdje održavanje stabilnosti i kvalitete električne energije postaje sve veći izazov zbog integracije obnovljivih izvora energije i sve veće potražnje za električnom energijom.

Pouzdan i brze sheme zaštite bitne su za održavanje integriteta elektroenergetskih sustava i minimiziranje posljedica kvarova. Tehnike umjetne inteligencije, uključujući umjetne neuronske mreže, stabla odlučivanja i vektorske strojeve podrške, primijenjene su za otkrivanje grešaka, klasifikaciju i lociranje u elektroenergetskim sustavima. Zaštitne sheme temeljene na umjetnoj inteligenciji mogu ponuditi bolje performanse i prilagodljivost u usporedbi s konvencionalnim metodama, osiguravajući siguran rad elektroenergetskih sustava. Brzim i točnim otkrivanjem i izoliranjem kvarova, umjetna inteligencija može spriječiti oštećenje opreme, smanjiti trajanje prekida rada i minimizirati utjecaj kvarova na električnu mrežu [32].

Sve veći prodor distribuiranih energetske izvora (DER), kao što su solarni fotonaponski uređaji, vjetroturbine i sustavi za pohranu energije, uveo je nove izazove u upravljanje elektroenergetskim sustavom. Tehnike umjetne inteligencije korištene su kako bi se olakšala integracija DER-ova u elektroenergetske sustave optimizacijom njihovog rada, koordiniranjem odgovora na potražnju i povećanjem stabilnosti mreže temeljena na umjetnoj inteligenciji mogu pomoći u upravljanju nesigurnostima i varijabilnošću povezanim s DER-ovima, osiguravajući njihovu besprijekornu integraciju u mrežu. Štoviše, AI može podržati razvoj tehnologija i aplikacija pametnih mreža, kao što su virtualne elektrane, mikromreže i sustavi upravljanja energijom, koji su ključni za postizanje održivije i otpornije energetske infrastrukture [26].

Primjena umjetne inteligencije u upravljanju elektroenergetskim sustavima pokazala je značajan potencijal u rješavanju rastuće složenosti i izazova modernih elektroenergetskih sustava. Tehnike umjetne inteligencije mogu ponuditi učinkovita, pouzdana i prilagodljiva rješenja za zadatke optimizacije, predviđanja, kontrole i zaštite, u konačnici poboljšavajući performanse i otpornost elektroenergetskih sustava. Kako se energetske sustave nastavljaju razvijati i postaju međusobno povezani, umjetna inteligencija će igrati ključnu ulogu u

upravljanju sve većom količinom podataka i potrebom za donošenjem odluka u stvarnom vremenu.

Jedan od novijih trendova u elektroenergetskoj industriji je korištenje umjetne inteligencije za prediktivno održavanje opreme elektroenergetskog sustava. Analizom povijesnih podataka i praćenjem performansi opreme u stvarnom vremenu, AI može identificirati rane znakove potencijalnih kvarova, omogućujući obavljanje aktivnosti održavanja prije nego što se pojave kritični problemi. Ovaj proaktivni pristup može pomoći u smanjenju neplaniranih ispada, produljiti životni vijek opreme i smanjiti troškove održavanja [27].

Nadalje, AI se može upotrijebiti za poboljšanje kibernetičke sigurnosti energetske sustava otkrivanjem i ublažavanjem potencijalnih kibernetičkih prijetnji. Kako se elektroenergetski sustavi sve više oslanjaju na digitalnu komunikaciju i kontrolu, postaju sve ranjiviji na kibernetičke napade, što može imati ozbiljne posljedice za stabilnost i sigurnost mreže. Rješenja za kibernetičku sigurnost temeljena na umjetnoj inteligenciji mogu analizirati mrežni promet, identificirati abnormalne obrasce i odgovoriti na potencijalne prijetnje u stvarnom vremenu, osiguravajući neprekidan i siguran rad energetske sustava.

AI također ima potencijal podržati elektrifikaciju prijevoza, osobito u upravljanju infrastrukturom za punjenje električnih vozila (EV). Predviđanjem potražnje za punjenjem električnih vozila, optimiziranjem rasporeda punjenja i koordiniranjem rada stanica za punjenje, umjetna inteligencija može olakšati integraciju električnih vozila u električnu mrežu, ublažavajući potencijalne probleme povezane sa zagušenjem mreže i fluktuacijama napona [32].

