

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Hrvoje Bulat

**ODREĐIVANJE PARAMETARA MODELA ELEKTRIČNOG
OPTEREĆENJA U SVRHU NAPREDNE ANALIZE
SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2025.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Hrvoje Bulat

**ODREĐIVANJE PARAMETARA MODELA ELEKTRIČNOG
OPTEREĆENJA U SVRHU NAPREDNE ANALIZE
SIGURNOSTI ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA**

DOKTORSKI RAD

Mentor: prof. dr. sc. Dubravko Franković

Rijeka, 2025.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF ENGINEERING

Hrvoje Bulat

**DETERMINATION OF ELECTRICAL LOAD MODEL
PARAMETERS FOR ADVANCED POWER SYSTEM
CONTINGENCY ANALYSIS**

DOCTORAL DISSERTATION

Rijeka, 2025.

Mentor doktorskog rada: prof. dr. sc. Dubravko Franković, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet

Doktorski rad obranjen je dana _____ na Tehničkom fakultetu Sveučilišta u Rijeci, pred povjerenstvom u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Saša Vlahinić, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci

2. Izv. prof. dr. sc. Rene Prenc, Tehnički fakultet, Sveučilište u Rijeci

3. Prof. dr. sc. Juraj Havelka, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu

ZAHVALA

Zahvaljujem mentoru, prof. dr. sc. Dubravku Frankoviću, na konstruktivnim diskusijama najrazličitijih tema iz područja struke, a ponajprije na podršci i neprekidnim poticajima s ciljem uspješnog dovršetka ovog rada.

Zahvaljujem mladom znanstveniku, dr. sc. Alenu Jakopliću, na svim korisnim savjetima iz područja primjene umjetne inteligencije u elektroenergetici.

Dugogodišnjim kolegama i prijateljima iz Elektre Karlovac zahvaljujem na razumijevanju i podršci, kao i na podacima iz realnog pogona električnog opterećenja priključenog na TS Oštarije. Ovaj rad bio bi znatno skromniji bez mogućnosti usporedbe rezultata proračuna sa stvarnim pogonskim vrijednostima.

Moja djeca – sin Ante i kći Marijana – najvažnije su osobe u mom životu. Velika mi je želja da ovaj rad njima bude inspiracija, poticaj i putokaz kako je sve moguće postići uz odgovarajući trud.

Zahvalu završavam sjećanjem na moje prerano preminule roditelje – majku Nedu i oca Juru – koji su mi uvijek bili podrška i oslonac.

SAŽETAK

Vođenje elektroenergetskog sustava (EES) kompleksan je i, u tehničkom smislu, vrlo zahtjevan posao. Udio obnovljivih izvora u strukturi proizvodnje električne energije u stalnom je porastu, a proizvodnju električne energije ovih izvora ponajprije karakterizira nepredvidljivost i nestalnost, što stvara nove izazove za inženjere koji se bave vođenjem, planiranjem i razvojem elektroenergetskog sustava.

Vođenje elektroenergetskog sustava nije moguće bez kvalitetnog planiranja, niti bez složenih programskih paketa za simuliranje različitih scenarija do kojih može doći u svakodnevnom pogonu. Nužan preduvjet rada navedenih programskih paketa je precizno modeliranje elemenata elektroenergetskog sustava kako bi simulirani scenariji bili što realniji, te kako bi operateri sustava, na osnovu rezultata takvih simulacija, mogli poduzimati radnje u cilju održavanja sustava stabilnim. Jedinu nepoznanicu u postupku modeliranja elektroenergetskog sustava predstavlja električno opterećenje – skup svih potrošača koji su u određenom trenutku priključeni na elektroenergetski sustav.

U ovom radu opisana je napredna N-1 analiza sigurnosti elektroenergetskog sustava koja je bazirana na modalnoj analizi, te novi način određivanja parametara električnog opterećenja sustava baziran na neuronskim mrežama. Cilj ovih radnji je unaprijediti vođenje elektroenergetskog sustava i, na opisani način, pridonijeti osiguravanju dostupnosti električne energije svim krajnjim korisnicima.

Ključne riječi: vođenje elektroenergetskog sustava, analiza sigurnosti, električno opterećenje, određivanje parametara električnog opterećenja, neuronske mreže

ABSTRACT

Power system management is a complex and, in technical terms, very demanding job. The share of renewable sources in the structure of electricity production is constantly increasing, and the production of electricity from these sources is primarily characterized by unpredictability and volatility, which creates new challenges for engineers involved in managing, planning and developing the power system.

Power system management is not possible without quality planning, nor without complex software packages for simulating various scenarios that can occur in everyday operation. A necessary prerequisite for the operation of the aforementioned software packages is precise modeling of the elements of the power system so that the simulated scenarios are as realistic as possible, and so that system operators, based on the results of such simulations, can take actions to maintain the system stable. The only unknown in the process of modeling the power system is the electrical load - the set of all consumers that are connected to the power system at a given moment.

This paper describes an advanced N-1 analysis of the security of the power system based on modal analysis, and a new method of determining the parameters of the electrical load of the system based on neural networks. The aim of these actions is to improve the management of the power system and, in the described way, contribute to ensuring the availability of electricity to all end users.

Keywords: power system management, analysis of the security of the power system, electrical load, determination of the electrical load parameters, neural networks

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Problem i predmet istraživanja s hipotezom.....	1
1.2. Znanstvena motivacija	2
1.3. Svrha i ciljevi istraživanja	3
1.4. Dosadašnja istraživanja u području određivanja parametara modela električnog opterećenja za naprednu analizu sigurnosti elektroenergetskog sustava	3
1.5. Očekivani znanstveni doprinos istraživanja	5
1.6. Metodologija istraživanja i struktura doktorskog rada	5
2. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA.....	8
3. NAPONSKA STABILNOST.....	14
3.1. Utjecaj prijenosne elektroenergetske mreže na naponsku stabilnost.....	15
3.2. Utjecaj generatora na naponsku stabilnost	21
3.3. Utjecaj električnog opterećenja na naponsku stabilnost.....	23
3.3.1. Ovisnost opterećenja o naponu	23
3.3.2. Dinamika obnavljanja opterećenja	26
3.3.3. Asinkroni motori	27
3.3.4. Regulacijski transformatori	32
3.3.5. Termostatska opterećenja.....	34
4. MODELIRANJE ELEKTRIČNOG OPTEREĆENJA	35
4.1. Razvoj modela električnog opterećenja.....	37
4.2. Modeliranje električnog opterećenja bazirano na komponentama	41
4.3. Modeliranje električnog opterećenja bazirano na mjerenju	44
5. NAPREDNA N-1 ANALIZA NEPREDVIĐENIH DOGAĐAJA	49

5.1.	V-Q osjetljivost i modalna analiza u procjeni naponske stabilnosti.....	49
5.1.1.	Provjera $V - Q$ osjetljivosti	50
5.1.2.	Modalna analiza	52
5.2.	Utjecaj izvora jalove snage i načina modeliranja električnog opterećenja na procjenu naponske stabilnosti	54
5.2.1.	Utjecaj sinkronih generatora	54
5.2.2.	Utjecaj obnovljivih izvora električne energije	55
5.2.3.	Utjecaj baterijskih sustava za pohranu električne energije	56
5.2.4.	Utjecaj regulacijskih transformatora	56
5.2.5.	Utjecaj električnog opterećenja	56
5.3.	Algoritam proširene analize nepredviđenih događaja	57
5.4.	Verifikacija algoritma proširene analize nepredviđenih događaja	59
5.4.1.	Rezultati provedenih simulacija	63
5.4.2.	Prikaz utjecaja distribuiranih izvora i postrojenja za pohranu električne energije ..	65
5.4.3.	Prikaz utjecaja sinkronih generatora	67
5.4.4.	Prikaz utjecaja regulacijskih transformatora	68
5.4.5.	Prikaz utjecaja modeliranja električnog opterećenja.....	69
6.	MODEL ZA IZRADU BAZE SINTETIČKIH PODATAKA ZA TRENIRANJE NEURONSKE MREŽE	71
7.	METODA ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA MODELA ELEKTRIČNOG OPTEREĆENJA TEMELJENA NA NEURONSKIM MREŽAMA	81
7.1.	Neuronske mreže	81
7.2.	Mreže dugotrajne kratkoročne memorije	82
7.3.	Mreže dvosmjerne dugotrajne kratkoročne memorije.....	84
7.4.	Priprema ulaznih podataka	85
7.5.	Određivanje parametara modela električnog opterećenja	86

7.5.1.	Baza podataka za trening mreže.....	86
7.5.2.	Normalizacija podataka.....	88
7.5.3.	Metoda gašenja.....	89
7.5.4.	Arhitektura modela.....	89
7.5.5.	Obrazloženje odabira.....	92
7.5.6.	Treniranje BiLSTM modela	93
7.5.7.	Analiza distribucije podataka	95
7.5.8.	Pokazatelji točnosti rezultata metode.....	97
7.5.9.	Vizualni prikaz točnosti modela.....	101
8.	PRIMJENA METODE ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA ELEKTRIČNOG OPTEREĆENJA	106
8.1.	Trening BiLSTM neuronske mreže.....	109
8.1.1.	Pokazatelji točnosti rezultata metode za tropolne kvarove	111
8.1.2.	Pokazatelji točnosti rezultata metode za manipulacije regulacijskom sklopkom ..	114
8.2.	Primjena stvarnih kvarova u predikciji parametara električnog opterećenja	118
8.2.1.	Stvarni kvar br. 1	119
8.2.2.	Stvarni kvar br. 2.....	120
8.2.3.	Stvarni kvar br. 3.....	121
8.2.4.	Stvarni kvar br. 4.....	122
8.2.5.	Stvarni kvar br. 5	123
8.2.6.	Predikcije ciljanih vrijednosti na osnovu stvarnih kvarova	124
8.3.	Primjena stvarnih manipulacija regulacijskom sklopkom u predikciji parametara električnog opterećenja	125
8.3.1.	Uzorak br. 1	126
8.3.2.	Uzorak br. 2.....	127
8.3.3.	Uzorak br. 3.....	128

8.3.4. Uzorak br. 4.....	129
8.3.5. Uzorak br. 5.....	130
8.3.6. Uzorak br. 6.....	131
8.3.7. Uzorak br. 7.....	132
8.3.8. Uzorak br. 8.....	133
8.3.9. Uzorak br. 9.....	134
8.3.10. Predikcije ciljanih vrijednosti na osnovu stvarnih manipulacija regulacijskom sklopkom.....	135
8.4. Analiza rezultata metode za određivanje parametara električnog opterećenja.....	136
8.5. Analiza primjene metode za određivanje parametara električnog opterećenja na stvarnim zapisima.....	139
9. ZAKLJUČAK	143
Literatura	145
Popis oznaka i kratica.....	158
Popis slika	162
Popis tablica	166
PODACI O AUTORU	168
POPIS OBJAVLJENIH RADOVA AUTORA.....	169
PRILOZI.....	175
Stvarni kvar br. 1: efektivne vrijednosti struja i napona	176
Stvarni kvar br. 2: efektivne vrijednosti struja i napona	178
Stvarni kvar br. 3: efektivne vrijednosti struja i napona	180
Stvarni kvar br. 4: efektivne vrijednosti struja i napona	182
Stvarni kvar br. 5: efektivne vrijednosti struja i napona	184
Stvarni kvar br. 1: trenutne vrijednosti struja i napona	186
Stvarni kvar br. 2: trenutne vrijednosti struja i napona	188

Stvarni kvar br. 3: trenutne vrijednosti struja i napona	190
Stvarni kvar br. 4: trenutne vrijednosti struja i napona	192
Stvarni kvar br. 5: trenutne vrijednosti struja i napona	194

1. UVOD

1.1. Problem i predmet istraživanja s hipotezom

Energija pokreće čovječanstvo. Život suvremenog čovjeka nezamisliv je bez energije, a električna energija među svim energentima ima poseban značaj. Život u suvremeno uređenim domovima, upotreba čitavog spektra uređaja koji život čine ugodnijim, mogućnost komunikacije skoro sa svake lokacije na Zemlji, transfer novčanih sredstava na tisućama kilometara udaljene lokacije – sve to omogućavaju uređaji i sustavi koji su potrošači električne energije. Bez električne energije ni ostali energenti ne mogu ostvariti punu funkciju: sustavi plinskog grijanja ne funkcioniraju bez električne energije koja upravlja grijanjem (uključivanje grijanja u određenom trenutku, aktiviranje pumpe za cirkulaciju tople vode, itd.), bez električne energije nije moguće natočiti automobilsko gorivo na benzinskoj pumpi, vodoopskrba nije moguća bez snažnih elektromotora koji pogone vodene pumpe, itd.

Vođenje elektroenergetskog sustava (EES) kompleksan je i, u tehničkom smislu, vrlo zahtjevan posao. Traje 24 sata dnevno, 365 dana u godini, bez trenutka zaustavljanja. Vođenje elektroenergetskog sustava nije moguće bez kvalitetnog planiranja, niti bez složenih programskih paketa za simuliranje različitih scenarija do kojih može doći u svakodnevnom pogonu. Nužan preduvjet rada navedenih programskih paketa je precizno modeliranje elemenata elektroenergetskog sustava kako bi simulirani scenariji bili što realniji, te kako bi operateri sustava, na osnovu rezultata takvih simulacija, mogli poduzimati radnje u cilju održavanja sustava stabilnim. Jedinu nepoznanicu u postupku modeliranja elektroenergetskog sustava predstavlja električno opterećenje – skup svih potrošača koji su u određenom trenutku priključeni na elektroenergetski sustav.

U ovom radu opisana je napredna N-1 analiza sigurnosti elektroenergetskog sustava koja je bazirana na modalnoj analizi, te novi način određivanja parametara električnog opterećenja sustava. Cilj ovih radnji je unaprijediti vođenje elektroenergetskog sustava i, na opisani način, pridonijeti osiguravanju dostupnosti električne energije svim krajnjim potrošačima, te (u konačnici) upotrebi svih uređaja i sustava koji predstavljaju standard suvremenog življenja i koji život čine ugodnijim i kvalitetnijim u svakom smislu.

1.2. Znanstvena motivacija

Električna energija danas se, u tržišnim uvjetima, sve više smatra robom – predmetom trgovanja. Ekonomija većine zemalja suvremenog svijeta funkcionira na principu otvorenog tržišta pa je takav tretman električne energije logičan i očekivan. Neovisno o tome, električna energija ima svoje fizikalne osobine koje je nemoguće zanemariti: nije je moguće uskladištiti, barem ne u mjeri koja je dovoljna za zadovoljavanje rastuće potrebe za potrošnjom. Baterijska postrojenja za skladištenje električne energije relativno su nova pojava, i vrijeme koje dolazi će pokazati koliko (i u kojim količinama) ova postrojenja mogu kvalitetno skladištiti energiju, te je na zahtjev pravodobno isporučiti natrag u EES.

Vođenje EES-a podrazumijeva neprekidno održavanje ravnoteže između proizvedene i potrošene električne energije. Točnije, zbroj proizvedene električne energije i električne energije koja je uvezena u određeni EES, u svakom trenutku mora odgovarati zbroju potrošene električne energije i gubitaka u tom EES-u.

Kvarovi i poremećaji neizostavan su dio pogona EES-a. Kvarovi i poremećaji nastoje se svesti na najmanju moguću mjeru, na samo radi osiguranja kontinuirane isporuke električne energije krajnjim potrošačima, nego i zbog sprječavanja ugroze živih bića koja se nalaze u blizini elektroenergetskih postrojenja i nastanka materijalne štete na elektroenergetskim postrojenjima i imovini pravnih i fizičkih osoba sa dugoročnim posljedicama.

Posljedica kvarova i poremećaja najčešće su ispadi jednog ili više elemenata EES-a i nastanak sasvim nove situacije u sustavu u usporedbi sa stacionarnim pogonom. Operater sustava mora biti osposobljen odgovarajuće reagirati na svaku izvanrednu situaciju i vratiti pogon EES-a u redovno (stacionarno) stanje. U tu svrhu operateru sustava na raspolaganju je čitav niz alata. Ti alati su programski paketi za proračun različitih stacionarnih i dinamičkih stanja EES-a koji se kontinuirano nadograđuju, kako na osnovu teorijskih spoznaja, tako i na osnovu pogonskih iskustava, kako bi se vođenje elektroenergetskog sustava učinilo što pouzdanijim.

Znanstvena motivacija za izradu ovog doktorskog rada bila je dati doprinos povećanju sigurnosti rada EES-a prijedlogom primjene napredne N-1 analize sigurnosti EES-a koja je bazirana na modalnoj analizi i prijedlogom primjene nove metode određivanja parametara električnog opterećenja za tu analizu.

1.3. Svrha i ciljevi istraživanja

Svrha istraživanja je poduzeti korake u smislu unaprjeđenja sigurnosti vođenja EES-a. Istraživanje ima tri cilja.

Prvi cilj je razvoj algoritma za provođenje napredne N-1 analize sigurnosti temeljene na modalnoj analizi u uvjetima značajnije integracije distribuiranih izvora i sustava za pohranu energije. Algoritam sadrži korektivne mjere koje poduzima operater sustava radi povećanja sigurnosti EES-a i koristi prednosti koje distribuirani izvori električne energije i postrojenja za skladištenje električne energije pružaju u smislu stabilnosti napona.

Drugi cilj istraživanja je izrada modela za generiranje opsežne baze sintetičkih podataka o kvarovima za različita stanja opterećenja u EES-u. Opsežna baza sintetičkih podataka o kvarovima potrebna je za treniranje BiLSTM (engl. *bidirectional long short-term memory*) neuronske mreže pomoću koje se određuju parametri modela električnog opterećenja sustava kao ciljane vrijednosti.

Treći cilj istraživanja je razvoj metode, temeljene na BiLSTM neuronskoj mreži, za određivanje parametara modela električnog opterećenja sustava. Upotrebom opsežne baze sintetičkih podataka o kvarovima, neuronska mreža se trenira da, na temelju ulaznih podataka, predvidi odgovarajuće parametre modela električnog opterećenja sustava.

1.4. Dosadašnja istraživanja u području određivanja parametara modela električnog opterećenja za naprednu analizu sigurnosti elektroenergetskog sustava

Sigurnost nekog EES-a mjeri se njegovom sposobnošću održavanja stanja ravnoteže u stacionarnom pogonu i za vrijeme poremećaja [1]. Sigurnost EES-a obuhvaća stabilnost i integritet sustava, te procjenu ravnotežnog stanja sustava sa aspekta preopterećenja i devijacija napona i frekvencije [2]. Analiza sigurnosti EES-a kontinuirano se provodi za različite scenarije nepredviđenih događaja koji mogu nastati u pogonu sustava. Svrha analiziranja ovih scenarija

je definiranje odgovarajuće reakcije od strane operatera sustava radi vraćanja sustava na optimalan način u ravnotežu, i u stacionaran pogon.

Tradicionalna analiza nepredviđenih događaja uobičajeno se temeljila na indeksima uspješnosti [3] *PI* (engl. *performance indices*), faktorima osjetljivosti [4], statističkoj analizi [5] [6] i opsežnim simulacijama [7] [8]. Za analizu N-k nepredviđenih događaja, istraživači su koristili metode temeljene na optimizaciji [9] [10] [11] [12] [13] [14]. Dok su računala bila znatno slabija u usporedbi s današnjima, analize nepredviđenih događaja provodile su se metodama analize nepredviđenosti, a te metode bile su temeljene na indeksu uspješnosti *PI* [15] [16] [17]. U ovim je metodama procjena ozbiljnosti nepredviđenog događaja vršena estimacijom vrijednosti indeksa uspješnosti *PI* nakon pojave nepredviđenog događaja.

Analiza sigurnosti općenito se provodi pomoću različitih programskih paketa unutar kojih se detaljno modeliraju elementi EES-a. Električno opterećenje EES-a njegov je najslabije istražen parametar. Za razliku od ostalih elemenata (generatora, transformatora, dalekovoda, kompenzacijskih uređaja, itd.) sustava, za koje njihovi proizvođači deklariraju parametre potrebne za modeliranje, električno opterećenje je nepoznanica iz jednostavnog razloga što je nemoguće znati kakav je skup potrošača u određenom trenutku priključen na elektroenergetski sustav. Osim toga, dinamički odziv opterećenja predstavlja ključan mehanizam naponske stabilnosti elektroenergetskog sustava koji pokreće dinamičku evoluciju napona te, u ekstremnim slučajevima, dovodi do naponskog kolapsa [18]. Određivanje parametara modela električnog opterećenja predstavlja težak problem, a srž tog problema je identifikacija i modeliranje sastava opterećenja u određenom trenutku.