Očekuje se da će u nadolazećim godinama umjetna inteligencija nastaviti oblikovati budućnost upravljanja elektroenergetskim sustavima, omogućujući razvoj inteligentnijih, učinkovitijih i otpornijih energetske mreža. Kako se budu pojavljivale nove tehnologije i aplikacije, AI će biti ključni pokretač uspješnog prijelaza na održivu i niskougljičnu energetske budućnost

### **6.3. Primjena blockchain tehnologije u upravljanju elektroenergetskim sustavima**

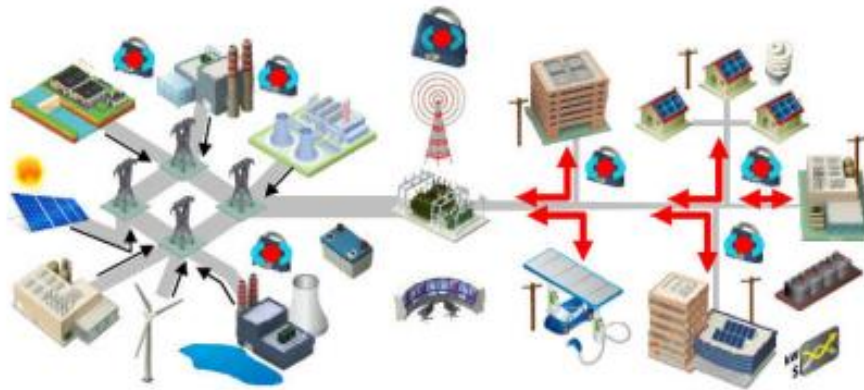
Blockchain tehnologija, izvorno razvijena kao temeljna tehnologija za kriptovalute kao što je Bitcoin, privukla je značajnu pozornost zbog svojih potencijalnih primjena u raznim industrijama, uključujući elektroenergetske sustave [36]. Ova tehnologija distribuirane knjige omogućuje sigurno, transparentno i zaštićeno upravljanje podacima, što može biti prednost u upravljanju elektroenergetskim sustavima. Ovaj odjeljak ističe ključne primjene blockchain tehnologije u elektroenergetskim sustavima, uključujući trgovanje energijom, upravljanje mrežom i kibernetičku sigurnost.

Jedna od primarnih primjena blockchain tehnologije u elektroenergetskim sustavima je u području ravnopravnog (P2P) trgovanja energijom. Sa sve većim prodorom distribuiranih energetske resursa (DER) kao što su solarni paneli i vjetro turbine, potencijal za prosumere (potrošači koji također proizvode energiju) da trguju svojim viškom energije s drugim potrošačima je porastao. Blockchain tehnologija olakšava P2P trgovanje energijom omogućujući sigurne i transparentne transakcije između kupaca i potrošača, bez potrebe za posrednicima kao što su komunalna poduzeća ili trgovci energijom. Ovaj decentralizirani pristup može dovesti do učinkovitije distribucije energije, smanjenih transakcijskih troškova i povećane energetske neovisnosti potrošača [36].

Blockchain tehnologija također se može koristiti za poboljšanje upravljanja mrežom, posebno u kontekstu programa za odgovor na potražnju (DR). DR programi potiču potrošače da prilagode svoju potrošnju energije kao odgovor na uvjete mreže, kao što je smanjenje njihove potražnje tijekom vršnih razdoblja ili povećanje njihove potražnje kada je proizvodnja obnovljive energije visoka. Korištenjem blockchain tehnologije, komunalna poduzeća mogu sigurno i transparentno bilježiti i potvrditi DR događaje, osiguravajući točnu i pravovremenu namiru financijskih poticaja za uključene potrošače. Štoviše, blockchain može omogućiti decentraliziranu, automatiziranu kontrolu DR događaja, olakšavajući učinkovitije upravljanje mrežom i potencijalno smanjujući potrebu za skupim nadogradnjama mrežne infrastrukture [27].

Kibernetička sigurnost još je jedno područje u kojem blockchain tehnologija može pružiti značajne prednosti elektroenergetskim sustavima. Kako se elektroenergetski sustavi sve više

oslanjaju na digitalnu komunikaciju i kontrolu, postaju sve ranjiviji na kibernetičke napade, što može imati ozbiljne posljedice za stabilnost i sigurnost mreže. Iskorištavanjem inherentnih sigurnosnih značajki blockchain tehnologije, kao što su kriptografsko raspršivanje i konsenzusni algoritmi, energetske sustavi mogu poboljšati svoju kibernetičku sigurnost, osiguravajući kontinuiran i siguran rad kritične mrežne infrastrukture [27].