Radi rješavanja ovog problema istraživao je utjecaj modeliranja električnog opterećenja na procjenu naponske stabilnosti i pouzdanosti EES-a [19] [20] [21] [22] [23] [24], vršena je procjena dinamičkih parametara električnog opterećenja na osnovu mjerenja provedenih tijekom manipulacija regulacijskom sklopkom transformatora koja radi pod opterećenjem [25], procjena dinamičkih parametara električnog opterećenja na osnovu mjerenja PMU (engl. *Phasor Measurement Unit*) uređajima [26], ili na osnovu zapisa kvarova u EES-u [27]. Sumarni prikazi modeliranja električnog opterećenja prikazani su u [28] [29] [30] [31] [32].

1.5. Očekivani znanstveni doprinos istraživanja

Prvi znanstveni doprinos ovog rada je razvoj algoritma za provođenje napredne N-1 analize sigurnosti EES-a temeljene na modalnoj analizi, u uvjetima značajnije integracije distribuiranih izvora i sustava za pohranu energije. Drugi znanstveni doprinos je osmišljavanje modela za izradu baze sintetičkih podataka različitih stanja opterećenja EES-a, za treniranje neuronske mreže koja određuje statičke i dinamičke parametre električnog opterećenja. Treći znanstveni doprinos je kreiranje metode za određivanje parametara statičkih i dinamičkih komponenti modela električnog opterećenja temeljene na neuronskim mrežama.

Znanstveni doprinosi:

1. Algoritam za provođenje napredne N-1 analize sigurnosti temeljene na modalnoj analizi u uvjetima značajnije integracije distribuiranih izvora i sustava za pohranu energije
2. Model za izradu baze sintetičkih podataka različitih stanja opterećenja EES-a za treniranje neuronske mreže koja određuje statičke i dinamičke parametre električnog opterećenja
3. Metoda za određivanje parametara statičkih i dinamičkih komponenti modela električnog opterećenja temeljena na neuronskim mrežama

1.6. Metodologija istraživanja i struktura doktorskog rada

Provedeno istraživanje obuhvaća razvoj algoritma za naprednu N-1 analizu sigurnosti EES-a u uvjetima značajnije integracije distribuiranih izvora i sustava za pohranu električne energije. Napredna N-1 analiza sigurnosti EES-a bazirana je na modalnoj analizi. Algoritam prikazuje korektivne mjere koje operator sustava poduzima u cilju povećanja sigurnosti (upravljanje proizvodnjom klasičnih elektrana, upravljanje regulacijskim sklopkama transformatora, upravljanje proizvodnjom distribuiranih izvora električne energije i upravljanje postrojenjima za pohranu električne energije) i analizira rezultate poduzetih korektivnih mjera u smislu njihovog doprinosa stabilnosti napona.

Daljnji tijek istraživanja prikazuje izradu modela za generiranje velikog broja sintetičkih podataka o kvarovima u elektroenergetskoj mreži. Model je izrađen u programskom paketu za analizu rada EES-a, a sastoji se od trafostanice koja povezuje prijenosnu i distribucijsku naponsku razinu, transformatora sa regulacijskom sklopkom koja radi pod opterećenjem, te modela električnog opterećenja koji sadrži statičku i dinamičku komponentu opterećenja. Na strani priključenog opterećenja primjenjuju se trofazni kvarovi i manipulira se radom regulacijske sklopke u cilju postizanja poremećaja mrežnog napona. Čitavo vrijeme mijenjaju se parametri priključenog opterećenja i bilježi se njegov odziv na poremećaje napona.

Dobiveni podaci bilježe se u obliku vremenskih nizova i služe kao ulazni podaci za treniranje BiLSTM (engl. *bidirectional long short-term memory*) modela dvosmjerne neuronske mreže sa dugoročnom kratkotrajnom memorijom, pomoću koje se određuju parametri modela električnog opterećenja sustava kao ciljane vrijednosti. Razvijeni model u prvoj se fazi trenira na velikoj bazi generiranih sintetičkih podataka, a zatim se funkcioniranje tako istreniranog modela provjerava na bazi generiranih sintetičkih podataka kvarova s kojim se neuronska mreža do tada nije susretala.

Na kraju se konačna verifikacija vrši na zapisima stvarnih kvarova, te na zapisima odziva opterećenja prilikom rada regulacijske sklopke transformatora koja radi pod opterećenjem.

Doktorski rad sastoji se od devet poglavlja, pri čemu svako poglavlje samostalno razrađuje ključne aspekte istraživačkog rada.

U prvom poglavlju doktorskog rada iznosi se problem i predmet istraživanja, znanstvena motivacija, svrha i ciljevi istraživanja, dosadašnja istraživanja u području analize sigurnosti EES-a i određivanja parametara električnog opterećenja, očekivani znanstveni doprinos, metodologija znanstvenog istraživanja i struktura doktorskog rada.

U drugom poglavlju definirana je stabilnost EES-a, zatim sigurnost EES-a kao širi pojam, moguća pogonska stanja sustava i mehanizmi razvoja nestabilnosti. Opisani su postupci koji se provode u cilju održavanja EES-a stabilnim kako bi se osigurala sigurna opskrba električnom energijom krajnjih potrošača.

Treće poglavlje opisuje fenomen naponske stabilnosti i dijelove EES-a koji imaju utjecaj na naponsku stabilnost. Detaljno je opisano električno opterećenje kao fizikalni element koji najviše utječe na razvoj naponske nestabilnosti.

U četvrtom poglavlju obrađena je problematika modeliranja električnog opterećenja EES-a: od razvoja modeliranja, do metoda koje se danas najčešće primjenjuju, uz analizu prednosti i nedostataka postojećih metoda modeliranja.

U petom poglavlju prikazan je algoritam proširene (napredne) N-1 analize sigurnosti EES-a baziran na modalnoj analizi, zajedno sa modelom stvarnog sustava na kojem je provedena verifikacija algoritma. U nastavku je analiziran utjecaj pojedinih elemenata EES-a na održavanje naponske stabilnosti.

Šesto poglavlje prikazuje model za generiranje sintetičke baze podataka. Baza podataka se sastoji od velikog broja tropskih kvarova tijekom kojih su mijenjani parametri električnog opterećenja. Ova baza sprema se u formatu koji je pogodan za ulaz u neuronsku mrežu i služi za treniranje („učenje“) neuronske mreže.

U sedmom poglavlju predstavljena je metoda za određivanje parametara električnog opterećenja, bazirana na BiLSTM neuronskoj mreži. Ovo poglavlje obrađuje arhitekturu mreže, tijekom treniranja, postupak određivanja vrijednosti ciljanih parametara, pokazatelje točnosti rezultata metode i vizualni prikaz točnosti.

Osmo poglavlje prikazuje postupak primjene prethodno navedene metode na raspoloživim stvarnim pogonskim događajima i kvarovima u dijelu hrvatskog EES-a.

Deveto poglavlje sadrži zaključak provedenog istraživanja i prikazuje smjer daljnjih aktivnosti u cilju unaprjeđenja i optimizacije sustava.

2. STABILNOST ELEKTROENERGETSKOG SUSTAVA

Stabilnost elektroenergetskog sustava (EES) u najširem se smislu definira kao sposobnost EES-a da zadrži stanje ravnoteže tijekom normalnog pogona, i kao sposobnost da se vrati u stanje ravnoteže nakon poremećaja [1].

Do poremećaja u EES-u neminovno dolazi, a najteže posljedice po stabilnost EES-a stvaraju ispadi pojedinih njegovih elemenata iz pogona uslijed kvarova. Kvarove u EES-u nije moguće predvidjeti niti izbjeći, a najčešće nastaju zbog vanjskih utjecaja:

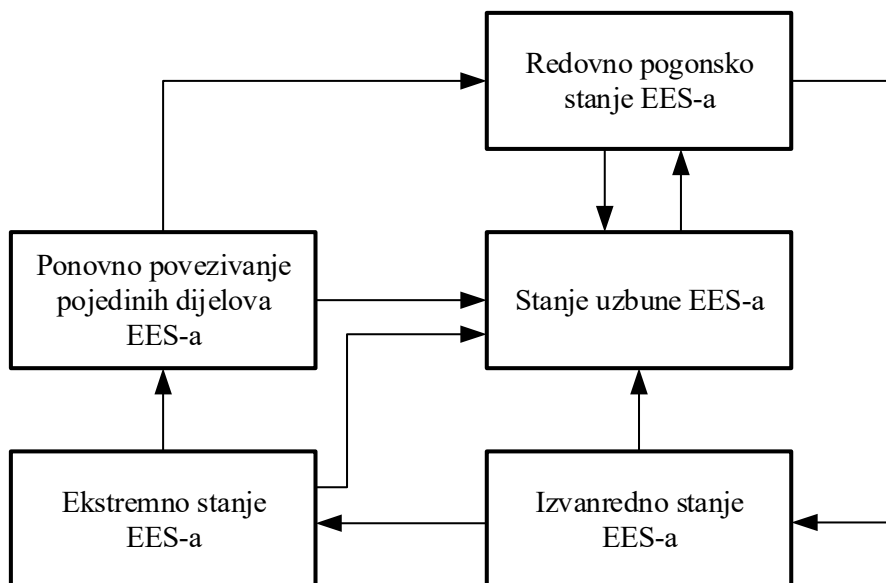
- atmosferskim pražnjenjem (npr. prilikom udara groma u određeni element EES-a),
- ljudskim djelovanjem (npr. zbog pada stabla na dalekovod kao posljedica neovlaštene sječe, ili kao posljedica ljudske nepažnje),
- djelovanjem životinja (npr. nastanak kratkog spoja kojeg na dalekovodima prouzroče ptice, ili nastanak kratkog spoja koji je posljedica pojave malih životinja unutar rasklopnih postrojenja).

Do kvarova može doći i zbog starenja opreme koja je ugrađena u EES, kao i zbog nepravodobnog ili neodgovarajućeg održavanja pojedinih elemenata EES-a.

Osim stabilnosti EES-a, drugi važan pojam za njegov pogon predstavlja sigurnost EES-a. Sigurnost EES-a predstavlja širi pojam pa, osim stabilnosti, obuhvaća i integritet sustava, te procjenu ravnotežnog stanja sustava sa aspekta preopterećenja i devijacija napona i frekvencije [2]. Skup neposrednih poremećaja naziva se nepredviđenim događajima. Sigurnost EES-a predstavlja sposobnost EES-a da preživi vjerojatne nepredviđene događaje bez prekida isporuke električne energije krajnjim korisnicima. S gledišta sigurnosti EES-a, pogonska stanja sustava mogu se klasificirati kao na Slici 1.

EES u redovnom pogonskom stanju zadovoljava potražnju za električnom energijom svih krajnjih korisnika. Sve fizikalne veličine koje su važne za rad sustava rade s vrijednostima unutar deklariranih tehničkih ograničenja, pa je sustav sposoban izdržati nepredviđene događaje. Stanje uzbune nastaje kada neke od spomenutih fizikalnih veličina (struje u pojedinim granama sustava ili naponi u njegovim čvorovima) prekorače deklarirana tehnička ograničenja uslijed neočekivanog porasta potražnje ili kvara unutar sustava, ali EES i dalje

ostaje u pogonu i opskrbljuje krajnje korisnike. Nakon nastanka stanja uzbune potrebno je poduzeti preventivne mjere kako bi se sustav vratio u normalno pogonsko stanje.



Slika 1: Klasifikacija pogonskih stanja EES-a s gledišta sigurnosti [33]

U izvanrednom stanju EES i dalje opskrbljuje krajnje korisnike, ali su prekoračena tehnička ograničenja pojedinih elemenata sustava ozbiljnije prirode. Ovo stanje najčešće nastaje ukoliko nakon stanja uzbune nisu poduzete odgovarajuće preventivne mjere ili poduzete preventivne mjere nisu bile uspješne. EES može iz normalnog stanja prijeći u izvanredno stanje nakon ozbiljnih nepredviđenih situacija poput višestrukih kvarova elemenata sustava.

EES iz izvanrednog stanja može prijeći u ekstremno stanje ako nisu poduzete nikakve korektivne radnje. Najgoru varijantu ovog stanja predstavlja djelomični ili potpuni prestanak isporuke električne energije krajnjim korisnicima.

Procjena sigurnosti EES-a obuhvaća procjenu statičke i dinamičke sigurnosti. Procjena statičke sigurnosti uključuje:

- određivanje raspoloživog prijenosnog kapaciteta i identifikaciju zagušenja mreže za stanja prije nastanka nepredviđenih događaja,
- provjeru napona na sabirnicama sustava i moguća ograničenja tokova snage sustava za stanja nakon nastanka nepredviđenih događaja.

Dinamička procjena sigurnosti uključuje:

- provjeru stabilnosti kuta rotora generatora, stabilnosti napona i stabilnosti frekvencije,
- provjeru odstupanja frekvencije izvan graničnih vrijednosti tijekom dinamičkog stanja,
- provjeru odstupanja napona izvan graničnih vrijednosti tijekom dinamičkog stanja,
- provjeru prigušivanja oscilacija snage unutar podsustava i između podsustava na međusobno povezanoj mreži.

Za vođenje EES-a koriste se sustavi upravljanja energijom (engl. *EMS – Energy Management System*) koji uključuju brojne funkcije. Jedna od osnovnih funkcija sustava upravljanja je N-1 analiza nepredviđenih događaja koja analizira učinke ispada pojedinog elementa elektroenergetskog sustava (npr. dalekovod, transformator, proizvodna jedinica, kompenzacijski uređaj, itd.) na EES. Analiza nepredviđenih događaja u EES-u uključuje brojne proračune tokova snaga sa predefiniranom listom nepredviđenih događaja. Prilikom izvođenja N-1 analize izračunati tokovi snaga u pojedinim granama uspoređuju se sa strujnim ograničenjima dalekovoda i maksimalno dopuštenim opterećenjima generatora i transformatora, te se odstupanja napona čvorova EES-a uspoređuju s dopuštenim odstupanjima. Prekoračenje jednog ili više zadanih limita znači da se sustav ne može smatrati sigurnim. Operateri sustava, po primitku alarma od sustava za upravljanje energijom (EMS), poduzimaju korektivne radnje ovisno o vrsti upozorenja. Upozorenje se može odnositi na preopterećenje pojedinog elementa elektroenergetskog sustava (dalekovod, transformator, generator ili neki drugi element sustava) ili na odstupanje napona pojedinog čvora EES-a izvan dopuštenih granica. Svrha poduzimanja korektivnih radnji je poboljšanje razine sigurnosti EES-a što se postiže uključenjem pojedinih dalekovoda, rekonfiguracijom mreže, djelovanjem transformatora sa poprečnom regulacijom, redispečingom, itd. Moderni EMS sustavi sadrže module za analizu sigurnosti EES-a koji periodički proračunavaju razinu sigurnosti EES-a i alarmiraju voditelja sustava kad detektiraju potencijalnu ugrozu sigurnog rada sustava. Osim za vođenje EES-a, analiza nepredviđenih događaja koristi se i za potrebe planiranja i razvoja sustava.

Procjena sigurnosti EES-a, osim N-1 analize nepredviđenih događaja, uključuje i druge važne aspekte sigurnosti poput provjere kutne stabilnosti, stabilnosti frekvencije i naponske stabilnosti. Analizom sigurnosti definiraju se sigurna područja rada EES-a, ponovno postizanje ravnoteže (stacionarnog stanja) EES-a nakon nepredviđenih događaja u smislu preopterećenja, te u smislu odstupanja napona u pojedinim čvorovima.

N-1 analiza nepredviđenih događaja najčešće se provodi primjenom Newton–Raphsonove iterativne metoda za rješavanje sustava nelinearnih jednadžbi tokova snaga. Nakon rješavanja jednadžbi tokova snage za svaki nepredviđeni događaj, operativni limiti verificiraju se za sve grane i sve čvorove mreže. Za sve grane mreže provjeravaju se strujna ograničenja

$$I_{i-j} \leq I_{i-j_MAX} \quad (1)$$

a za sve čvorove mreže provjeravaju se odstupanja napona

$$U_{i_MIN} \leq U_i \leq U_{i_MAX} \quad (2)$$

U gornjim izrazima su:

- I_{i-j} – struja u pojedinoj grani (dalekovod, transformator, generator),
- I_{i-j_MAX} – maksimalno dopuštena struja u pojedinoj grani (dalekovod, transformator, generator),
- U_i – napon i –tog čvora,
- U_{i_MIN} – minimalno dopušteni napon i –tog čvora,
- U_{i_MAX} – maksimalno dopušteni napon i –tog čvora.

Ako su gornja ograničenja zadovoljena za sve nepredviđene događaje, EES se smatra sigurnim u smislu N-1 kriterija.



Slika 2: Klasifikacija stabilnosti EES-a [33]

Općeprihvaćena klasifikacija stabilnosti EES-a prikazana je na Slici 2. Kut napona, magnituda i frekvencija osnovne su veličine neophodne za definiranje i klasificiranje stabilnosti EES-a, pa se, posljedično, stabilnost EES-a dijeli na kutnu, frekvencijsku i naponsku stabilnost. Zbog nelinearne prirode elektroenergetskih sustava, njihova stabilnost ovisi i o početnim uvjetima, i o veličini poremećaja. Stabilnost EES-a može se podijeliti na male poremećaje kutne i naponske stabilnosti, te na velike poremećaje kutne i naponske stabilnosti.

Nestabilnost EES-a manifestira se na mnogo različitih načina, ovisno o trenutnoj konfiguraciji i načinu rada EES-a. Prvi problem stabilnosti EES-a odnosi se na kutnu stabilnost rotora sinkronih generatora, bilo u obliku neprigušenih elektromehaničkih oscilacija, ili u obliku kontinuiranog ubrzavanja rotora koje vodi gubitku sinkronizma [18]. Neprigušene elektromehaničke oscilacije sinkronih generatora nastaju zbog nedostatka prigušnog momenta, a ubrzavanje rotora sinkronih generatora posljedica je manjka sinkronizirajućeg momenta.

Problemi održavanja frekvencije najčešće nastaju kao posljedica velikih poremećaja unutar EES-a uslijed koji dolazi do odvajanja pojedinih njegovih dijelova u zasebne cjeline (tzv. otoke). Ova vrsta nestabilnosti podrazumijeva manjak raspoložive radne snage proizvodnih jedinica u novonastalim otocima i nemogućnost zadovoljavanja zahtjeva potrošača električne energije u tim otocima.

Naponsku nestabilnost EES-a uzrokuju njegovi potrošači – priključeno električno opterećenje. Sastavni dio električnog opterećenja priključenog na EES je njegova dinamička komponenta koja u kratkom vremenu (reda veličine sekunde) nakon poremećaja nastoji ponovno uspostaviti potrošnju kakva je bila u trenutku nastanka poremećaja. Dinamičku komponentu većinom predstavljaju asinkroni motori i komponente opterećenja koje su elektronički upravljane. Iako je električno opterećenje glavni uzročnik naponske nestabilnosti, gubitak sinkronizma generatora u određenim pogonskim uvjetima može prouzročiti naponski slom pojedinog dijela EES-a.

Stabilnost EES-a uglavnom je povezana s elektromehaničkim pojavama, ali na nju utječu i brzi elektromagnetski fenomeni, te spori termodinamički fenomeni. Ovisno o vrsti fenomena, može se govoriti o kratkoročnoj stabilnosti i dugoročnoj stabilnosti. Klasifikacija stabilnosti EES-a [18], bazirana na kriteriju vremena, odnosno uzroku nestabilnosti, prikazana je u Tablici 1.

Tablica 1: Klasifikacija stabilnosti elektroenergetskog sustava bazirana na kriteriju vremena

Duljina trajanja poremećaja	Nestabilnost koju uzrokuju generatori		Nestabilnost koju uzrokuju potrošači
Kratkotrajan poremećaj	Kutna stabilnost sinkronih generatora		Kratkotrajna naponska nestabilnost
	Prijelazna	Stacionarna	
Dugotrajan poremećaj	Frekvencijska stabilnost		Dugotrajna naponska nestabilnost

Do kratkotrajne nestabilnosti EES-a dolazi prilikom malih poremećaja, poput povećanja opterećenja. Takva vrsta nestabilnosti naziva se stacionarna nestabilnost. Dugotrajna nestabilnost EES-a nastaje kao posljedica kvarova unutar sustava, i ispada jednog ili više njegovih elemenata.

Tipična duljina trajanja nestabilnosti koje uzrokuju generatori povezana je sa dinamikom rotacijskih strojeva i najčešće iznosi nekoliko sekundi. Unutar ovog vremena djeluju automatski regulatori napona, sustavi uzbude generatora i turbinski regulatori. Poremećaji EES-a u trajanju od nekoliko sekundi nazivaju se kratkotrajnim poremećajima.

Dugotrajni poremećaji EES-a mogu trajati i nekoliko minuta. Unutar ovog vremenskog okvira razlikuju se dvije vrste problema stabilnosti:

- problemi održavanja frekvencije unutar EES-a zbog nepostojanja ravnoteže između proizvodnje i potrošnje,
- problemi održavanja napona unutar EES-a zbog električke udaljenosti čvorova u kojima su priključene proizvodne jedinice u odnosu na čvorove u kojima su priključena opterećenja.

S obzirom da je određivanje parametara modela električnog opterećenja tema ove doktorske disertacije, a naponsku nestabilnost EES-a prvenstveno uzrokuju njegovi potrošači (priključeno električno opterećenje), u idućem poglavlju detaljnije će se obraditi utjecaj električnog opterećenja na naponsku stabilnost.

3. NAPONSKA STABILNOST

Naponska stabilnost je sposobnost EES-a da održi napone u svim čvorovima unutar propisanih granica nakon poremećaja [1]. EES postaje naponski nestabilan u slučaju manjeg ili većeg poremećaja, kada dolazi do progresivnog propada napona kojeg operater sustava više nije u mogućnosti kontrolirati.

Naponska stabilnost jedan je od ključnih faktora stabilnosti EES-a i neodvojivo je povezana s jalovom snagom u sustavu. Glavni razlog nastanka naponske nestabilnosti je nemogućnost EES-a da odgovori zahtjevima za jalovom snagom.

Jalova snaga podržava magnetska i električna polja koja su neophodna za rad komponenti EES-a [34]. Ne troši se u EES-u, nego se pohranjuje u električnim i magnetskim poljima pojedinih komponenti sustava. Unutar EES-a kontinuirano se odvija izmjena jalove snage između elemenata sustava koji je proizvode i elemenata sustava koji pohranjuju jalovu snagu u svojim električnim i magnetskim poljima.

Nastanak električnog polja posljedica je prisutnosti izmjeničnog napona. Protjecanjem izmjenične struje kroz električni vodič stvara se magnetsko polje. Ova električna i magnetska polja kontinuirano se grade i nestaju s promjenjivim veličinama izmjeničnog napona i struje. Kada se električna i magnetska polja grade, elementi sustava pohranjuju jalovu snagu. Kada ova polja nestaju, jalova snaga vraća se u EES. Tok jalove snage predstavlja kontinuiranu izmjenu snage i energije, a jedinu potrošnju jalove snage predstavljaju gubitci unutar EES-a.

Osnovni uvjet naponske stabilnosti EES-a u određenom pogonskom stanju je da napon svakog čvora sustava raste kad se u taj čvor „utisne“ jalova snaga. Jednako tako, EES se smatra naponski nestabilnim ako u bilo kojem čvoru sustava dolazi do pada napona kad se u njega „utisne“ jalova snaga. Drugim riječima, EES naponski je stabilan ako je $V - Q$ osjetljivost pozitivna za svaki čvor sustava. EES smatra se naponski nestabilnim ako je $V - Q$ osjetljivost negativna za bilo koji čvor sustava.

Prilikom razmatranja problematike naponske stabilnosti ključan utjecaj imaju ovi dijelovi EES-a:

- prijenosna elektroenergetska mreža,
- generatori (proizvodne jedinice),

- električno opterećenje priključeno na EES.

Prijenosni EES ima određena ograničenja uslijed kojih može doći do problema s naponskom stabilnošću. Isto vrijedi i za proizvodne jedinice koje su glavni izvor jalove snage unutar EES-a. Električno opterećenje sustava, točnije njegova dinamička komponenta, predstavlja najznačajniji uzrok naponske nestabilnosti [18].

3.1. Utjecaj prijenosne elektroenergetske mreže na naponsku stabilnost

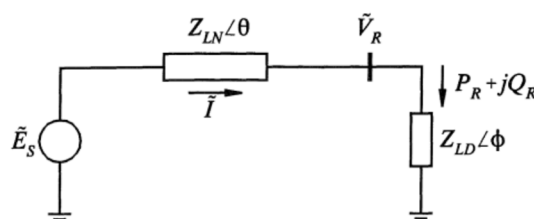
Dva su osnovna čimbenika koja treba analizirati prilikom razmatranja utjecaja prijenosne mreže na naponsku stabilnost:

- maksimalnu snagu koju prijenosna mreža može prenijeti do priključenog opterećenja,
- odnos snage priključenog opterećenja i napona.

Naponska nestabilnost nastaje kao posljedica pokušaja opterećenja da „povuče“ više snage nego što je EES u mogućnosti prenijeti i isporučiti. U EES-u koji je naponski stabilan, operater sustava ima mogućnost upravljanja objema komponentama snage i naponom sustava. Ako operater sustava nema kontrolu nad barem jednom od gore navedenih fizikalnih veličina, EES se smatra naponski nestabilnim.

Snaga koju troši električno opterećenje mijenja se u ovisnosti o frekvenciji i o naponu. Ovisnost električnog opterećenja o frekvenciji u analizama se zanemaruje jer su suvremeni EES-ovi međusobno povezani u velike interkonekcije, pa se frekvencija smatra stabilnim.

Na Slici 3 prikazan je jednostavan EES sa konstantnim izvorom napona E_S , koji napaja potrošač impedancije Z_{LD} prijenosnim dalekovodom impedancije Z_{LN} .



Slika 3: Jednostavan EES [1]

Ako se zanemari radna komponenta impedancije prijenosnog dalekovoda, u čvoru R vrijedi da je

$$V_R = E_S - jX \cdot I \quad (3)$$

U tom je slučaju snaga koju troši opterećenje

$$S = P + jQ = V_R \cdot I = V_R \cdot \frac{E_S - V_R}{-jX} \quad (4)$$

$$S = \frac{j}{X} (E_S \cdot V_R \cdot \cos\theta + jE_S \cdot V_R \cdot \sin\theta - V_R^2) \quad (5)$$

iz čega proizlazi da je

$$P = -\frac{E_S \cdot V_R}{X} \cdot \sin\theta \quad (6)$$

$$Q = -\frac{V_R^2}{X} + \frac{E_S \cdot V_R}{X} \cdot \cos\theta \quad (7)$$

Ove dvije jednačbe predstavljaju tokove snaga prikazanog jednostavnog EES-a koji nema gubitaka.

Karakteristike opterećenja su izrazi koji prikazuju ovisnost radne i jalove komponente električnog opterećenja o naponu V i neovisnoj varijabli z koja predstavlja zahtjev priključenih potrošača za opterećenjem. Zahtjev za opterećenjem predstavlja stvarnu snagu koju troši određeni potrošač ili skupina potrošača. Opći oblik karakteristika radne i jalove komponente električnog opterećenja može se prikazati kao:

$$P = P(z, V) \quad (8)$$

$$Q = Q(z, V) \quad (9)$$

Karakteristika opterećenja najčešće se prikazuje eksponencijalnim izrazima

$$P = z \cdot P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (10)$$

$$Q = z \cdot Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (11)$$

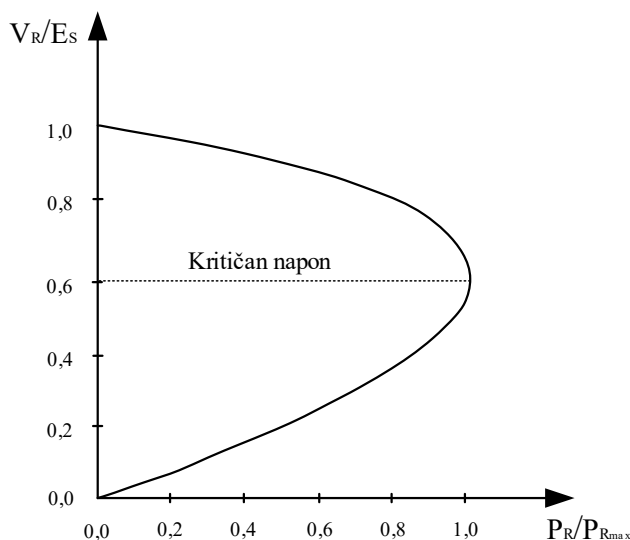
gdje su:

- P i Q – radna i jalova komponenta snage koju troše priključeni potrošači,
- zP_0 i zQ_0 – radna i jalova snaga komponenta snage koju troše priključeni potrošači pri nazivnom naponu V_0 ,

- z – varijabla zahtjeva za potrošnjom,
- V_0 – nazivni napon elektroenergetske mreže,
- α i β – udjeli konstantne impedancije, konstantne struje i konstantne snage za radnu (koeficijent α), odnosno za jalovu (koeficijent β) komponentu snage.

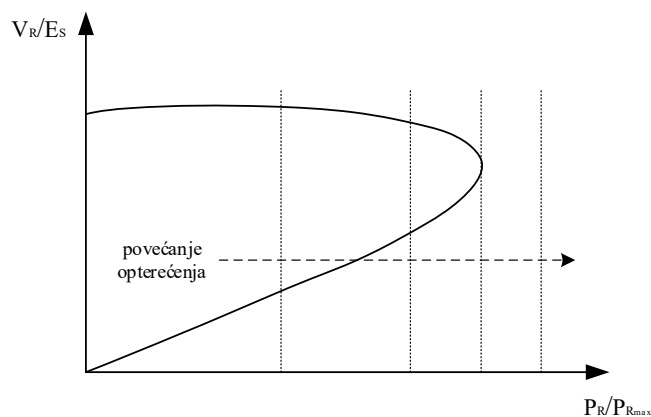
Krivulje koje prikazuju napon opterećenja kao funkciju radne komponente snage nazivaju se $P - V$ krivulje. Operateri sustava izračunavaju $P - V$ krivulje za svaki čvor EES-a kako bi u svakom trenutku imali informaciju o mogućnosti terećenja sustava u tom čvoru bez ugrožavanja naponske stabilnosti. $P - V$ krivulja prikazuje kako povećanje prijenosa radne snage kroz prijenosni sustav uzrokuje pad napona u čvoru u kojem je priključeno opterećenje. Razlog pada napona u ovom čvoru su gubitci jalove snage u EES-u.

Na Slici 4 vidljivo je kako kontinuirani rast potrošnje u krajnjem čvoru R jednostavnog EES-a sa Slike 3 može dovesti do značajnog pada napona i, u najgorem slučaju, do naponskog sloma. Do naponskog sloma dolazi u trenutku kad EES radi bez raspoložive rezerve jalove snage koja može popraviti naponske prilike u određenom čvoru. Koljeno $P - V$ krivulje predstavlja granicu između područja naponske stabilnosti i naponske nestabilnosti.



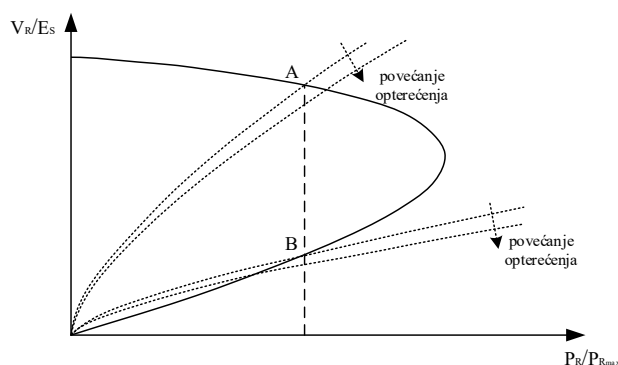
Slika 4: $P - V$ krivulja čvora R jednostavnog EES-a sa Slika 3

Na Slici 5 vidi se posljedica povećanja opterećenja. Točkaste okomite linije predstavljaju različite stacionarne komponente opterećenja. Točka u kojoj je karakteristika opterećenja tangenta $P - V$ krivulje odgovara maksimalnoj snazi koju je moguće prenijeti bez ugrožavanja naponske stabilnosti.



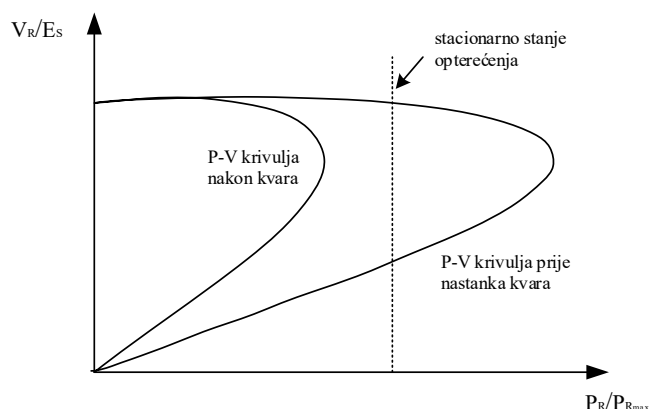
Slika 5: Prikaz $P - V$ krivulje za slučaj porasta opterećenja u određenom čvoru sustava

Na Slici 6 radne točke sustava A i B karakterizira ista radna snaga P koju sustav treba prenijeti, ali se rad sustava u ovim točkama bitno razlikuje zbog zahtjeva za opterećenjem z . Veći zahtjev za opterećenjem z , kada je sustav u radnoj točki A, rezultira određenim propadom napona i, u konačnici, većim opterećenjem. S druge strane, veći zahtjev za opterećenjem z , kada je sustav u radnoj točki B, rezultira propadanjem napona i smanjenjem opterećenja jer se točka B nalazi u nestabilnom dijelu $P - V$ krivulje. U konačnici ovakav scenarij u pravilu znači naponski slom sustava. Iscrtkana okomita linija na Sliku 6 (pravac na kojem su radne točke A i B sustava) predstavlja stacionarnu komponentu opterećenja. $P - V$ krivulje za svaki pojedini čvor EES-a odgovaraju prilikama u stacionarnom stanju.



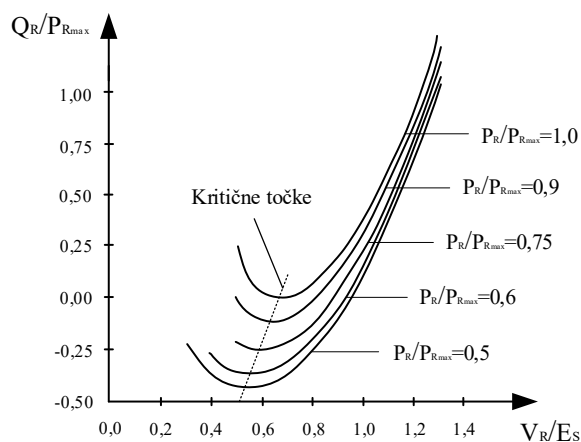
Slika 6: Prikaz $P - V$ krivulje za slučaj porasta zahtjeva za opterećenjem opterećenja u određenom čvoru sustava

Na Slici 7 vidi se posljedica kvara u prijenosnoj mreži koji za posljedicu ima ispad jednog ili više elemenata mreže. Zbog ispada dolazi do povećanja impedancije tog dijela mreže i do smanjenja napona pa, u skladu s tim, i $P - V$ krivulja mijenja oblik te može doći do situacije u kojoj ne postoji sjecište karakteristike opterećenja sa $P - V$ krivuljom, što rezultira naponskim slomom.



Slika 7: Prikaz $P-V$ krivulje određenog čvora sustava za slučaj kvara u prijenosnoj mreži koji za posljedicu ima ispad jednog ili više elemenata mreže

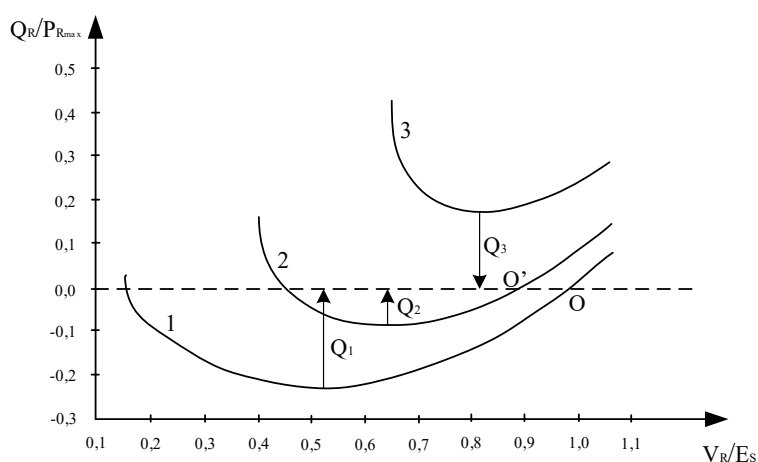
$Q - V$ krivulje prikazuju odnos jalove snage i napona u određenom čvoru elektroenergetskog sustava. Krivulje na Slici 8 pokazuju koliko je jalove snage potrebno „utisnuti“ u pojedini čvor kako bi se napon tog čvora zadržao u željenim granicama. Svaka $Q - V$ krivulja izračunava se za konstantni iznos radne komponente snage i za svaki čvor pokazuje kolika rezerva jalove snage postoji unutar sustava za određeni čvor u određenim pogonskim uvjetima.



Slika 8: $Q-V$ krivulje jednog čvora EES-a za različite vrijednosti radne komponente snage

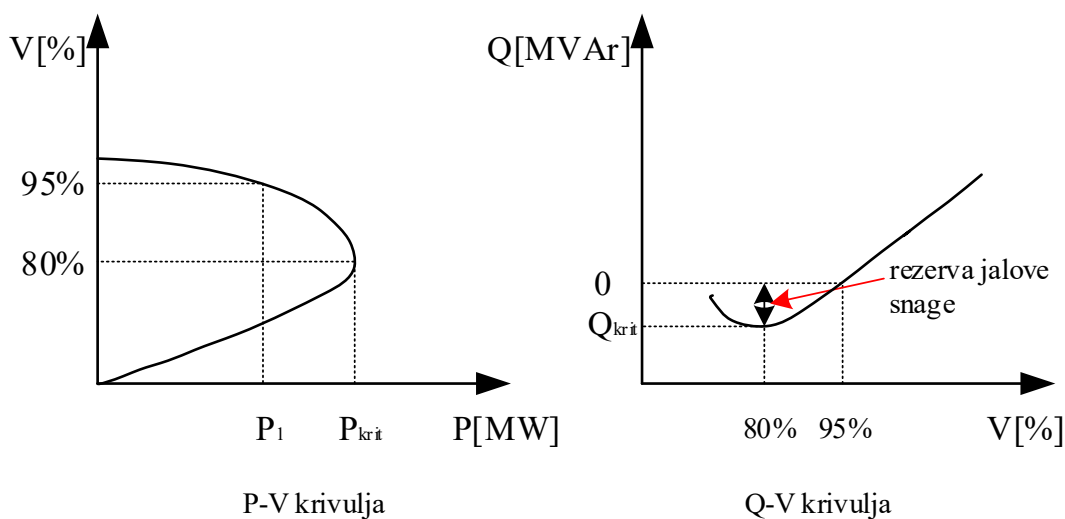
Na Slici 9 prikazane su tri $Q - V$ krivulje sa potrebnim zalihama jalove snage za održavanje normalnih naponskih prilika u određenom čvoru EES-a. $Q - V$ krivulja označena brojem 1 na Slici 9 odgovara normalnom pogonu EES-a u stacionarnom stanju daleko od maksimalnog opterećenja u čvoru sustava za koji je ova $Q - V$ krivulja izračunata. Radna točka označena je slovom O. $Q - V$ krivulja označena brojem 2 predstavlja pogonsko stanje sa značajnijim opterećenjem sustava u ovom čvoru. Radna točka je označena slovom O', a zakrivljenost krivulje izraženija je u usporedbi sa prethodnom. Jalove snage iznosa Q_1 i Q_2 predstavljaju margine (zalihost) jalove snage do točke gubitka stabilnosti.