**Slika 13.** Infrastruktura pametne mreže [31]

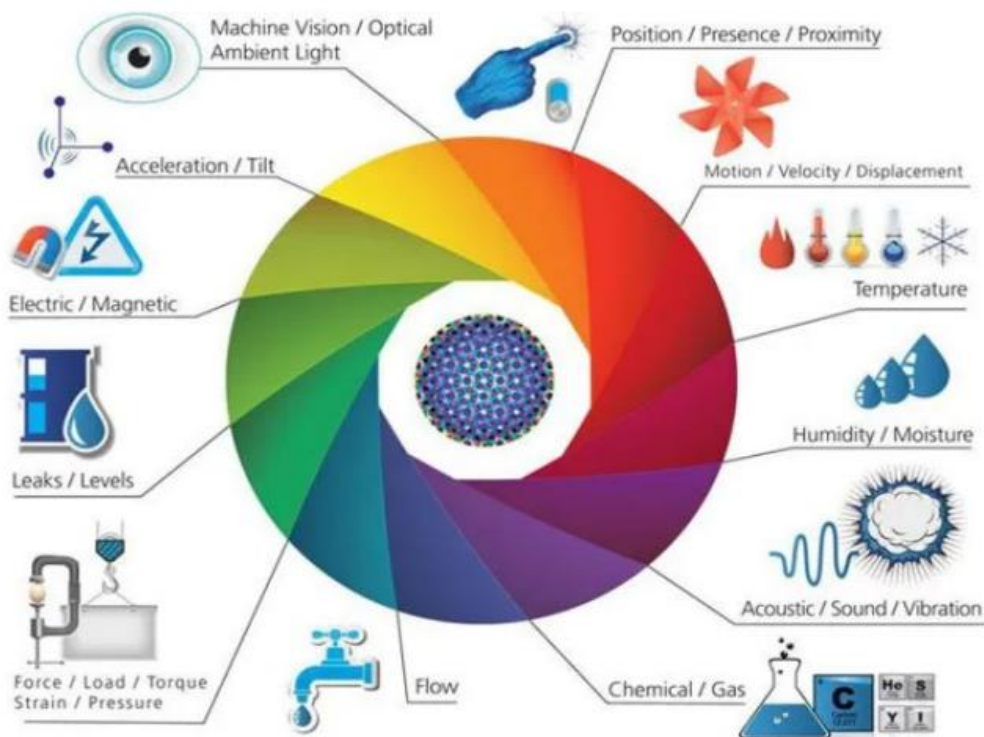
Blockchain tehnologija ima veliko obećanje za upravljanje elektroenergetskim sustavima, posebno u područjima P2P trgovanja energijom, upravljanja mrežom i kibernetičke sigurnosti. Kako tehnologija nastavlja sazrijevati i razvijati se, očekuje se da će blockchain igrati sve važniju ulogu u oblikovanju budućnosti elektroenergetskih sustava, omogućavajući učinkovitije, sigurnije i otpornije upravljanje energijom. Blockchain je svojevrsna vrsta baza podataka, u suštini vrlo jednostavna, ključna razlika Blockchaina i baze podataka je način strukturiranja podataka.

#### **6.4. Primjena interneta stvari (IoT) u upravljanju elektroenergetskim sustavima**

Internet stvari (IoT) odnose se na mrežu međusobno povezanih uređaja, senzora i softvera koji omogućuju prikupljanje, prijenos i obradu podataka, s aplikacijama u različitim industrijama, uključujući elektroenergetske sustave. Integracija IoT tehnologije u energetske

sustave nudi nekoliko prednosti, poput poboljšane učinkovitosti, pouzdanosti i održivosti. Ovaj odjel istražuje ključne primjene IoT-a u upravljanju elektroenergetskim sustavima, uključujući pametne mreže, upravljanje potražnjom te praćenje i održavanje imovine.

Pametne mreže predstavljaju značajnu primjenu IoT-a u elektroenergetskom sektoru. Pametne mreže su modernizirane elektroenergetske mreže koje iskorištavaju napredne tehnologije komunikacije, senzora i analize podataka za optimizaciju rada i upravljanja mrežom. IoT uređaji igraju ključnu ulogu u pametnim mrežama prikupljanjem podataka u stvarnom vremenu iz različitih komponenti mreže, kao što su proizvodne jedinice, dalekovodi i distribucijske mreže, omogućujući bolji nadzor i kontrolu rada mreže. Ova poboljšana vidljivost i kontrola mogu rezultirati poboljšanom učinkovitosti mreže, pouzdanošću i otpornošću, kao i integracijom distribuiranih energetske izvora (DER), kao što su solarni paneli i vjetro turbine [30].