$Q - V$ krivulja označena brojem 3 predstavlja pogonsko stanje u kojem pogon nije moguć bez injekcije jalove snage. Do ovakvog pogonskog stanja može doći uslijed kvara i (posljedično) povećanja reaktancije. Jalova snaga iznosa Q_3 predstavlja marginu (zalihost) jalove snage do uspostave normalnog pogonskog stanja. Ova je margina negativnog predznaka jer prikazuje iznos jalove snage koji sustavu u ovom čvoru nedostaje za uspostavu normalnog pogonskog stanja.

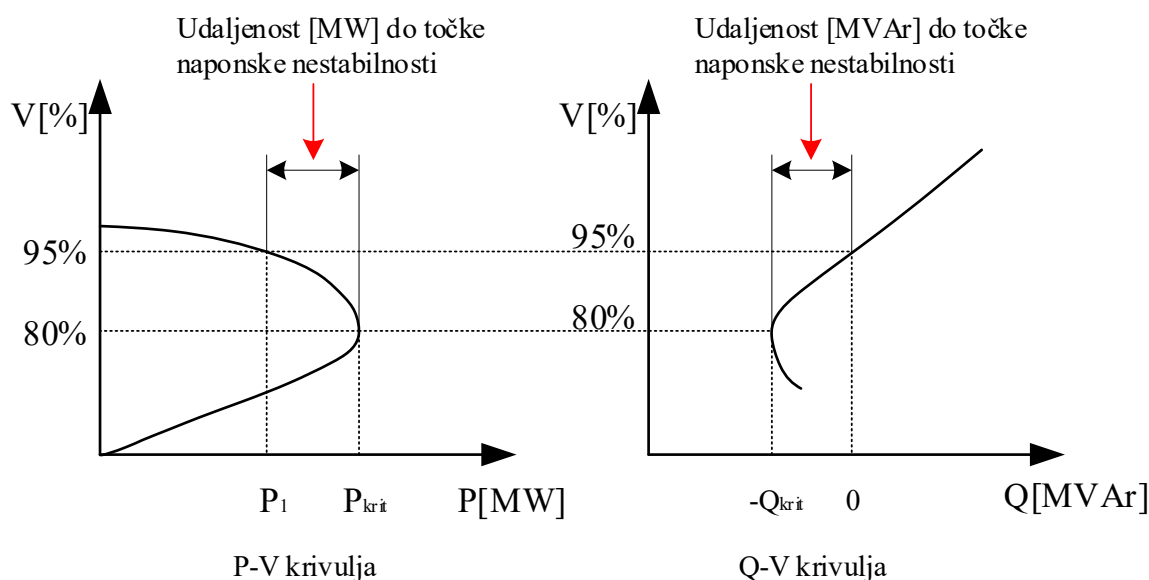


Slika 9: $Q - V$ krivulje sa potrebnim zalihama jalove snage za održavanje normalnih naponskih prilika u određenom čvoru EES-a

Zajednički prikaz $P - V$ i $Q - V$ krivulje određenog čvora EES-a (Slika 10 i Slika 11) daje najbolje informacije operateru sustava o stabilnosti sustava za taj čvor sa aspekta naponskih prilika. Iz ovog prikaza operater može utvrditi koliko je u određenom čvoru sustava moguće povećati radnu i jalovu komponentu opterećenja bez ugrožavanja naponske stabilnosti sustava.



Slika 10: Zajednički prikaz P-V i Q-V krivulje za određeni čvor sustava – rezerva jalove snage

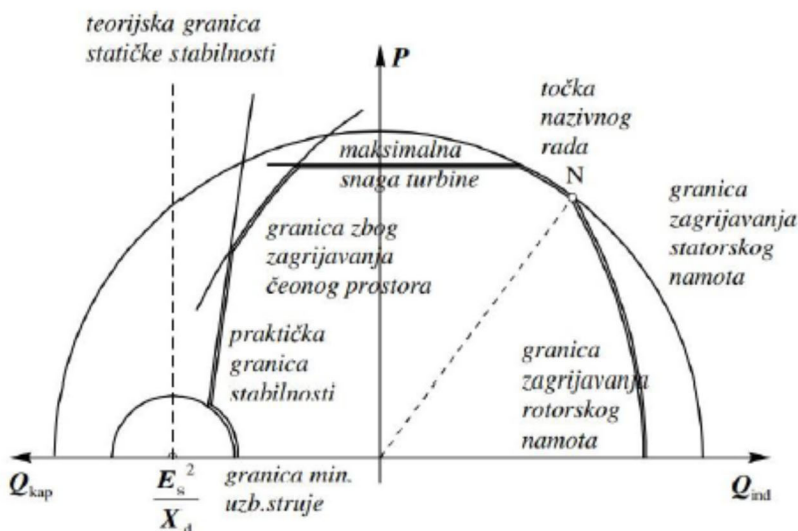


Slika 11: Zajednički prikaz P-V i Q-V krivulje za određeni čvor sustava – udaljenosti do točke nestabilnosti

3.2. Utjecaj generatora na naponsku stabilnost

Sinkroni generatori su primarni izvori jalove snage i najviše pridonose održavanju zadanog naponskog profila EES-a. Pogonske karakteristike pojedinog sinkronog generatora prikazuju njegove mogućnosti, uključujući i mogućnosti pružanja podrške održavanju željene vrijednosti

napona unutar EES-a. Pogonske karakteristike sinkronog generatora uobičajeno se prikazuju tzv. pogonskim kartama. Tipična pogonska karta sinkronog generatora prikazana je na Slici 12.



Slika 12: Pogonska karta sinkronog generatora

Nazivna snaga sinkronih generatora izražava se u [MVA] za nazivni napon, i za nazivni faktor snage. Generator može kontinuirano raditi pri definiranoj nazivnoj snazi bez pregrijavanja. Radna komponenta snage koju sinkroni generator može isporučiti u mrežu ograničena je mogućnostima pogonskog stroja (pogonski strojevi generatora u pravilu su različite vrste turbine) na određenu vrijednost u sklopu zadane nazivne snage u [MVA]. Jalova komponenta snage generatora određena je dozvoljenom strujom armature, dozvoljenom strujom uzbude i općenito limitima koji se odnose na dozvoljeno zagrijavanje stroja.

Protjecanje struje kroz statorski namot generatora stvara I^2R gubitke koji se manifestiraju u obliku zagrijavanja statorskog namota. Isto razmatranje vrijedi za protjecanje struje kroz uzbudni namot: stvaraju se gubici i^2R koji se manifestiraju u obliku zagrijavanja rotorskog namota. Treći ograničavajući faktor sinkronog generatora, koji se odnosi na podršku održavanju napona elektroenergetskog sustava, vezan je uz rad u poduzbuđenom stanju, prilikom kojeg dolazi do zagrijavanja krajeva statorskog namota uslijed vrtložnih struja u armaturi statora.

U slučaju potencijalne ugroze naponske stabilnosti EES-a, operaterima sustava na raspolaganju je mogućnost povećanja proizvodnje jalove snage koju generator isporučuje u mrežu. Međutim, prema pogonskoj karti generatora (Slika 12), povećanje proizvodnje jalove komponente snage implicira smanjenje proizvodnje radne komponente snage koju generator isporučuje u mrežu.

Opisani pogonski slučaj u konačnici najčešće rezultira tzv. redispečingom proizvodnje sinkronih generatora u području koje je ugroženo u smislu stabilnosti napona.

Pogon sinkronih generatora uz veći faktor snage (sa $\cos \varphi$ bliže jedinici) znači veću isporuku radne komponente snage u EES, ali istodobno znači i manju rezervu jalove snage sinkronih generatora pomoću koje operater sustava može poduzeti korektivne radnje u slučaju problema sa naponom. Sa aspekta održavanja EES-a stabilnim u smislu naponskih prilika, preporučljivo je održavati odgovarajuću rezervu jalove snage u blizini centara značajnije potrošnje.

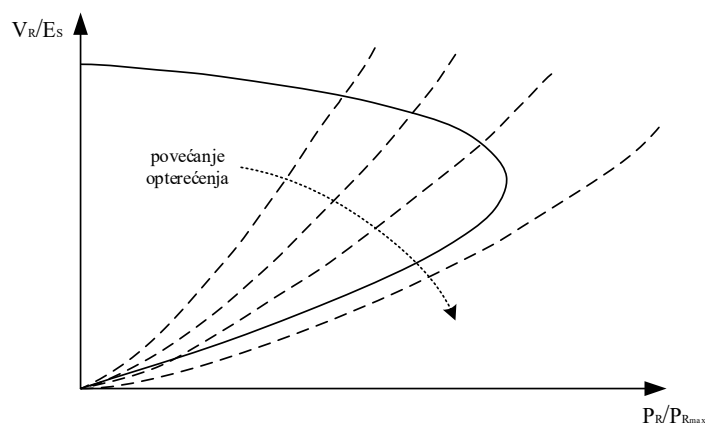
3.3. Utjecaj električnog opterećenja na naponsku stabilnost

Električno opterećenje najznačajniji je faktor koji utječe na naponsku nestabilnost EES-a. Dinamički odziv opterećenja nakon kvarova i poremećaja u sustavu ima najveći utjecaj na mogući nastanak naponskog sloma.

Modeliranje opterećenja složen je problem, jer opterećenje EES-a predstavlja skup ili agregaciju (engl. *aggregation*) mnogo različitih uređaja. Srž problema modeliranja opterećenja je identifikacija sastava opterećenja u određenom trenutku i modeliranje skupa potrošača koji su u tom trenutku priključeni na sustav.

3.3.1. Ovisnost opterećenja o naponu

Kako je već navedeno u poglavlju 3.1, karakteristike opterećenja su izrazi koji prikazuju ovisnost radne i jalove komponente električnog opterećenja o naponu V i neovisnoj varijabli z koja predstavlja zahtjev za opterećenjem. Opći oblik karakteristike eksponencijalnog opterećenja prikazan je u obliku jednadžbi (10) i (11) iz poglavlja 3.1, gdje izrazi zP_0 i zQ_0 predstavljaju radnu i jalovu snagu komponentu snage koju priključeno opterećenje troši pri nazivnom naponu V_0 , za razliku od stvarno potrošene snage P i Q pri naponu V koji je u tom trenutku aktualan u elektroenergetskoj mreži. Grafički prikaz karakteristika eksponencijalnog opterećenja u odnosu na $P - V$ krivulju prikazan je na Slici 13.



Slika 13: Karakteristike eksponencijalnog opterećenja u odnosu na $P - V$ krivulju

Tri slučaja eksponenata opterećenja zanimljiva su za daljnja razmatranja ovisnosti opterećenja o naponu:

- $\alpha = \beta = 2$: opterećenje konstantne impedancije (često označeno kao Z)
- $\alpha = \beta = 1$: opterećenje konstantne struje (često označeno kao I)
- $\alpha = \beta = 0$: opterećenje konstantne snage (često označeno kao P)

Necjelobrojni eksponenti određenih komponenti opterećenja [35] [36] [37] prikazani su u Tablici 2.

Tablica 2: Prikaz eksponenata određenih komponenti opterećenja

komponenta opterećenja	α	β
žarulja sa žarnom niti	1,54	-
klima uređaj	0,50	2,5
ventilator peći	0,08	1,6
punjač baterija	2,59	4,06
elektronička fluorescentna svjetiljka	0,95 – 1,03	0,31 – 0,46
obična fluorescentna svjetiljka	2,07	3,21

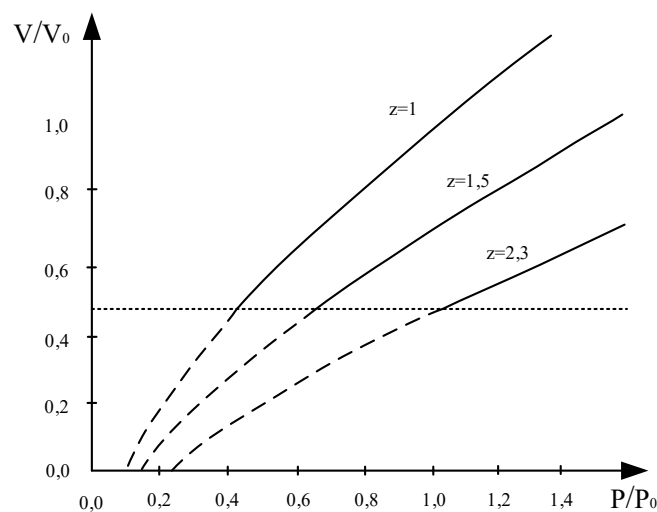
Upotreba eksponencijalnog modela opterećenja nije preporučljiva na niskim razinama napona. Razlog tome je činjenica što pad napona ispod određene vrijednosti nazivnog napona (npr. $V < 0,6 V_n$) u pravilu rezultira isključenjem određenog broja potrošača od strane zaštitnih uređaja ili dovodi do znatno drugačijeg ponašanja potrošača u odnosu na karakteristike deklarirane od strane proizvođača.

Različite komponente opterećenja imaju različite naponske karakteristike što se vidi u Tablici 2. Ukupno opterećenje moguće je prikazati zbrajanjem komponenti opterećenja koje imaju isti ili sličan eksponent. Često korišten model opterećenja je tzv. *ZIP* model koji se sastoji od tri komponente: konstantne impedancije Z , konstantne struje I i konstantne snage P . Radna i jalova komponenta *ZIP* modela opterećenja matematički se može prikazati sljedećim polinomnim izrazima:

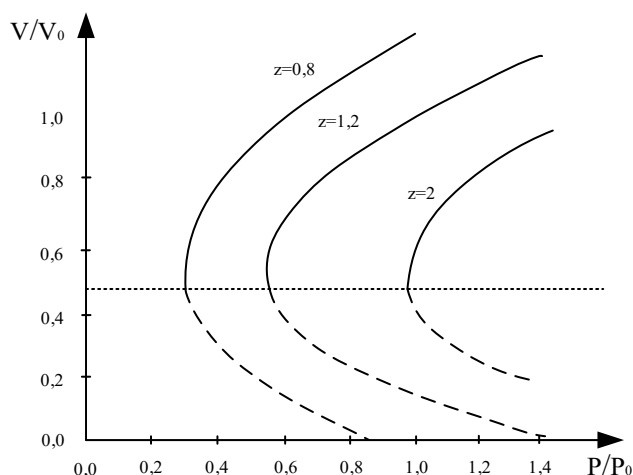
$$P = z \cdot P_0 \left[a_P \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_P \frac{V}{V_0} + c_P \right] \quad (12)$$

$$Q = z \cdot Q_0 \left[a_Q \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 + b_Q \frac{V}{V_0} + c_Q \right] \quad (13)$$

gdje vrijedi da je $a_P + b_P + c_P = a_Q + b_Q + c_Q = 1$, i gdje ovi koeficijenti predstavljaju proporcionalni udio pojedine komponente opterećenja. Izrazi $z \cdot P_0$ i $z \cdot Q_0$, kako je ranije navedeno, predstavljaju radnu i jalovu komponentu snage opterećenja koja se troši pri nazivnom naponu mreže V_0 .



Slika 14: Tipične polinomne karakteristike radnog opterećenja za različite razine opterećenja s pozitivnim koeficijentom b



Slika 15: Tipične polinomne karakteristike radnog opterećenja za različite razine opterećenja s negativnim koeficijentom b

Kada se parametri polinomnog opterećenja dobiju iz izmjerenih podataka, neki od njih mogu poprimiti negativne vrijednosti. Tipične polinomne karakteristike radnog opterećenja za različite razine opterećenja s pozitivnim koeficijentom b [18] prikazane su na Slici 14.

Tipične polinomne karakteristike radnog opterećenja za različite razine opterećenja s negativnim koeficijentom b [18] prikazane su na Slici 15. Kako bi se naglasilo da je ZIP model nerealan za razmatranja ispod određene vrijednosti napona, donji dio karakteristika na Slici 14, i na Slici 15, prikazan je isprekidanim linijama.

3.3.2. Dinamika obnavljanja opterećenja

Snaga koju troši opterećenje (skup potrošača) priključeno na EES ovisi o njegovim naponskim karakteristikama. Ukoliko je ova ovisnost kontinuirana, radi se o statičkom opterećenju. Kad se radi o opterećenju čije se naponske karakteristike mijenjaju s vremenom, ono se naziva dinamičkim opterećenjem. Dinamika različitih komponenti opterećenja i njihovih kontrolnih mehanizama nastoji nakon kvarova i poremećaja u EES-u obnoviti snagu opterećenja. Ovaj se proces naziva obnavljanjem opterećenja.

Snaga koju troši opterećenje u bilo kojem trenutku ovisi o trenutnoj vrijednosti varijable stanja opterećenja koja se označava oznakom x :

$$P = P_t(z, V, x) \quad (14)$$

$$Q = Q_t(z, V, x) \quad (15)$$

gdje su P_t , Q_t kontinuirane funkcije potražnje, napona i stanja opterećenja, i nazivaju se prijelaznim karakteristikama opterećenja. Prijelaz prema karakteristikama opterećenja u stabilnom stanju pokreće dinamika opterećenja $\dot{x} = f(z, V, x)$. Tipične komponente dinamičkog opterećenja s pripadajućim varijablama stanja i potražnje [18] prikazane su u Tablici 3.

Obično je prijelazna karakteristika opterećenja osjetljivija na napon od karakteristike opterećenja u stacionarnom stanju, tako da se u stacionarnom stanju snaga opterećenja obnavlja vraćanjem bliže vrijednosti prije poremećaja. Opsežna bibliografija o modelima opterećenja koja uključuje i statičke i dinamičke komponente i modele opterećenja može se pronaći u [38].

Tablica 3: Dinamičko stanje opterećenja i varijable potražnje

komponenta opterećenja	varijabla stanja x	varijabla potražnje z
asinkroni motor	klizanje rotora s	mehanički moment
opterećenje transformatora s regulacijskom sklopkom koja radi pod opterećenjem	položaj regulacijske sklopke	zahtjev za opterećenjem
termostatsko opterećenje	priključena oprema	potreba za energijom

Radi jednostavnosti, u daljnjem će se razmatranju umjesto izraza *transformatori s regulacijskom sklopkom koja radi pod opterećenjem* koristiti izraz *regulacijski transformatori*.

3.3.3. Asinkroni motori

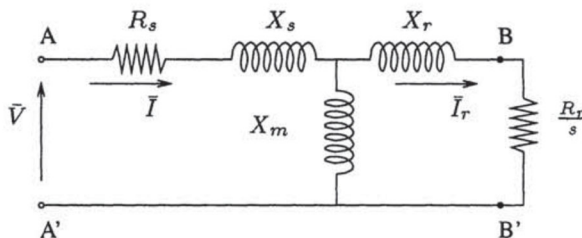
Opterećenje asinkronog motora najvažnija je komponenta za procjenu stabilnosti napona elektroenergetskog sustava. Asinkroni motori čine između 60 i 70 % ukupnog opterećenja elektroenergetskog sustava [1]. Asinkroni motor karakterizira brzo vraćanje opterećenja u vremenskom okviru od jedne sekunde nakon kvarova i poremećaja. Ima niski faktor snage opterećenja pa za oporavak nakon kvarova i poremećaja treba znatnu količinu jalove snage.

Osim navedenog, sklon je zastoju u slučaju pada napona ispod određene vrijednosti nakon nastanka kvarova i poremećaja, ili u slučaju povećanog mehaničkog opterećenja.

Postoje različite vrste asinkronih motora. U modelima koji se rade za proračune stabilnosti elektroenergetskog sustava obično se pretpostavljaju agregirani modeli motora [39] [40] [41]. To znači da se koristi jedan model motora koji predstavlja veliki broj sličnih motora koji se putem distributivne elektroenergetske mreže napajaju iz jedne trafostanice koja povezuje prijenosnu i distributivnu mrežu. Ukoliko postoji velika razlika u karakteristikama priključenih motora, za proračun se uzimaju dva ili više modela asinkronih motora kako bi se opterećenje modeliralo što je moguće preciznije.

Prilikom modeliranja motora, po pitanju faznosti razlikuju se trofazni i jednofazni motori, a po pitanju izvedbe motori s konstantnim otporom rotora i motori s dvostrukim kavezom ili rotorom s dubokim šipkama.

Kod razmatranja asinkronih motora, najčešće se radi jednostavnosti zanemaruju prijelazne pojave (električni tranzijenti). Pod pretpostavkom da su električni prijelazni procesi rotora nestali, trofazni asinkroni motor s konstantnim otporom rotora u stacionarnom stanju može se prikazati ekvivalentnim krugom [18] na Slici 16.



Slika 16: Ekvivalentni krug trofaznog asinkronog motora u stacionarnom stanju

Sve impedancije preračunate su na stranu statora, a prikazani elementi redom su:

- R_s – rezistencija statora,
- X_s – reaktancija statora,
- X_m – reaktancija magnetiziranja,
- R_r – rezistencija rotora,
- X_r – reaktancija rotora.

Klizanje motora s definira se izrazom

$$s = \frac{\omega_0 - \dot{\theta}_r}{\omega_0} \quad (16)$$

gdje je

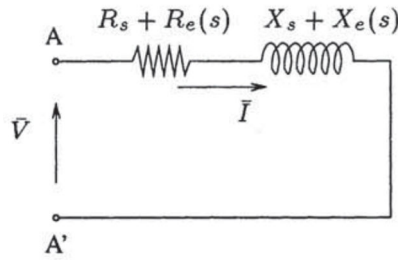
- ω_0 – nazivna kutna frekvencija,
- $\dot{\theta}_r$ – brzina rotora u električnim radijanima u sekundi.

Krug na Slika 16 naziva se stacionarni ekvivalentni krug što podrazumijeva da su sve električne prijelazne pojave dostigle stacionarno stanje. Asinkroni motor ne mora biti u mehanički stabilnom stanju, pa stoga klizanje motora može varirati. Tipični parametri ekvivalentnog kruga preuzeti iz literature [1] [36] [42] [43] grupirani su u Tablici 4 za različite tipove asinkronih motora. Sve vrijednosti su izražene u jediničnim vrijednostima prema nazivnim podacima motora.

Tablica 4: Tipični parametri ekvivalentnog kruga asinkronih motora [18]

vrsta asinkronog motora	R_s	X_s	X_m	R_r	X_r
mali industrijski motor [42]	0,031	0,1	3,2	0,018	0,18
veliki industrijski motor [42]	0,013	0,067	3,8	0,009	0,17
prosječna vrijednost parametara za 11 kV motor [43]	0,016	0,063	0,96	0,009	0,016
mali industrijski motor [1]	0,078	0,065	2,67	0,044	0,049
za komercijalnu upotrebu [1]	0,001	0,23	3,0	0,02	0,23
za upotrebu u električnim uređajima u kućanstvima [42]	0,077	0,107	2,22	0,079	0,098
jednofazni motor [36]	0,11	0,12	2,0	0,11	0,13

Slika 17 prikazuje ekvivalentnu impedanciju trofaznog asinkronog motora sa Slike 16 gledano sa stezaljki statora AA' [18], što predstavlja mjesto priključenja asinkronog motora na EES.



Slika 17: Ekvivalentna impedancija trofaznog asinkronog motora sa Slike 16 gledano sa stezaljki statora AA'

Struja statora motora je

$$\bar{I} = \frac{\bar{V}}{(R_s + R_e) + j(X_s + X_e)} \quad (17)$$

Parametri R_e i X_e ovise o klizanju s i mogu se prikazati kao

$$R_e + jX_e = \frac{jX_m \left(\frac{R_r}{s} + jX_r \right)}{\frac{R_r}{s} + j(X_m + X_r)} \quad (18)$$

Električni okretni moment koji razvija motor u funkciji napona na stezaljkama i klizanja iznosi

$$T_e(V, s) = \frac{V^2 X_m^2 \frac{R_r}{s}}{\left[\left(R_1 + \frac{R_r}{s} \right)^2 + (X_1 + X_r)^2 \right] [R_s^2 + (X_s + X_m)^2]} \quad (19)$$

Radna i jalova snaga koju apsorbira asinkroni stroj u stacionarnom stanju, u funkciji napona na stezaljkama i klizanja, prikazane su izrazima

$$P(V, s) = \frac{(R_s + R_e)V^2}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} \quad (20)$$

$$Q(V, s) = \frac{(X_s + X_e)V^2}{(R_s + R_e)^2 + (X_s + X_e)^2} \quad (21)$$

Iz gornjih se izraza vidi znatna ovisnost svih bitnih parametara (električnog okretnog momenta, radne i jalove komponente snage opterećenja) asinkronog motora o naponu mreže, te o klizanju.

Karakteristika električnog okretnog momenta asinkronog motora u ovisnosti o klizanju prikazana je na Slici 18. Okretni moment pozitivan je za motorski režim rada asinkronog stroja.

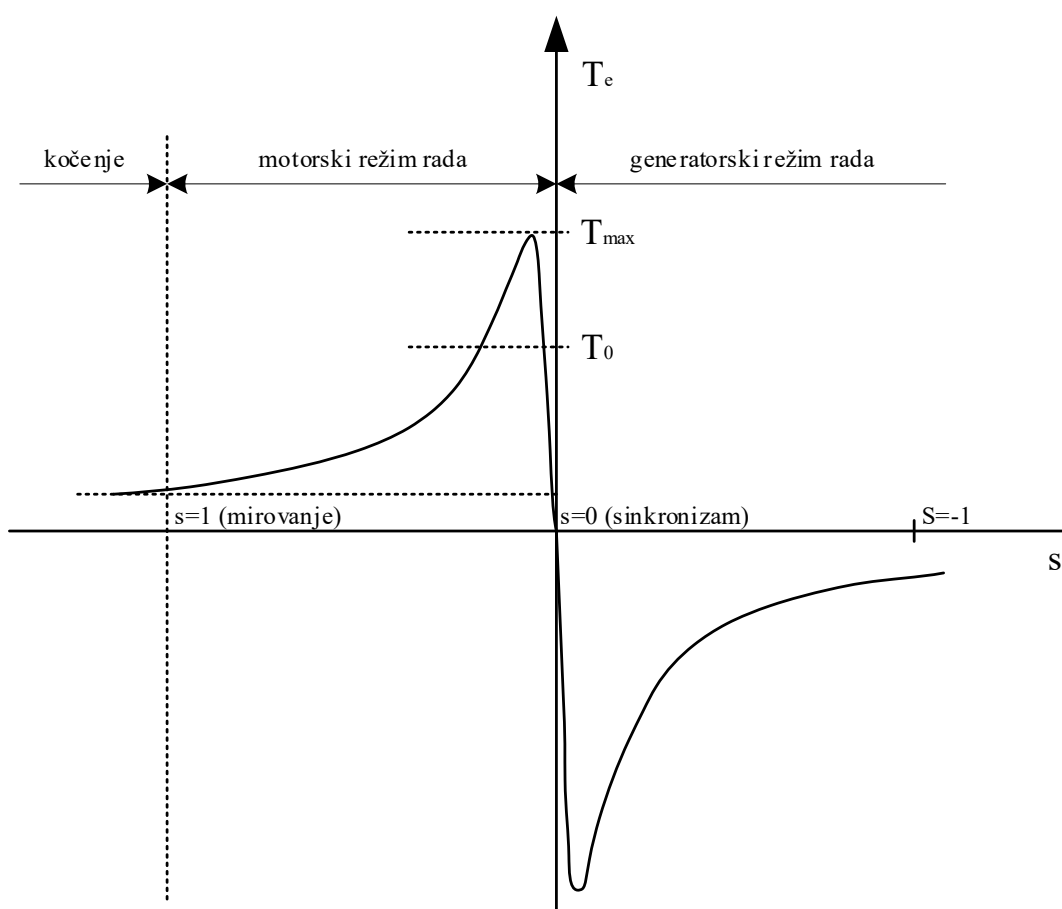
U generatorskom režimu rada asinkronog stroja, klizanje je negativnog predznaka jer je brzina asinkronog stroja veća od sinkrone brzine, što stvara negativan elektromagnetski moment. Treći

režim rada asinkronog stroja je režim kočenja, u kojem je smjer rotacije suprotan smjeru rotacijskog polja ($s > 1$) pa motor apsorbira i električnu i mehaničku snagu.

Gibanje rotora u funkciji klizanja može se prikazati diferencijalnom jednačbom oblika

$$2H\dot{s} = T_m(s) - T_e(V, s) \quad (22)$$

gdje je H konstanta tromosti (s), a T_m mehanički zakretni moment u jediničnim vrijednostima (uključujući efekt mehaničkih gubitaka), koji općenito ovisi o brzini rotacije i vrijednosti klizanja. Povećanje opterećenja rezultira povećanjem klizanja.



Slika 18: Karakteristika električnog momenta asinkronog motora u ovisnosti o klizanju

Klizanje se nakon poremećaja ne može trenutno promijeniti zbog mehaničke inercije asinkronog motora. S fiksnom vrijednosti klizanja s prije poremećaja, prema ekvivalentnom krugu asinkronog motora u stacionarnom stanju na Slici 16, vidi se da se motor ponaša samo kao impedancija, pa je prijelazna karakteristika opterećenja motora konstantnog tipa

impedancije. Prema izrazima (19), (20) i (21) vidljivo je kako električnom momentu, kao i radnoj i jalovoj snazi, vrijednost pada kao posljedica pada napona u mreži. Smanjenje zakretnog momenta na kraju će uzrokovati usporavanje rotora prema izrazu (22), čime se povećava potrošnja radne snage dok se ne postigne nova radna točka.

Uvjet ravnoteže momenta je izjednačavanje elektromagnetskog i mehaničkog momenta:

$$T_e(V, s) = T_m(s) \quad (23)$$

Prilikom pokretanja, motor se nalazi u stanju mirovanja ($s = 1$). Ako je elektromagnetski moment $T_e(V, 1)$ veći od mehaničkog momenta $T_m(1)$ (za $s = 1$) motor će početi ubrzavati. Iz ekvivalentnog kruga na Slika 16 vidi se da je impedancija motora za $s = 1$ znatno manja nego pri normalnom radu kada je klizanje s vrlo malog iznosa što znači da je startna (potezna) struja motora nekoliko puta veća od nazivne vrijednosti.

Ako je elektromagnetski moment $T_e(V, 1)$ manji od mehaničkog momenta $T_m(1)$ (za $s = 1$) motor će ostati u stanju mirovanja.

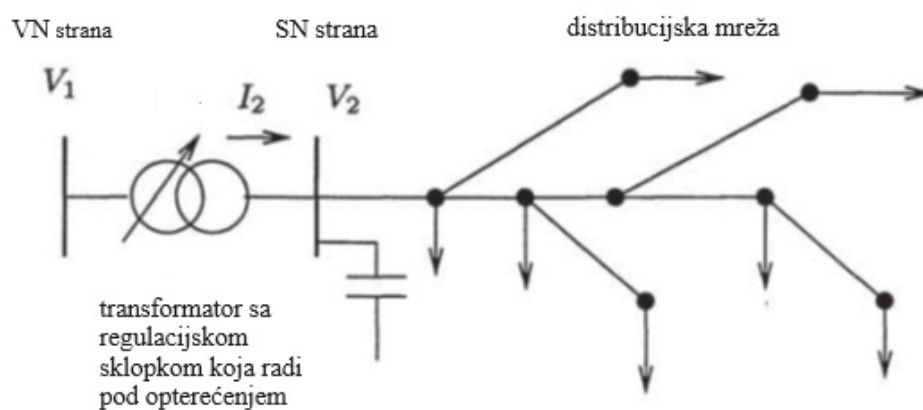
Uslijed propada napona smanjuje se električni moment asinkronog motora. Kad ovaj moment postane manji od mehaničkog momenta, motor se počinje zaustavljati. Pri tome i dalje nastoji iz mreže uzeti istu snagu, što znači da uz smanjeni napon troši struju koja može biti nekoliko puta veća od nazivne struje. Da bi se izbjegle teške posljedice zastoja motora, na većim industrijskim motorima uobičajeno se ugrađuje podnaponska zaštita koja isključuje motor kad napon mreže padne ispod određene vrijednosti [36]. Manji motori uglavnom nemaju podnaponsku zaštitu, nego samo termičku zaštitu od preopterećenja.

Značajan udio opterećenja u stambenim jedinicama sastoji se od jednofaznih motora male snage. Ova komponenta opterećenja obično se razmatra modeliranjem jednofaznog motora odgovarajuće nazivne snage spojenog na svaku fazu, kako bi se održao uravnotežen rad.

3.3.4. Regulacijski transformatori

Druga tipična komponenta (kako je navedeno u poglavlju 3.3.2) u ponovnom uspostavljanju opterećenja je regulacija napona koju u prijenosnoj mreži u pravilu izvode regulacijske sklopke transformatora prema nalogima automatskih regulatora napona. Slika 19 prikazuje tipičnu

jednopolnu shemu regulacije napona. Regulacijska sklopka održava napon srednjenaponske (SN) strane transformatora V_2 na željenoj vrijednosti mijenjanjem prijenosnog omjera transformatora $r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{w_1}{w_2}$, gdje su V_1 i V_2 naponi primara i sekundara, a w_1 i w_2 brojevi zavoja primarnog i sekundarnog namota. U većini je slučajeva regulacijski namot na visokonaponskoj/primarnoj (VN) strani. Jedan od razloga je taj što je struja na ovoj strani manjeg iznosa, a drugi razlog je to što primarni namot ima veći broj zavoja što omogućava precizniju regulaciju.



Slika 19: Tipična jednopolna shema regulacije napona

Odstupanje napona na sekundaru transformatora moguće je kompenzirati mjerenjem struje sekundara, tako da se regulirani napon povećava proporcionalno povećanju opterećenja na sekundaru transformatora. Ovaj način rada regulacije napona u literaturi je poznat pod nazivom *line drop compensation* [44].

Regulacijske sklopke su sporo djelujući, diskontinuirani uređaji koji mijenjaju položaj korak po korak, ako napon ostane izvan tzv. mrtve zone dulje od definirane vremenske odgode. Mrtva zona je opseg napona unutar kojeg regulacijske sklopke ne radi i mora biti veća od veličine koraka regulacije. Tipične vrijednosti donje granice mrtve zone su od 0,85-0,90 jediničnog iznosa napona, a za gornju granicu to su vrijednosti 1,10-1,15 jediničnog iznosa napona. Minimalno vrijeme potrebno da regulacijska sklopka završi jedan pomak obično je blizu 5 sekundi. Različite namjerne vremenske odgode (u rasponu od nekoliko sekundi do nekoliko minuta) obično se dodaju mehaničkoj vremenskoj odgodi kako bi se izbjegao čest ili nepotreban rad regulacijske sklopke, što uzrokuje trošenje opreme i povećava cijenu održavanja transformatora. Najčešće se koristi inverzna karakteristika vremenske odgode djelovanja rada

regulacijske sklopke kako bi se postiglo da vremensko kašnjenje bude kraće za veće razlike aktualnog napona u odnosu na podešenu vrijednost.

Vraćanje opterećenja kao posljedica rada regulacijske sklopke je neizravno: kada regulacijska sklopka uspije vratiti napon sekundarne strane transformatora V_2 blizu njegove referentne vrijednosti, snaga opterećenja koja ovisi o tom naponu, također se obnavlja.

U većini EES-ova transformatori koji povezuju različite razine napona prijenosne mreže opremljeni su regulacijskim sklopkama. Uobičajena praksa u koordinaciji dviju razina napona na kojima djeluju regulacijske sklopke je brže djelovanje regulacijskih sklopki transformatora viših naponskih razina, u odnosu na djelovanje regulacijskih sklopki transformatora koji povezuju mreže nižih razina napona [45]. Takva praksa rezultira većom učinkovitosti i manjim brojem operacija regulacijskih sklopki.

3.3.5. Termostatska opterećenja

Treću komponentu ponovnog uspostavljanja opterećenja (kako je navedeno u poglavlju 3.3.2) predstavljaju termostatska opterećenja. Ovisnost opterećenja o naponu može varirati s vremenom pokazujući tendenciju obnavljanja snage. Tipična kategorija samoobnavljajućeg opterećenja, sa značajnim utjecajem na stabilnost napona, su uređaji kontrolirani termostatima koji se koriste za potrebe grijanja (grijanje vode, grijanje prostora, grijanje industrijskih procesa, itd.). Utjecaj termostatskog opterećenja na stabilnost napona obrađen je u publikacijama [46] [47] [48].

Termostatsko opterećenje predstavlja skup više uređaja kojima upravljaju zasebni termostati. Svaki uređaj ima vlastiti ciklus opterećenja koji obično traje nekoliko minuta pa je srednja snaga potrošena tijekom svakog ciklusa jednaka onoj potrebnoj za održavanje potrebne temperature u zadanim vremenskim uvjetima.

Uslijed kvarova i poremećaja u EES-u dolazi do postupnog smanjenja napona napajanja sa nominalne vrijednosti V_0 na V i, posljedično, do smanjenja snage koju troše uređaji koji su u to vrijeme bili uključeni. Kako vrijeme prolazi, pojedinačni uređaji ostaju uključeni dulje, sa tendencijom dostizanja nazivne vrijednosti snage potrošnje. Ukupna snaga koju u prosjeku troše ti uređaji u stabilnom stanju, sa smanjenim naponom, manja je od nazivne snage.

4. MODELIRANJE ELEKTRIČNOG OPTEREĆENJA

Modeliranje električnog opterećenja jedan je od najvažnijih aspekata modeliranja za potrebe analize rada elektroenergetskog sustava [29]. Značajan dio modela električnog opterećenja koji su danas u upotrebi, razvijen je prije više godina, čak i više desetljeća, i nije na odgovarajući način prilagođen novonastalim promjenama strukture i karakteristika električnog opterećenja. Zadnje sustavne prilagodbe modela električnog opterećenja izvršene su sredinom devedesetih godina prošlog stoljeća u pojedinim elektroprivredama (primjer: WECC – *Western Electricity Coordinating Council* [29]), ali ove prilagodbe nisu općenito primjenjive, nego se primarno odnose na područja unutar kojih, i za koja, su razvijane.

Karakteristike električnog opterećenja imaju značajan utjecaj na proračun statičkih i dinamičkih prilika EES-a [49] [50] [51]. Analize rada EES-a ne mogu se smatrati pouzdanima bez preciznog modela električnog opterećenja, jednako kao ni bez preciznog modela generatora, transformatora, dalekovoda, kompenzacijskih uređaja, niti ostalih uređaja koji su važni za simulaciju dinamičkog ponašanja EES-a poput automatskih regulatora napona, regulatora uzbude, turbinskih regulatora i sl. Glavna razlika između električnog opterećenja i ostalih gore spomenutih elemenata EES-a je to što za sve spomenute elemente postoje tvornički podaci koji se dodatno verificiraju mjerenjima prilikom uključenja u pogon.

Električno opterećenje predstavlja skup svih potrošača električne energije koji su u određenom trenutku priključeni na elektroenergetski sustav. Slika 20 prikazuje različite tipove potrošača električne energije čiji skup treba modelirati za potrebe analize rada EES-a.



Slika 20: Skup potrošača električne energije – električno opterećenje sustava

Modeliranje opterećenja oduvijek predstavlja jedan od najvećih izvora netočnosti simulacijskih studija za planiranje i rad EES-a [52]. Neodgovarajući modeli opterećenja mogu dovesti do netočnosti i nedosljednosti rezultata ili smanjene pouzdanosti procjena u studijama koje se izrađuju prilikom analiza rada EES-a.

Modeliranje električnog opterećenja složen je zadatak jer postoji znatan broj faktora koje je potrebno uzeti u razmatranje [28] kao što su:

1. Prostorna i vremenska raznolikost vrsta opterećenja priključenih na EES u određenom trenutku

Opterećenja variraju s vremena na vrijeme i stohastičke su prirode [53]. Za isto opterećenje u različitim se razdobljima mogu snimiti značajno različiti izmjereni podaci. Ovo se odnosi na različita doba dana, različita godišnja doba, i različite lokacije unutar EES-a, ovisno o vrstama opterećenja.