**Slika 14.** IoT uređaji, primjena senzora [33]

Druga primjena IoT-a u elektroenergetskim sustavima je upravljanje potražnjom (DSM). DSM se odnosi na inicijative koje imaju za cilj utjecati na obrasce potrošnje energije potrošača kako bi se postigli specifični ciljevi, kao što je očuvanje energije ili smanjenje vršnog opterećenja [28]. IoT tehnologije mogu olakšati DSM omogućavanjem komunikacije u stvarnom vremenu između komunalnih poduzeća i potrošača, pružajući potrošačima detaljne informacije o njihovoj potrošnji energije i nudeći poticaje za prilagodbu njihove upotrebe kao odgovor na uvjete mreže. Dodatno, IoT uređaji, kao što su pametni termostati i uređaji, mogu se programirati da automatski reagiraju na komunalne signale, dodatno povećavajući učinkovitost DSM programa [34].

IoT se također može primijeniti u nadzoru i održavanju imovine unutar elektroenergetskih sustava. Kontinuirani rad infrastrukture elektroenergetskog sustava, kao što su transformatori, prekidači i dalekovodi, ključan je za održavanje stabilnosti i pouzdanosti mreže IoT senzori mogu se koristiti za praćenje stanja ove imovine u stvarnom vremenu, prikupljajući podatke o parametrima kao što su temperature, vibracije i električno opterećenje. Analizirajući te podatke, mogu se rano identificirati potencijalni problemi [28].

Ukratko, primjena IoT tehnologije u upravljanju elektroenergetskim sustavima nudi brojne prednosti, uključujući razvoj pametnih mreža, poboljšano upravljanje potražnjom te poboljšano praćenje i održavanje imovine. Kako usvajanje IoT uređaja nastavlja rasti, očekuje se da će ove tehnologije igrati sve važniju ulogu u evoluciji i modernizaciji elektroenergetskih sustava.

## 7. ZAKLJUČAK

Ovim završnim radom dat je cjelovit pregled ključnih dostignuća, izazova i mogućih rješenja u području upravljanja elektroenergetskim sustavom. Primarna područja fokusa uključivala su pametne mreže, integraciju obnovljivih izvora energije, upravljanje potražnjom i primjenu naprednih tehnologija kao što su Internet stvari (IoT), umjetna inteligencija i blockchain. Pametne mreže postale su ključno rješenje za modernizaciju energetske sustava, poboljšanje njihove učinkovitosti, pouzdanosti i otpornosti. Iako su pokazali brojne prednosti, za njihovu uspješnu implementaciju potrebno je pozabaviti se izazovima kao što su visoki troškovi implementacije, regulatorni okviri i pitanja kibernetičke sigurnosti.

Integracija obnovljivih izvora energije predstavlja značajnu priliku za smanjenje emisija stakleničkih plinova i povećanje energetske sigurnosti. Međutim, povremena priroda proizvodnje obnovljive energije predstavlja izazov za stabilnost i pouzdanost mreže. Postojeća rješenja, kao što su sustavi za pohranu energije, napredne metode predviđanja i tehnologije obnovljive energije prilagođene mreži, predložena su za rješavanje ovih izazova.

Ciljevi ovog završnog rada bili su analizirati trenutno stanje upravljanja elektroenergetskim sustavom, kritički razmotriti postojeća rješenja, te identificirati područja za buduća istraživanja. Analiza praksi upravljanja energijom, kao što su energetska učinkovitost, integracija obnovljivih izvora energije i očuvanje energije, istaknula je prednosti i izazove povezane sa svakim pristupom. Dodatno, rasprava o strategijama za provedbu praksi održivog upravljanja energijom u različitim sektorima pružila je dragocjene uvide u izazove i prilike u industriji, zgradarstvu i transportu.

Procjena vladinih politika, propisa i poticaja pokazala je značajnu ulogu koju imaju u oblikovanju usvajanja praksi održivog upravljanja energijom. Nadalje, opis trenutnog stanja praksi upravljanja energijom i njihove primjene u raznim industrijama pružio je čvrstu osnovu za razumijevanje trenutnog krajolika upravljanja energijom i potencijala za budući napredak.

Ovaj završni rad uspješno je postigao svoje ciljeve pružajući cjelovito razumijevanje gospodarenja energijom i njegove važnosti u postizanju održivog razvoja. Analiza različitih praksi gospodarenja energijom, kao i strategija za implementaciju tih praksi u različitim sektorima, rasvijetlila je izazove i mogućnosti u području gospodarenja energijom. Rasprava o vladinim politikama, propisima i poticajima pokazala je njihovu ključnu ulogu u promicanju usvajanja praksi održivog upravljanja energijom.

Opis trenutnog stanja praksi gospodarenja energijom i njihove primjene u raznim industrijama uspostavio je čvrst temelj za razumijevanje trenutnog krajolika upravljanja energijom i potencijala za budući napredak. Osim toga, kritičkom raspravom o postojećim rješenjima i identificiranjem područja za buduća istraživanja, ova je teza pridonijela trenutnom razumijevanju praksi održivog upravljanja energijom, potičući održiviju budućnost.

Kao posljednja napomena, bitno je priznati da je upravljanje energijom polje koje se stalno razvija, te da su za postizanje ciljeva održivog razvoja potrebni kontinuirano istraživanje i razvoj. Ova teza služi kao odskočna daska za buduća istraživanja u gospodarenju energijom, s nadom da će potaknuti daljnja istraživanja i inovacije u tom području. Poticanjem usvajanja praksi održivog upravljanja energijom, možemo raditi zajedno prema održivijoj, energetske učinkovitijoj budućnosti za sve.

Buduća istraživanja u području upravljanja energijom i njezine uloge u postizanju održivog razvoja trebaju istražiti inovativne prakse upravljanja energijom, kao što su napredni algoritmi, umjetna inteligencija, blockchain tehnologija i Internet stvari (IoT), kako bi se poboljšala učinkovitost, pouzdanost i sigurnost energetske sustava. Istražiti potencijal novih tehnologija obnovljivih izvora energije, kao što su napredni solarni paneli, vjetroturbine i sustavi za pohranu energije. Ispitati učinkovitost vladinih politika, propisa i poticaja za usvajanje praksi održivog upravljanja energijom u različitim sektorima i identificirajte najbolje prakse za promicanje njihove provedbe. Provesti detaljne studije slučaja uspješnih inicijativa za upravljanje energijom u raznim industrijama i regijama, kako bi se stekao uvid u čimbenike koji pridonose njihovom uspjehu i preprekama koje mogu spriječiti njihovo šire usvajanje. Razviti sveobuhvatne strategije upravljanja energijom prilagođene određenim sektorima, kao što su industrija, građevinarstvo i transport, uzimajući u obzir jedinstvene izazove i prilike u svakom sektoru.



Baveći se ovim preporukama, buduća istraživanja mogu doprinijeti dubljem razumijevanju praksi održivog upravljanja energijom, podržati njihovo široko usvajanje i u konačnici pomoći u stvaranju održivije budućnosti za sve.

## LITERATURA

- [1] IEA, (2020.) – International Energy Agency <https://www.iea.org>
- [2] <https://www.slideserve.com/sidone/proizvodnja-i-potro-nja-elektri-ne-energije>
- [3] Ackermann, T., Andersson, G., & Söder, L. (2001). Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, 57(3), 195-204.
- [4] HEP ODS d.o.o. „Razvoj SN mreže za razdoblje narednih 20 godina.
- [5] EIA. (2021). *International Energy Outlook 2021*. U.S. Energy Information Administration.
- [6] Spremanje električne energije [https://hr.wikipedia.org/wiki/Skladi%C5%A1tenje\\_energije\\_iz\\_elektri%C4%8Dne\\_mre%C5%BEE#](https://hr.wikipedia.org/wiki/Skladi%C5%A1tenje_energije_iz_elektri%C4%8Dne_mre%C5%BEE#)
- [7] Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1994). *Power system analysis*. McGraw-Hill.
- [8] Amin, S. M., & Wollenberg, B. F. (2005). Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(5), 34-41.
- [9] Asmus, P. (2010). *Introduction to the nanogrid*. Navigant Research.
- [10] IRENA. (2016). *Off-grid renewable energy systems: Status and methodological issues*. International Renewable Energy Agency.
- [11] IRENA. (2018). *Innovation landscape for a renewable-powered future: Solutions to integrate variable renewables*. International Renewable Energy Agency.
- [12] IRENA. (2020). *Renewable power generation costs in 2019*. International Renewable Energy Agency.
- [13] EIA. (2021). *International Energy Outlook 2021*. U.S. Energy Information Administration.
- [14] Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (2004). *Power system stability and control*. McGraw-Hill.
- [15] Denholm, P., & Hand, M. (2011). Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity. *Energy Policy*, 39(3), 1817-1830.
- [16] Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 137, 511-536.
- [17] Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (2016). *Power system analysis*. McGraw-Hill Education.