2. Visoki udio nelinearnog i nestalnog (diskontinuiranog) ponašanja opterećenja

Varijabilno ponašanje znatnog dijela opterećenja priključenog na EES, poput uključivanja i isključivanja klima uređaja u stambenim jedinicama i poslovnim prostorima ovisno o zadanim parametrima rada, samoisključivanje uređaja koji sadrže energetske elektroniku, ponašanje opterećenja industrijskih potrošača poput elektrolučnih peći, motora u pogonima pilana ili postrojenjima za obradu kamena, i sl.

3. Nedostatak točnih informacija o strukturi i sastavu opterećenja na kontinuiranoj osnovi

Analiza rada EES-a provodi se na razini cjelokupnog sustava. Vođenje EES-a provodi se na visokonaponskoj razini (u Republici Hrvatskoj ovaj pojam obuhvaća naponske razine 400 kV, 220 kV i 110 kV), a većina opterećenja priključena je na niskonaponsku (u Republici Hrvatskoj ovaj pojam obuhvaća naponsku razinu 0,4 kV) i srednjenaponsku razinu (u Republici Hrvatskoj ovaj pojam obuhvaća naponske razine 35 kV, 30 kV, 20 kV i 10 kV koje koristi operator distribucijskog sustava, te naponske razine 6 kV i 3 kV koje koriste industrijski potrošači). Dio potrošača priključen je direktno na visokonaponsku razinu (postrojenja željeznice za potrebe elektrovuče, veći industrijski potrošači poput željezara, cementara, tvornica, itd.). Za modeliranje opterećenja s visokonaponske razine potrebno je opterećenja združiti u što većoj mjeri. Opterećenja se modeliraju na sekundarnoj strani transformatora u trafostanicama koje povezuju prijenosnu i distribucijsku mrežu.

4. Nesigurnost povezana s modelima opterećenja

Modeli opterećenja moraju biti potvrđeni stvarnim mjerenjima dinamičkog ponašanja opterećenja nakon kvarova i poremećaja u EES-u ili namjenski provedenih pokusa kratkog spoja.

Među pojedinim komponentama opterećenja neke su relativno nove, što rezultira smanjenjem značajnih ili dostupnih mjernih podataka za dobivanje strukture opterećenja tijekom vremena. Na višim naponskim razinama, EES je upetljan i dostupne informacije o opterećenju su potpuno izmiješane. Zato se relativno često u praksi često koriste samo jednostavni modeli opterećenja poput eksponencijalnog modela. S druge strane, na razini odvoda odziv opterećenja na smetnje sadrži više informacija o njegovom sastavu, što znači da se za niže naponske razine mogu primijeniti detaljniji modeli opterećenja.

4.1. Razvoj modela električnog opterećenja

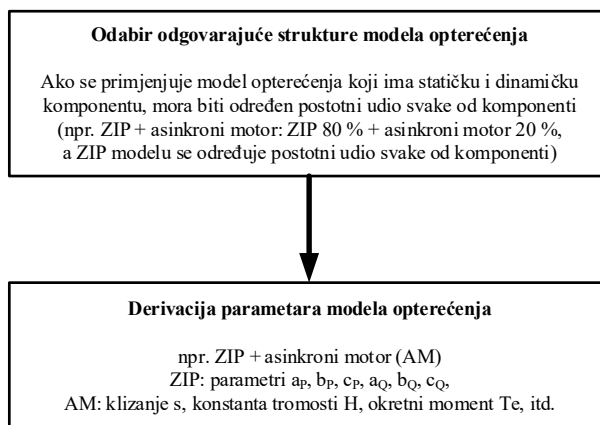
Modeliranje opterećenja počinje prikupljanjem informacija o sastavu opterećenja za različite vrste opterećenja. Ove informacije prikupljaju se za različita doba dana, različite dane u tjednu, različite mjesece u godini, i za različita godišnja doba. Do informacija o sastavu opterećenja moguće je doći na dva načina:

- slanjem upitnika krajnjim korisnicima (elektroprivrede, poduzeća za distribuciju električne energije, industrijski potrošači) i popunjavanjem istih od strane krajnjih korisnika,
- mjerenjem (prikupljanjem izmjerenih podataka).

Nakon prikupljanja informacija o sastavu opterećenja za različite vrste opterećenja, odabire se odgovarajući model opterećenja, koji može uključivati model srednjenaponske ili niskonaponske mreže (npr. napojni odvodi i transformatori). Parametri za odabrani prikaz opterećenja mogu se dobiti iz rezultata istraživanja provedenih kod krajnjih korisnika [54], iz postojeće literature, ili korištenjem izmjerenih fizikalnih veličina što predstavlja prikupljanje podataka koji su snimljeni uređajima za snimanje poremećaja u elektroenergetskom sustavu. Proces razvoja modela opterećenja, prikazan je na Slici 21, sastoji se od dva koraka:

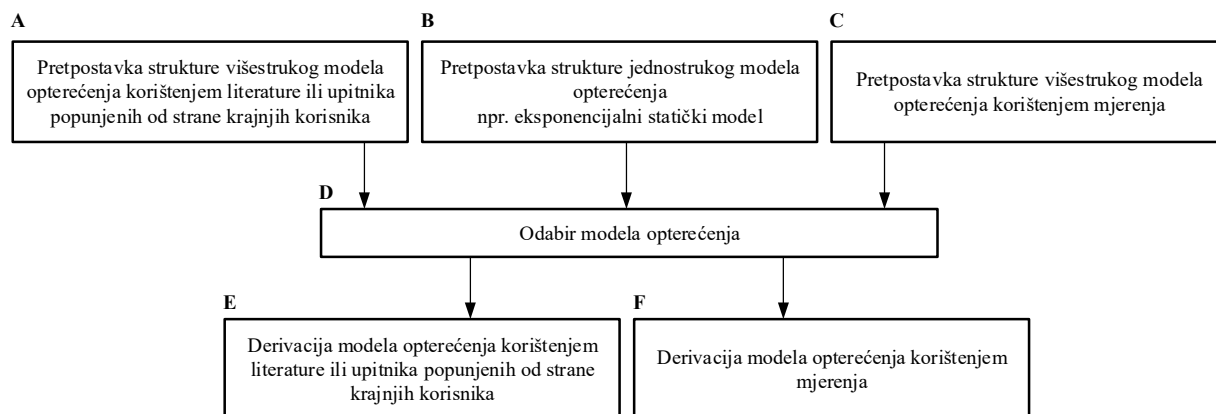
1. odabira modela (strukture) opterećenja,
2. derivacije parametara modela opterećenja.

Kako se vidi na slici, u slučaju odabira kombinacije statičkog i dinamičkog opterećenja (što fizikalno predstavlja model najbliži stvarnom stanju), potrebno je definirati postotak udjela svake od navedenih komponenti opterećenja.



Slika 21: Proces razvoja modela opterećenja

Pristup modeliranju opterećenja klasificira se u 6 različitih pristupa kao što je prikazano na Slici 22.



Slika 22: Klasifikacija pristupa modeliranju opterećenja

1) $C \rightarrow D \rightarrow F$:

Ovaj pristup primjenjuje se na model opterećenja koji se sastoji od više komponenti opterećenja, npr. kombinacija modela asinkronog motora i ZIP modela opterećenja. Nakon procjene strukture modela opterećenja, parametri modela opterećenja izvode se iz izmjerenih podataka.

2) $C \rightarrow D \rightarrow E$:

Ovaj pristup se primjenjuje na model opterećenja koji se sastoji od višestrukih komponenti opterećenja. Nakon procjene strukture modela opterećenja, parametri modela opterećenja izvode se na osnovu rezultata istraživanja provedenih kod krajnjih korisnika ili iz literature.

3) $A \rightarrow D \rightarrow F$:

Ovaj pristup se primjenjuje na model opterećenja koji se sastoji od višestrukih komponenti opterećenja. Nakon što je struktura modela opterećenja procijenjena iz rezultata istraživanja provedenih kod krajnjih korisnika ili iz literature, parametri modela opterećenja se izvode iz izmjerenih podataka.

4) $A \rightarrow D \rightarrow E$:

Ovaj pristup se primjenjuje na model opterećenja koji se sastoji od višestrukih komponenti opterećenja. Nakon što je struktura modela opterećenja procijenjena iz rezultata istraživanja provedenih kod krajnjih korisnika ili iz literature, parametri modela opterećenja se izvode na temelju iskustvenih podataka.

5) $B \rightarrow D \rightarrow F$:

Ovaj pristup se primjenjuje na modele opterećenja koji se sastoje od pojedinačnog opterećenja, npr. eksponencijalnog modela opterećenja, modela opterećenja sa konstantnom snagom, modela opterećenja sa konstantnom strujom, ili modela opterećenja sa konstantnom impedancijom. Strukturu modela opterećenja nije neophodno potrebno identificirati. Parametri modela opterećenja se izvode iz izmjerenih podataka.

6) $B \rightarrow D \rightarrow E$:

Ovaj pristup se primjenjuje na modele opterećenja koji se sastoje od pojedinačnog opterećenja, npr. eksponencijalnog modela opterećenja. Strukturu modela opterećenja nije neophodno potrebno identificirati. Parametri modela opterećenja su izvedeni iz rezultata ispitivanja provedenih kod krajnjih korisnika ili iz literature.

Rezultati međunarodnog istraživanja modeliranja opterećenja [54] koji se odnose na metodologije razvoja modeliranja opterećenja pokazuju sljedeće informacije o trenutnim praksama elektroprivreda i operatora sustava: oko 50% elektroprivreda koristi mjerne podatke, dok ih oko 40% koristi rezultate ispitivanja provedene kod krajnjih korisnika ili literaturu. Uz

to, više od polovice ispitanika koristi model opterećenja koji se sastoji od jednostrukog opterećenja.

Prikupljanje odgovarajućih informacija i podataka za modeliranje opterećenja izazovan je zadatak, jer čak i ispad značajne proizvodne jedinice iz pogona može dovesti samo do male promjene iznosa napona i iznosa frekvencije u velikim elektroenergetskim sustavima. Veliki kvarovi relativno su rijetka pojava a pokuse kratkog spoja nije jednostavno organizirati i izvesti u realnim uvjetima u mreži.

S obzirom na gore navedene okolnosti, mnoge elektroprivrede koriste jednostavne modele statičkog opterećenja koji se sastoje od naponski ovisnih statičkih polinomnih ili eksponencijalnih prikaza opterećenja: prvi je kombinacija konstantne impedancije Z , konstantne struje I i konstantne snage opterećenja P (poznatiji kao *ZIP* model opterećenja), a potonji izražava ovisnost snage o naponu u obliku eksponencijalne funkcije s odgovarajućim eksponentom.

Ovi se modeli mogu koristiti za statički odziv, i za statičke prilike pokazuju dobre rezultate. Međutim, ovakvi modeli nisu prikladni za dinamički odziv, osobito s obzirom na značajan udio opterećenja asinkronih motora (poput npr. klima uređaja u stambenim jedinicama što je očekivano s obzirom na klimatske promjene i na cjenovnu dostupnost ovih uređaja svim slojevima društva). Odnedavno neka elektroprivredna poduzeća, uglavnom u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD), koriste detaljnije modele opterećenja koji obuhvaćaju i statički i dinamički odziv. Bilježenje dinamičkog odziva opterećenja kritično je za analizu stabilnosti, posebno zbog simulacija fenomena sporog oporavka napona npr. nakon zaustavljanja klima uređaja u stambenim jedinicama nakon poremećaja/kvarova u sustavu [55] [56].

Problem osmišljavanja modela složenog opterećenja sustava, koji prikazuje opterećenje u fizikalnom obliku koji je najbliži stvarnom stanju, može se raščlaniti na sljedeće dijelove:

- pretpostavka strukture modela opterećenja koja predstavlja statičko i dinamičko ponašanje opterećenja,
- određivanje postotka statičke i dinamičke komponente opterećenja.

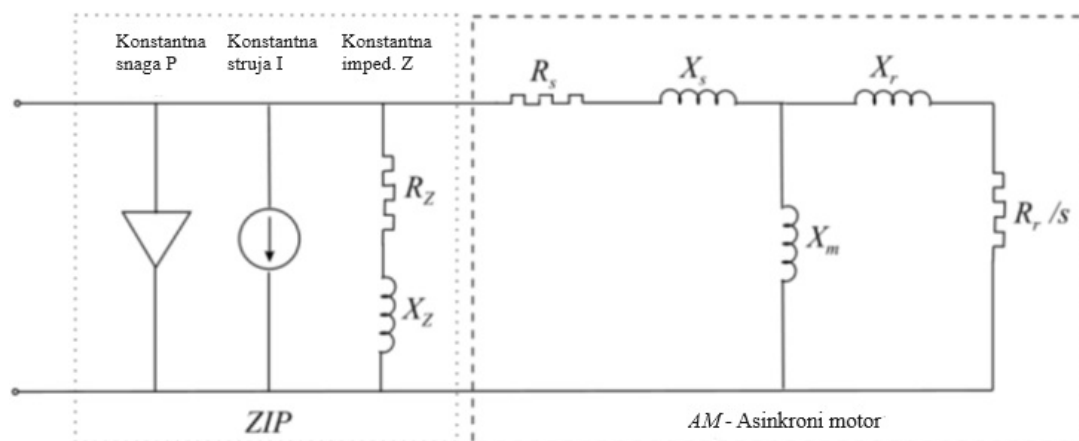
Ova dva problema odnose se ne samo na kombinaciju statičkog i dinamičkog modela opterećenja, nego i na sve ostale modele opterećenja koji se sastoje od više komponenti opterećenja kao što je *ZIP* model.

Model električnog opterećenja koji je najbliži stvarnim fizikalnom uvjetima prikazan je na Slici 23. Model se sastoji od statičke i dinamičke komponente. Statička komponenta opterećenja prikazana je ZIP modelom opterećenja, dok je dinamička komponenta opterećenja prikazana modelom asinkronog motora u stacionarnom stanju. Obje komponente električnog opterećenja prethodno su opisane u poglavlju 3.

Kako bi se dobili podaci o karakteristikama opterećenja, u svrhu identificiranja modela opterećenja, razvijena su dva pristupa koja se danas pretežno koriste [1]:

- pristup temeljen na komponentama (ili pristup temeljen na znanju),
- pristup temeljen na mjerenju (ili pristup temeljen na ponašanju).

Općenito, pristup temeljen na komponentama može se primijeniti na model opterećenja koji se sastoji od više komponenti opterećenja. S druge strane, pristup temeljen na mjerenju može se primijeniti na modele opterećenja koji se sastoji od više komponenti opterećenja, i na modele opterećenja koji se sastoje samo od jedne komponente opterećenja.



Slika 23: Model električnog opterećenja najbliži stvarnim fizikalnom uvjetima [29]

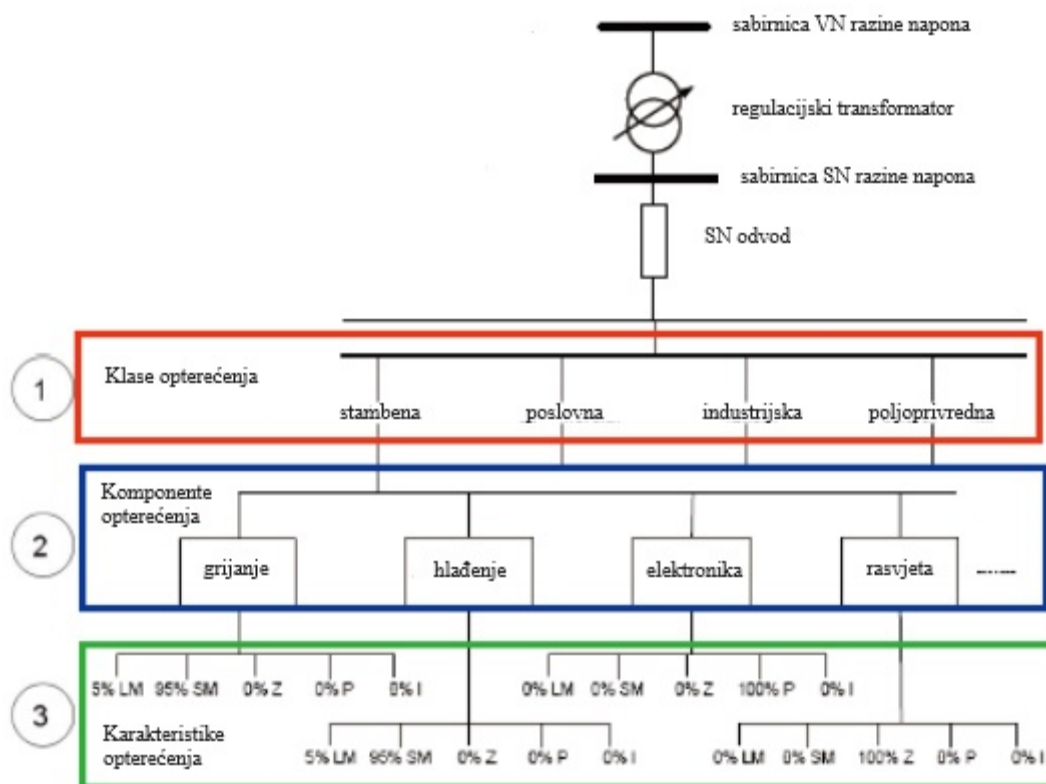
4.2. Modeliranje električnog opterećenja bazirano na komponentama

Pristup baziran na komponentama naziva se još i metodologijom modeliranja „baziranoj na znanju“. U smislu pristupa modeliranju koristi se naziv "odozdo prema gore (engl. *bottom-up*)".

Kod ovog tipa modeliranja agregirani model opterećenja proizlazi iz:

- 1) poznavanja klasa opterećenja priključenih na trafostanice,
- 2) poznavanja sastava komponenti opterećenja u svakoj klasi opterećenja,
- 3) poznavanja tipičnih karakteristika svake komponente opterećenja.

Agregirani model uključuje pojedinačne komponente opterećenja i obično se prikazuje kao kombinacija polinomnog modela drugog reda i modela asinkronog motora što najrealnije preslikava stvarne fizikalne uvjete. Pristup modeliranju opterećenja temeljen na komponentama pruža zajedničku strukturu modela opterećenja (Slika 24) i pridruženi skup parametara vrijednosti koje se koriste u cijelom modelu sustava.



Slika 24: Modeliranje električnog opterećenja temeljeno na komponentama

Modeliranje električnog opterećenja temeljeno na komponentama podrazumijeva model trafostanice, prikazan na Slici 24, koji povezuje VN i SN elektroenergetsku mrežu, a sadrži ove komponente:

- VN i SN sabirnice,

- transformator sa regulacijskom sklopkom koja radi pod opterećenjem, čiji su VN i SN izvodi priključeni na VN, odnosno SN sabirnice,
- SN odvod,
- opterećenje.

Opterećenje koje je priključeno na ovu trafostanicu može se kategorizirati u klase opterećenja na temelju potrošnje (označeno crvenim pravokutnikom br. 1 na Slici 24). Tipično korištene klase opterećenja su stambena, poslovna, industrijska i poljoprivredna klasa opterećenja. Opterećenje na sabirnici može se podijeliti na jednu ili više ovih klasa.

Sljedeći korak je određivanje postotka komponenti opterećenja unutar svake klase opterećenja (označeno plavim pravokutnikom br. 2 na Slici 24). Svaka klasa opterećenja ima tipične komponente opterećenja koje se smatraju većinom snage koju troše krajnji korisnici unutar te klase opterećenja. Svaka kategorija pojedine klase opterećenja predstavljena je u smislu komponenti opterećenja poput rasvjete, klimatizacije, grijanja prostora, grijanja vode i hlađenja. Svaka komponenta opterećenja ima određene karakteristike (označeno zelenim pravokutnikom br. 3 na Slici 24), tj. sastoji se od određenog postotka statičke i dinamičke komponente. Najveći je izazov definirati postotak pojedine komponente opterećenja u ukupnom opterećenju što je teško dobiti bez anketiranja krajnjih korisnika električne energije te zahtijeva puno vremena, i u konačnici može biti zahtjevno i u financijskom smislu. Radi rješavanja ovog problema, osmišljen je jednostavniji pristup [57] koji zahtijeva sljedeće informacije:

- tipične sastave (udjele opterećenje koje troši svaka vrsta komponenti opterećenja) svake od nekoliko klasa opterećenja (npr. stambeni, poslovni, industrijski),
- kombinacija klasa opterećenja na svakoj sabirnici.

U svjetskim okvirima je velik dio ovih podataka utvrđen i dokumentiran u EPRI projektima [58]. Postotke komponenti opterećenja unutar različitih klasa opterećenja, za različite geografske regije unutar Western Electricity Coordination Council (WECC), osigurava WECC-ova radna grupa za modeliranje opterećenja (Load Modeling Task Force – LMTF). Podaci su prikupljeni i za ljetnu i za zimsku sezonu. Iako približan, ovo je najpotpuniji izvor informacija dostupan elektroprivrednim poduzećima u WECC-u i javno je dostupan [58] [59] [60].

Prednosti modeliranja električnog opterećenja temeljenog na komponentama su sljedeće:

- nisu potrebna terenska mjerenja, niti uređaji za bilježenje poremećaja u EES-u, pod uvjetom da je udio i karakteristika opterećenja svake komponente opterećenja unaprijed poznat, ili se može dobiti anketiranjem krajnjih korisnika elektroenergetske mreže,
- koristi podatke o klasi opterećenja iz pojedine trafostanice, što je najčešće dostupno,
- prilagodljiv je različitim sustavima i uvjetima.

Nedostaci ovog tipa modeliranja su:

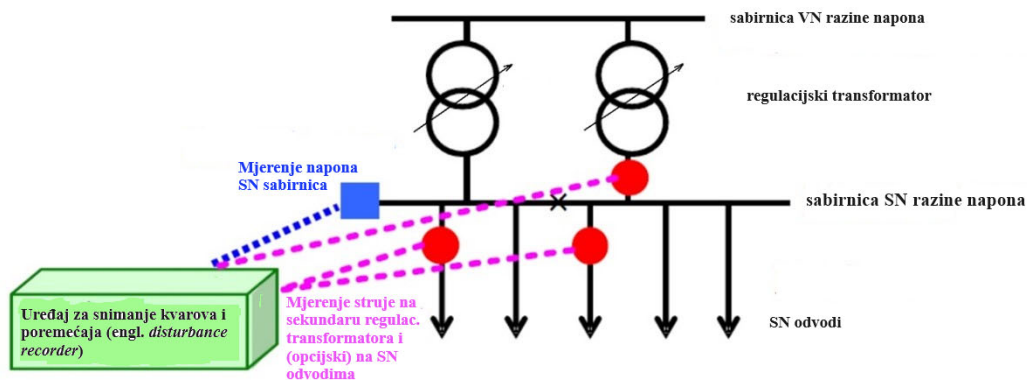
- modeli opterećenja temelje se na pretpostavljenim karakteristikama i sastavima koji se ne mijenjaju kako se mijenjaju krajnji uređaji i ponašanje kupaca tijekom vremena (varijacije karakteristika opterećenja na dnevnoj ili sezonskoj osnovi),
- struktura modela opterećenja priključenog na određenu trafostanicu nije primjenjiva na drugu trafostanicu,
- operator prijenosnog sustava koji je odgovoran za vođenje EES-a u cjelini, nema direktan kontakt sa većinom potrošača koji su priključeni na mrežu srednjeg i niskog napona, pa je time otežan i pristup podacima koji potrebni za modeliranje električnog opterećenja.

Potrošači električne energije (krajnji korisnici) nemaju obvezu dostave podataka operatoru prijenosnog sustava o trošilima koja koriste. Ispunjavanje upitnika također ne predstavlja obvezu, pa je dostava podataka o trošilima tim putem stvar dobre volje krajnjih korisnika. Isto tako, operator prijenosnog sustava nema mogućnost provjere točnosti dostavljenih podataka.

4.3. Modeliranje električnog opterećenja bazirano na mjerenju

Pristup modeliranju električnog opterećenja koji je temeljen na mjerenju naziva se još i metodologijom modeliranja „baziranoj na ponašanju“, u kojoj se bilježe kvarovi i poremećaji u EES-u. U smislu pristupa modeliranju koristi se naziv „odozgo prema dolje (engl. *top-bottom*)“ jer se statički i dinamički odzivi opterećenja bilježe mjerenjem i prikupljanjem

podataka u uređajima na reprezentativnim odvodima (naponi i struje na odvodima). U ovom pristupu potrebno je pretpostaviti strukturu modela opterećenja.



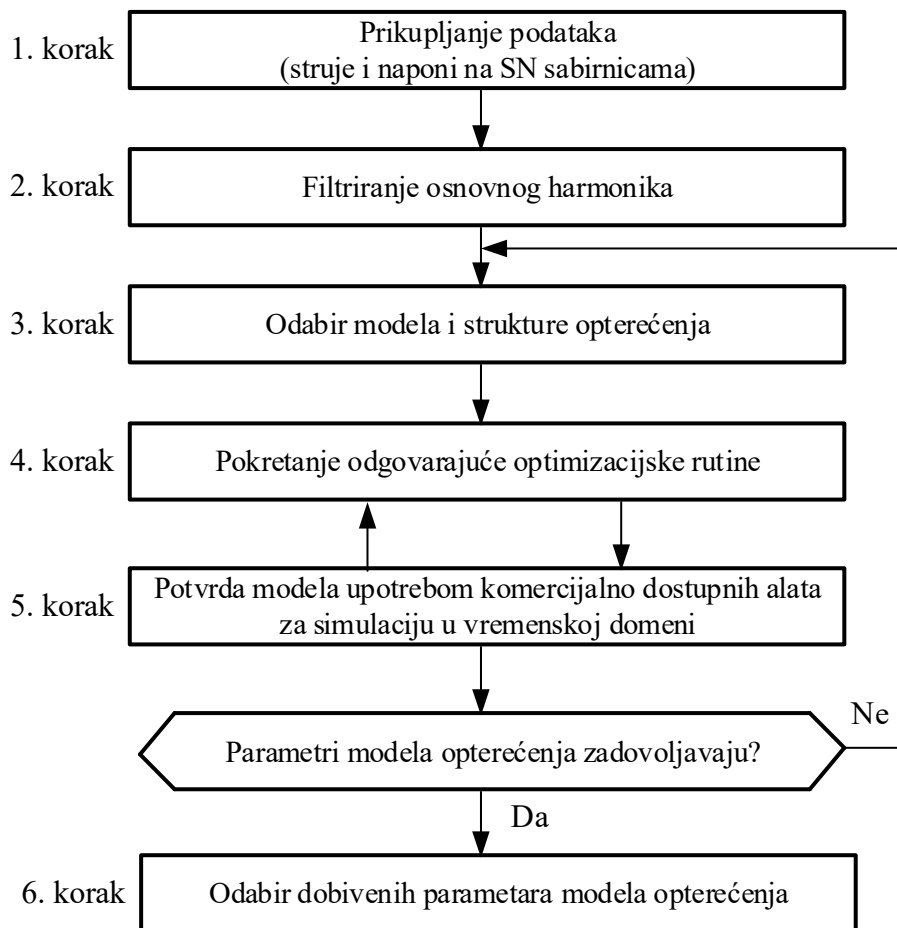
Slika 25: Modeliranje električnog opterećenja temeljeno na mjerenju

Modeliranje električnog opterećenja temeljeno na mjerenju podrazumijeva model trafostanice, prikazan na Slici 25, koji povezuje VN i SN elektroenergetsku mrežu, a sadrži ove komponente:

- VN i SN sabirnice,
- transformator sa regulacijskom sklopkom koja radi pod opterećenjem, čiji su VN i SN izvodi priključeni na VN, odnosno SN sabirnice,
- SN odvod,
- opterećenje.

Crveni krug na Slici 25 predstavlja uređaj za mjerenje struje na sekundaru napojnog transformatora, a plavi kvadrat predstavlja uređaj za mjerenje napona na sabirnicama. Ovi uređaji snimaju odzive opterećenja priključenog na ovu trafostanicu. Odziv opterećenja [61] [62] mjeri se prilikom svakog kvara ili poremećaja u elektroenergetskom sustavu, a poželjno je pratiti i bilježiti ponašanje sustava tijekom normalnog rada [63] [64]. Uređaji za snimanje kvarova ili poremećaja u elektroenergetskom sustavu danas postoje praktički u svakom elektroenergetskom objektu. Radi se o uređajima relejne zaštite koji raspolažu čitavim nizom funkcija, uključujući funkciju snimanja poremećaja (engl. *disturbance recorder*), uređajima za mjerenje kvalitete električne energije koji su u pravilu sastavni dio obračunskih mjernih mjesta (ugrađuju se na granici vlasništva pojedinih elektroenergetskih subjekata, u ovom slučaju između tvrtke koja se bavi prijenosom električne energije i tvrtke koja se bavi distribucijom električne energije ili npr. industrijskog potrošača i sl.), a posljednjih godina sve se više

primjenjuju PMU (engl. *phasor measurement unit*) uređaji koji također imaju mogućnost zapisa kvarova i poremećaja u formatu primjenjivom za obradu u svrhu modeliranja opterećenja.



Slika 26: dijagram toka modeliranja opterećenja na temelju mjerenja

Parametri modela opterećenja procjenjuju se uklapanjem izmjerenih vrijednosti struja i napona u pretpostavljeni model opterećenja, korištenjem tehnika identifikacije. Proces identifikacije uključuje pronalaženje prikladnog matematičkog modela i odgovarajućih parametara koji realno mogu replicirati dinamički odziv opterećenja nakon poremećaja. Slika 26 prikazuje dijagram toka modeliranja opterećenja na temelju mjerenja koji se sastoji od 6 koraka:

- 1) Prikupljaju se podaci o kvarovima i poremećajima u sustavu (vremenska oznaka, naponi i struje svake pojedine faze u vremenskoj domeni, frekvencija, radna i jalova komponenta snage). Optimalno mjesto za prikupljanje podataka je sekundarna strana transformatora u modelu prikazanom na Slici 25.

- 2) Prikupljene fizikalne veličine obrađuju se odstranjivanjem viših harmonika i istosmjerne komponente, tako da se dobije zapis koji sadrži osnovni harmonik gore navedenih fizikalnih veličina.
- 3) Odabir se model opterećenja i odgovarajuća struktura modela opterećenja. Odabrani model opterećenja mora se promijeniti ukoliko izmjerene podatke nije moguće precizno uklopiti u njega.
- 4) Pokreće se optimizacijska rutina. Najčešće se koriste nelinearne optimizacijske tehnike poput metode najmanjih kvadrata za pronalaženje parametara modela opterećenja koji će dati najmanju vrijednost funkcije izvedbe F

$$F(\Theta) = \sum_k (y_m(t_k) - y_c(t_k))^2 \quad (24)$$

gdje je:

- F – funkcija cilja koju treba minimizirati,
- Θ – parametar vektor kojeg treba procijeniti,
- y_m – izmjerene vrijednosti,
- y_c – izračunate vrijednosti,
- t_k – vremenski korak simulacije [65].

S obzirom na funkciju izvedbe parametara koji se procjenjuju, vrijednosti parametara koji će minimizirati pogrešku između izmjerenih i izračunatih vrijednosti funkcije identificiraju se pomoću tehnika optimizacije.

- 5) Odabrani model opterećenja potrebno je potvrditi upotrebom komercijalno dostupnih alata za simulaciju u vremenskoj domeni. Odzivi modela radne i jalove snage dobivaju se korištenjem konačnih vrijednosti parametara i zabilježenih napona. Ovi odzivi uspoređuju se sa stvarno snimljenim odzivom radne i jalove snage. Ako se vrijednosti ne podudaraju (što znači da odziv modela nije identičan vrijednostima dobivenima mjerenjima) ili konačne vrijednosti parametara nisu odgovarajuće (unutar njihovog prikladnog ili dopuštenog raspona), proces se ponavlja odabirom različitih početnih procjena ili promjenama donje i gornje granice početnih procjena.
- 6) Ako se dobiju odgovarajući parametri modela opterećenja, proces je uspješno završen. U suprotnom se traži drugi model opterećenja i vraća se na korak 3.

Prednosti modeliranja električnog opterećenja koji se temelji na mjerenju su sljedeće:

- pouzdaniji je jer mjeri izravni dinamički odziv stvarnog opterećenja,
- bilježi vremensku evoluciju opterećenja,
- primjenjiv je na sve modele opterećenja.

Nedostaci ovog tipa modeliranja su:

- općenito je malo dostupnih izmjerenih podataka fizikalnih veličina za vrijeme poremećaja i kvarova iz kojih se mogu procijeniti parametri modela opterećenja. EES se održava s ciljem minimiziranja kvarova, a pokusi kratkih spojeva su složeni za organizaciju, naročito kad ih treba organizirati za potrebe modeliranja električnog opterećenja (što je u nadležnosti i za potrebe operatora prijenosnog sustava, dok su ciljane lokacija izvođenja pokusa kratkih spojeva u mreži operatora distribucijskog sustava ili drugih korisnika prijenosne mreže). Upitan je i broj pokusa kratkog spoja koje je potrebno izvesti da bi se dobili zadovoljavajući propadi napona na osnovu kojih se može snimiti odziv opterećenja.

Glavna prednost ovog tipa modeliranja je dobivanje podatke izravno iz stvarnog sustava, a glavni nedostatak je nedostatna količina odgovarajućih podataka o mjerenju poremećaja iz kojih mogu se procijeniti parametri modela opterećenja.

5. NAPREDNA N-1 ANALIZA NEPREDVIĐENIH DOGAĐAJA

Za vođenje EES-a, kako je navedeno u poglavlju 2, koriste se sustavi upravljanja energijom (engl. *EMS – Energy Management System*) koji uključuju brojne funkcije, uključujući N-1 analizu nepredviđenih događaja koja analizira učinke ispada pojedinog elementa EES-a (npr. dalekovod, transformator, proizvodna jedinica, itd.) na EES u cjelini.

Rezultati N-1 analize nepredviđenih događaja pružaju voditelju sustava osnovne informacije o statičkoj sigurnosti EES-a. Nedostatak N-1 analize nepredviđenih događaja, uz sva njena korisna svojstva, je činjenica da ova analiza ne može razlikovati sigurne režime rada od potencijalno opasnih u smislu naponske nestabilnosti. Nestabilnost napona, kako je navedeno u poglavlju 2, predstavlja jednu od većih ugroza sigurnosti EES-a.

Iz tog razloga, osmišljena je proširena N-1 analiza nepredviđenih događaja [66] na način da je standardna N-1 analiza nepredviđenih događaja proširena analizom statičke naponske stabilnosti koja se temelji na modalnoj analizi.

5.1. V-Q osjetljivost i modalna analiza u procjeni naponske stabilnosti

Naponska stabilnost, kako je navedeno u poglavlju 3, predstavlja sposobnost EES-a da održi napone u svim čvorovima unutar propisanih granica nakon poremećaja [1]. EES postaje naponski nestabilan u slučaju manjeg ili većeg poremećaja, kada dolazi do progresivnog pada napona kojeg operater sustava više nije u mogućnosti kontrolirati.

Malim poremećajem naponske stabilnosti smatra se poremećaj prilikom kojeg EES ostaje stabilan s naponima svih čvorova unutar zadanih limita. Povećanje električkog opterećenja sustava ili tzv. diskontinuirano upravljanje (npr. rad regulacijskih sklopki transformatora pod opterećenjem) smatra se malim poremećajem naponske stabilnosti.

Veliki poremećaj stabilnosti napona nastaje prilikom kratkih spojeva unutar EES-a kada dolazi do ispada pojedinih njegovih elemenata. Može doći do ispada pojedine proizvodne jedinice, pojedinog dalekovoda ili transformatora prijenosne mreže, zbog čega se u određenim

pogonskim uvjetima ozbiljno ugrožava sposobnost sustava da održi napone čvorova unutar propisanih granica. Sposobnost sustava da u svim čvorovima održi napon stabilnim općenito ovisi o karakteristikama sustava, karakteristikama opterećenja i kumulativnom učinku sustava relejne zaštite i sustava upravljanja na primarnu opremu. Liberalizacija tržišta električne energije, politika dekarbonizacije i sve veća potreba za električnom energijom u svijetu, doveli su do priključenja sve većeg broja različitih obnovljivih izvora električne energije na EES. Lokacije na kojima se grade ovi izvori definirane su tehnoeкономskim kriterijima i isplativošću gradnje za investitora, pa su često nepovoljne u smislu sigurnog vođenja EES-a. Ta činjenica predstavlja jedan od razloga što se EES-ovima danas upravlja sve bliže graničnim mogućnostima ugrađene opreme, pa analiza naponske stabilnosti još više dobiva na značenju. Analiza naponske stabilnosti za potrebe planiranja i vođenja EES-a uključuje procjenu dva značajna aspekta, s obzirom na stanje sustava:

- 1) blizinu točke nestabilnosti napona,
- 2) mehanizam pomoću kojeg se razvija nestabilnost.

Prvi aspekt definira rezervu koja je operateru sustava na raspolaganju prilikom vođenja EES-a s obzirom na stabilnost napona. Drugi aspekt ukazuje na protumjere koje operater sustava može poduzeti u svrhu povećanja stabilnosti napona.

Osnovni uvjet naponske stabilnosti EES-a u određenom pogonskom stanju, kako je navedeno u poglavlju 3, je da napon svakog čvora sustava raste kad se u taj čvor „utisne“ jalova snaga. Jednako tako, EES smatra se naponski nestabilnim ako u bilo kojem čvoru sustava dolazi do pada napona kad se u njega „utisne“ jalova snaga. Drugim riječima, EES naponski je stabilan ako je $V - Q$ osjetljivost pozitivna za svaki čvor sustava, a smatra se naponski nestabilnim ako je $V - Q$ osjetljivost negativna za barem jedan čvor sustava.

5.1.1. Provjera $V - Q$ osjetljivosti

Provjerom $V - Q$ osjetljivosti dobiju se pouzdane informacije o naponskoj stabilnosti EES-a u cjelini, i precizno se identificiraju dijelovi sustava koji su potencijalno problematični u smislu naponske stabilnosti. Primjenom koncepta modalne analize, osim gore navedenih podataka,

dobiju se informacije o mehanizmima pomoću kojih se razvijaju nestabilnosti. Provjera $V - Q$ osjetljivosti je postupak koji prethodi modalnoj analizi.

Linearizirane jednadžbe snage i napona stacionarnog stanja EES-a mogu se prikazati izrazom

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (25)$$

gdje su:

- ΔP – mala promjena radne snage u pojedinom čvoru,
- ΔQ – mala promjena jalove snage u pojedinom čvoru,
- ΔV – mala promjena magnitude napona u pojedinom čvoru,
- $\Delta\theta$ – mala promjena faznog kuta u pojedinom čvoru,
- $J_{P\theta}$ – osjetljivost radne snage na malu promjenu faznog kuta napona pojedinog čvora,
- J_{PV} – osjetljivost radne snage na malu promjenu veličine napona pojedinog čvora,
- $J_{Q\theta}$ – osjetljivost jalove snage na malu promjenu faznog kuta napona pojedinog čvora,
- J_{QV} – osjetljivost jalove snage na malu promjenu veličine napona pojedinog čvora.

Matrica $\begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix}$ naziva se Jacobijeva matrica i prikazuje ovisnost malih promjena amplitude i kuta napona uslijed malih promjena injekcije radne, odnosno jalove snage u pojedinim čvorovima EES-a.

Iako na stabilnost napona utječu promjene obje komponente snage, i radne i jalove, analiza naponske stabilnosti za fiksnu radnu točku može se provesti uzimajući u obzir samo promjene jalove snage uz konstantnu radnu snagu, što u suštini predstavlja izračun $Q - V$ krivulja. Učinak promjena radne snage na stabilnost napona može se razmatrati za različita pogonska stanja (stupanj opterećenja, stupanj prijenosa električne energije, itd.) fiksiranjem iznosa radne snage i analizom promjene odnosa jalove snage i napona. Ako se, dakle, radna snaga održava konstantnom ($\Delta P = 0$), sustav lineariziranih jednadžbi tokova snaga za stacionarno stanje elektroenergetskog sustava može se prikazati izrazom [67]

$$\Delta Q = [J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{PQ}^{-1} \cdot J_{PV}] \Delta V = J_R \cdot \Delta V \quad (26)$$

gdje je

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\theta} \cdot J_{PQ}^{-1} \cdot J_{PV}] \quad (27)$$

Matrica J_R naziva se reducirana Jacobijeva matrica sustava i izravno povezuje veličinu napona čvora EES-a s injekcijom jalove snage

$$\Delta V = J_R^{-1} \cdot \Delta Q \quad (28)$$

$V - Q$ osjetljivost izračunava se rješavanjem ove jednadžbe.