- [18] SCADA u elektroenergetskom sustavu  
<https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos%3A3520/datastream/PDF/view>
- [19] Sayed, Khairy & A.Gabbar, Hossam. (2017). SCADA and smart energy grid control automation.
- [20] Hossain, E., Al-Hammadi, A., & Muhammad, G. (2013). Smart grid: Opportunities, challenges and solutions. *Electric Power Systems Research*, 103, 49-59.
- [21] Clarke, G., Reynders, D., & Wright, E. (2004). Practical modern SCADA protocols: DNP3, 60870.5 and related systems. Newnes.
- [22] Pal, A. (2010). SCADA Systems. In *Industrial Process Automation Systems* (pp. 295-318). Butterworth-Heinemann.
- [23] Upute za operatere u dispečerskim centrima – HEP O.d.s. Elektrodalmacija Split
- [24] Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (2012). *Power system stability and control*. McGraw-Hill.
- [25 ] Regulacija napona i snage, <https://www.reinhausen.com/>
- [26] Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H., & Tipper, D. (2018). A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(1), 316-341
- [27] Li, Z., Wang, Q., & Yang, X. (2019). Genetic algorithm-based optimal allocation of distributed generation units in a distribution network. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 14(2), 863-872.
- [28] Gellings, C. W. (2009). *The smart grid: Enabling energy efficiency and demand response*. CRC Press.
- [29] Struktura elektroenergetskog sustava, <https://crushtymks.com/hr/energy-and-power/890-the-structure-of-electric-power-systems-generation-distribution-and-transmission-of-energy.html>
- [30] Palattella, M. R., Dohler, M., Grieco, A., Rizzo, G., Torsner, J., Engel, T., & Ladid, L. (2013). Internet of things in the 5G era: Enablers, architecture, and business models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34(3), 510-527.
- [31] Smart Grids, <https://infoteh.etf.ues.rs.ba/zbornik/2017/radovi/STS/STS-3.pdf>

- [32] Kezunovic, M., Liao, Y., & Deslatte, A. (2017). Fault detection, classification, and location using artificial neural networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(5), 2225-2233.
- [33] Internet of things (IoT), <https://www.i-scoop.eu/internet-of-things-iot/>
- [34] Siano, P. (2014). Demand response and smart grids - A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 461-478.
- [35] Nagata, T., & Sasaki, H. (2002). A multi-agent approach to power system restoration. *IEEE Transactions on Power Systems*
- [36] Mengelkamp, E., Gärtner, J., Rock, K., Kessler, S., Orsini, L., & Weinhardt, C. (2018). Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid. *Applied Energy*, 210, 870-880.

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Dijelovi elektroenergetskog sustava [2].....	7
Slika 2.2. Spremanje električne energije [6].....	9
Slika 2.3. Trafostanica 110/20kV – HEP ODS d.o.o.....	15
Slika 3.4. Nacionalni dispečerski centar – HOPS.....	20
Slika 3.5. Primjer kibernetičkog napada na SCADA sustav [18].....	25
Slika 4.6. SCADA za primjer elektroprivrede [19].....	27
slika 4.7. Aplikacija WS 500 za pristup SCADA sustavu – TJ Sinj.....	29
Slika 4.8. Jednopolna shema distribucijske mreže – TJ Sinj.....	30
Slika 4.9. Primjer signala SCADA sustava (lista događaja) – TJ Sinj.....	32
Slika 4.10. Stup srednjeg napona sa ugrađenom automatizacijskom opremom – TJ Sinj.....	33
Slika 4.11. Upravljanje rastavnom sklopkom u SCADI – TJ Sinj.....	34
Slika 5.12. Regulacijska sklopka energetskog transformatora [25].....	39
Slika 6.13. Infrastruktura pametne mreže [31].....	47
Slika 6.14. IoT uređaji, primjena senzora [33].....	48