5.1.2. Modalna analiza

Problem svojstvene vrijednosti matrice razmatra vektorsku jednadžbu [68]

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x} \quad (29)$$

gdje je

- $\mathbf{A}$ – zadana kvadratna matrica,
- λ – nepoznati skalar,
- $\mathbf{x}$ – nepoznati vektor.

Vrijednost λ za koju vektorska jednadžba $\mathbf{A}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x}$ ima rješenje $\mathbf{x} \neq 0$ naziva se svojstvena vrijednost ili karakteristična vrijednost matrice $\mathbf{A}$. Odgovarajuća rješenja $\mathbf{x} \neq 0$ vektorske jednadžbe $\mathbf{A}\mathbf{x} = \lambda\mathbf{x}$ nazivaju se svojstveni vektori ili karakteristični vektori, i odgovaraju svojstvenim vrijednostima λ .

Glavna obilježja naponske stabilnosti mogu se identificirati proračunom svojstvenih vrijednosti λ_i , i odgovarajućih desnih (ξ) i lijevih (η) svojstvenih vektora matrice J_R . Svojstvene vrijednosti, i desni i lijevi svojstveni vektori reducirane Jacobijeve matrice sustava J_R , definiraju modove (područja ili dijelove EES-a) koji teže nestabilnosti napona.

$$J_R = \xi \cdot \lambda \cdot \eta \quad (30)$$

$$\Delta V = J_R^{-1} \cdot \Delta Q = \xi \cdot \lambda^{-1} \cdot \eta \cdot \Delta Q = \sum_{i=1}^n \frac{\xi_i \eta_i}{\lambda_i} \Delta Q \quad (31)$$

Veličina svojstvenih vrijednosti prikazuje relativnu udaljenost do točke sustava u kojoj nastaje naponska nestabilnost. Ako se želi izračunati maksimalni iznos radne komponente snage kojim je moguće opteretiti pojedini čvor EES-a, radna snaga u tom čvoru postupno se povećava do

točke kad sustav postane nestabilan. Pri tome se u svakom koraku primjenjuje modalna analiza. Kad EES dosegne granicu naponske stabilnosti, modalnom analizom detektiraju se područja sustava koja su kritična u smislu naponske stabilnosti i elementi sustava koji doprinose ovom fenomenu.

Manji iznos svojstvene vrijednosti znači slabiji odgovarajući modalni napon. Svojstvena vrijednost napona jednaka nuli jasan je pokazatelj neizbježnog sloma napona, jer svaka varijacija modalne jalove snage uzrokuje beskonačnu varijaciju modalnog napona (prema izrazu $\Delta V = \frac{\Delta Q}{J_R}$).

Negativan iznos svojstvene vrijednosti znači da je sustav prošao kritičnu točku stabilnosti napona. Veličine svojstvenih vrijednosti pokazuju modove (dijelove EES-a) koji najviše teže nestabilnosti napona: radi se o modovima s najmanjim svojstvenim vrijednostima. Bez obzira na prethodno navedeno, iznos svojstvene vrijednosti nije kvantitativan pokazatelj, nego signal upozorenja operateru sustava koji je potrebno dodatno istražiti izračunom indeksa uspješnosti temeljenog na naponu PI_V što će biti opisano u poglavlju 5.3.

Faktori doprinosa pojedinih grana i pojedinih generatora EES-a izračunavaju se modalnom analizom iz svojstvenih vektora, te daju korisne informacije o mogućim korektivnim mjerama u slučaju problema sa naponskom stabilnosti. Faktori doprinosa pojedinih grana za svaki mod detektiraju grane EES-a koje troše velike količine jalove snage pri malim promjenama reaktivnog opterećenja. Ove grane, u električkom smislu, predstavljaju slabe dijelove sustava ili se radi o granama koje su preopterećene.

Relativan faktor doprinosa grane $l - k$ modu i izračunava se iz jednadžbe

$$P_{l-k,i} = \frac{\Delta Q_{l-k,i}}{\Delta Q_{l,max,i}} \quad (32)$$

gdje je

- $\Delta Q_{l-k,i}$ – mala promjena gubitka jalove snage u grani $l - k$ za mod i ,
- $\Delta Q_{l,max,i}$ – najveća postupna promjena reaktivnog opterećenja u grani $l - k$ za sve modove.

Relativan faktor doprinosa generatora g u modu i izračunava se iz jednadžbe

$$P_{g_i} = \frac{\Delta Q_{g_i}}{\Delta Q_{g_{max_i}}} \quad (33)$$

gdje je

- ΔQ_{g_i} – mala promjena varijacije jalove snage na generatoru g za mod i ,
- $\Delta Q_{g_{max_i}}$ – maksimalna postupna promjena varijacije jalove snage na generatoru g za sve modove.

Faktori doprinosa generatora za svaki mod pokazuju koji generatori daju najviše jalove snage kao reakciju na mali porast reaktivnog opterećenja sustava. Doprinosi generatora pružaju bitne informacije o rezervi jalove snage u svim sinkronim generatorima sustava što je ključan podatak za održavanje odgovarajuće sigurnosne rezerve jalove snage sustava.

5.2. Utjecaj izvora jalove snage i načina modeliranja električnog opterećenja na procjenu naponske stabilnosti

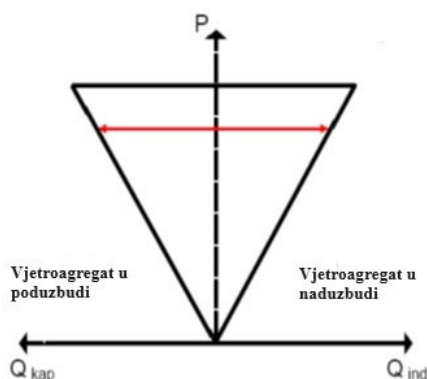
Naponska stabilnost jedan je od ključnih faktora sigurnosti EES-a i, kako je navedeno u poglavlju 3, neodvojivo je povezana s jalovom snagom u sustavu. Glavni razlog nastanka naponske nestabilnosti je nemogućnost EES-a da odgovori zahtjevima za jalovom snagom.

5.2.1. Utjecaj sinkronih generatora

Primarni izvor jalove snage EES-a su sinkroni generatori i oni najviše pridonose održavanju zadanog naponskog profila EES-a. U pravilu rade u režimu naduzbude, u kojem isporučuju i radnu i jalovu komponentu snage sustavu. Ovisno o pogonskom dijagramu (Slika 12) pojedinog sinkronog generatora, u ovom režimu rada generator najčešće ima raspolaganju ima određenu (ne preveliku) rezervu jalove snage za plasiranje u EES u slučaju potrebe.

5.2.2. Utjecaj obnovljivih izvora električne energije

Obnovljivi izvori električne energije najčešći je zajednički naziv za izvore električne energije koji se ne smatraju konvencionalnima (poput klasičnih hidroelektrana i termoelektrana). U obnovljive izvore spadaju i elektrane na biomasu, kao i ostale elektrane čiji pogonski strojevi (turbine su ovdje u pravilu pogonski strojevi, a vrsta turbine ovisi o proizvodnom procesu) najčešće pogone sinkrone generatore, ali se za razmatranja naponske stabilnosti u obzir uzimaju prethodno navedeni obnovljivi izvori. Glavni razlog za to je mjesto njihovog priključenja u EES. Kako imaju značajno veće nazivne instalirane snage u usporedbi sa ostalim obnovljivim izvorima električne energije, ovi se izvori u pravilu priključuju na prijenosnu elektroenergetsku mrežu pa se, s tim u skladu, sve više uzimaju u razmatranje kao izvor jalove snage za ublažavanje problema s naponom [69]. Obnovljivi izvori električne energije priključeni na prijenosnu elektroenergetsku mrežu najčešće su vjetroelektrane i sunčane (fotonaponske) elektrane. Tipičan oblik pogonskog dijagrama ovih izvora prikazan je na Slici 27. Ovi izvori najčešće rade s faktorom snage što bliže vrijednosti jedan ($\cos\varphi \sim 1$) radi maksimiziranja isporuke radne komponente snage u mrežu i, posljedično, maksimiziranja profita vlasnika elektrana. Uz ovakav pogon izostaje znatnija podrška jalove snage EES-u [70]. Osim navedenog, pretvarači ovih elektrana najčešće su projektirani za rad samo u području unutar napona koji odstupa $\pm 10\%$ od nazivnog napona na stezaljkama.



Slika 27: Tipičan oblik pogonskog dijagrama obnovljivih izvora električne energije (vjetroagregat)

5.2.3. Utjecaj baterijskih sustava za pohranu električne energije

Baterijski sustavi za pohranu energije relativno su nov element EES-a. Koriste elektrokemijsku pretvorbu za pohranu energije. Prilikom punjenja, baterijski sustavi za pohranu energije pretvaraju električnu energiju u kemijsku, a tijekom pražnjenja ova se energija ponovno pretvara u električnu energiju i isporučuje EES-u. Prema dostupnim podacima, moguće je odvojeno upravljanje radnom i jalovom komponentom snage [71] što znači da u budućnosti treba računati i na ovu vrstu izvora električne energije u podršci održavanju propisanih naponskih prilika EES-a. Baterijski sustavi za pohranu energije na EES su povezani preko izmjenjivača.

5.2.4. Utjecaj regulacijskih transformatora

U većini EES-ova, kako je navedeno u poglavlju 3.3.4, transformatori koji povezuju različite naponske razine prijenosne mreže opremljeni su regulacijskim sklopkama. Uobičajena praksa u koordinaciji dviju razina napona na kojima djeluju regulacijske sklopke je da viša naponska razina mora imati brže djelovanje regulacijskih sklopki u odnosu na regulacijske sklopke u mreži nižeg napona [45], radi učinkovitijeg rada. Kada regulacijska sklopka vrati napon sekundarne strane transformatora V_2 blizu njegove referentne vrijednosti, snaga opterećenja koja ovisi o tom naponu, također se obnavlja.

5.2.5. Utjecaj električnog opterećenja

Modeli električnog opterećenja, ovisno o vrsti analize, mogu biti statičkog ili dinamičkog tipa, ili se koristi kombinacija oba tipa opterećenja. Statički modeli prikazuju radnu i jalovu snagu u funkciji veličine napona, te imaju konstantnu vremensku karakteristiku. Dinamički modeli prikazuju radnu i jalovu snagu u funkciji veličine napona i vremena [72].

Za istraživanje mogućnosti proširene N-1 analize nepredviđenih događaja koja obrađuje naponsku stabilnost EES-a u statičkim prilikama, na način da standardnu N-1 analizu nepredviđenih događaja proširuje analizom statičkog napona temeljenom na modalnoj analizi, za model električnog opterećenja u proračunima je odabran *ZIP* model. Ovaj model prethodno je opisan u poglavlju 3.3.

5.3. Algoritam proširene analize nepredviđenih događaja

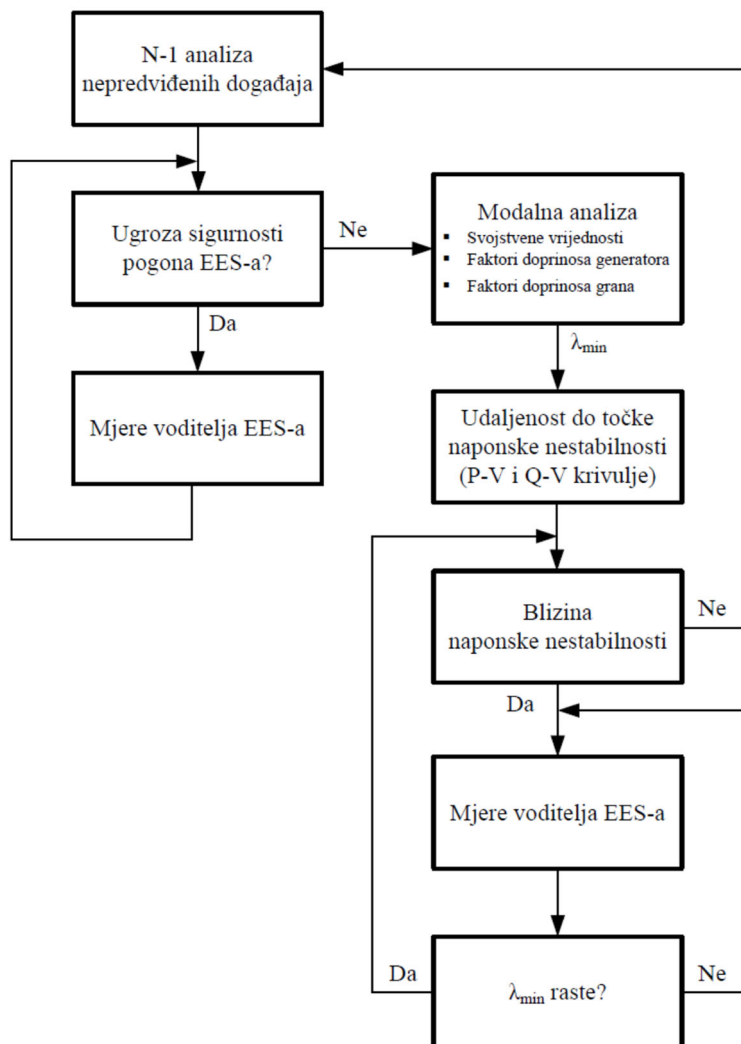
Proširenu analizu nepredviđenih događaja [66] moguće je realizirati kombiniranjem klasične N-1 analize nepredviđenih događaja i modalne analize stabilnosti napona koja je poboljšana unaprijed definiranom listom prioriteta. Lista prioriteta temelji se na analizi osjetljivosti svojstvenih vrijednosti reducirane Jacobijeve matrice EES-a J_R .

U prvom koraku provodi se klasična N-1 analiza nepredviđenih događaja radi detektiranja preopterećenih elementa sustava i/ili čvorova čija su odstupanja napona izvan dopuštenih vrijednosti. Nakon svakog pokretanja proračuna tokova snaga, provodi se modalna analiza stabilnosti napona kako bi se zabilježile odgovarajuće svojstvene vrijednosti.

Ako se tijekom analize nepredviđenih događaja otkriju prekoračenja zadanih granica, poduzimaju se korektivne radnje radi održavanja željene razine sigurnosti EES-a. Nakon svake korektivne radnje provodi se modalna analiza stabilnosti napona i bilježe se odgovarajuće svojstvene vrijednosti. Usporedbom svojstvenih vrijednosti, operater sustava dolazi do informacija o stabilnosti napona.

Ako bilo koja od izračunatih svojstvenih vrijednosti postane vrlo mala, ili se približi vrijednosti nula, određuju se odgovarajući faktori doprinosa pojedinih generatora i grana EES-a, radi detektiranja generatora koji najviše utječu na poboljšanje stabilnosti napona i detektiranja grana koje troše najviše jalove snage za provedenu simulaciju. Za najkritičnije modove stabilnosti napona izračunavaju se mogućnosti povećavanja opterećenja radnom i jalovom snagom pojedinog čvora EES-a što je bitan podatak operateru sustava pri održavanju naponskih prilika stabilnima.

Algoritam proširene analize nepredviđenih događaja prikazan je na Slici 28 u obliku dijagrama toka.



Slika 28: Algoritam proširene analize nepredviđenih događaja

Korektivne radnje koje operater sustava provodi u cilju smanjenja preopterećenja i/ili ugroze napona unaprijed su određene za odabrani broj nepredviđenih slučajeva i operativnih scenarija kao što su:

- različite razine opterećenja sustava (u skladu sa trendovima ponašanja opterećenja),
- različite topologije prijenosne mreže (ovisno o raspoloživosti pojedinih elemenata prijenosne mreže),
- raspoloživost proizvodnih jedinica (ovisno o dostupnosti pogonskog sredstva koje pokreće pogonske strojeve proizvodnih jedinica, i ovisno o planiranim remontima proizvodnih jedinica).

Korektivne radnje operatera radi poboljšanja naponske stabilnosti također se unaprijed provode, a organiziraju se prema listi prioriteta. Brzo rangiranje radnji koje operater provodi vrši se izračunom indeksa uspješnosti temeljenog na naponu (engl. *voltage-based performance index*) PI_V [73]

$$PI_V = \sum_i^n \frac{w_i}{2\alpha} \left(\frac{|V_i| - |V_i^r|}{\Delta V_i^{lim}} \right)^{2\alpha} \quad (34)$$

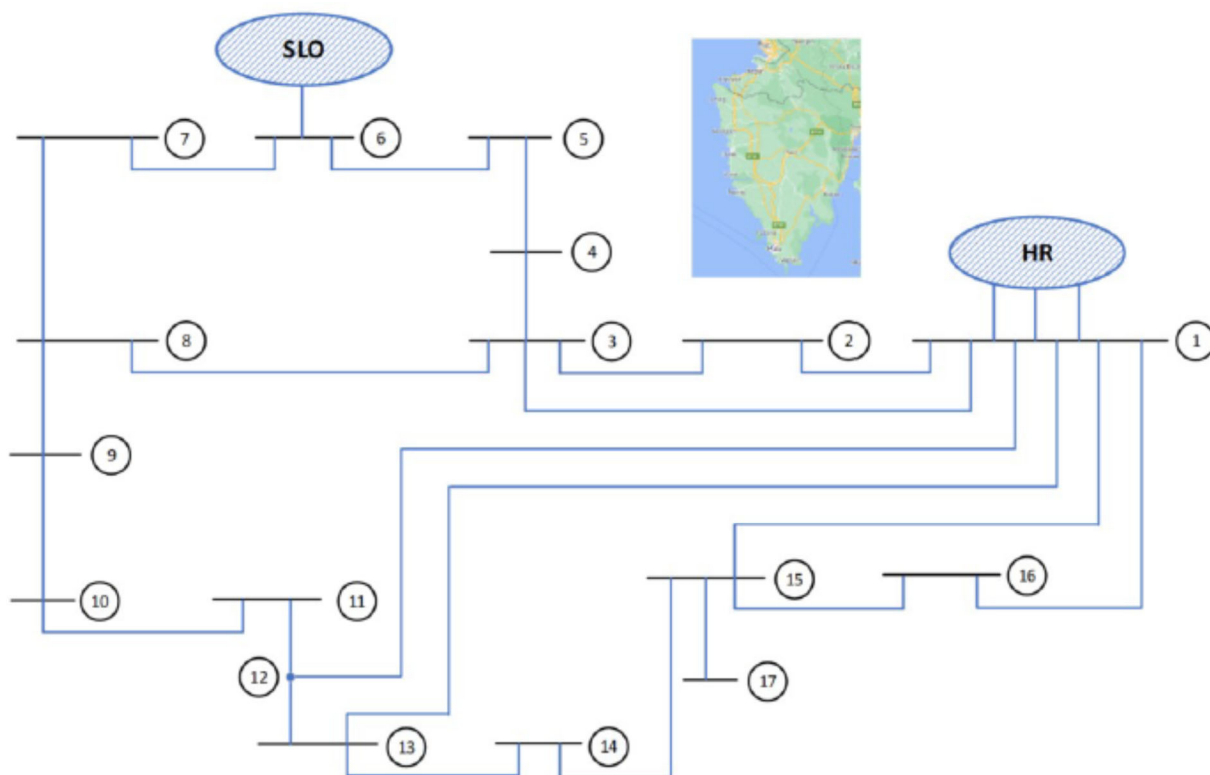
gdje je

- $|V_i|$ – veličina napona u čvoru i ,
- $|V_i^r|$ – nazivni napon u čvoru i ,
- ΔV_i^{lim} – vrijednost odstupanja napona iznad kojeg daljnja odstupanja nisu prihvatljiva,
- n – broj čvorova sustava,
- w_i – realni ne-negativni težinski faktor za pridjeljivanje većih vrijednosti kritičnim čvorovima sustava,
- α – eksponent funkcije penalizacije (preferira se $\alpha = 1$).

Izračun indeksa uspješnosti temeljenog na naponu PI_V jedna je od metoda analize naponske stabilnosti EES-a koja se provodi mjerenjem odstupanja napona čvorova od dozvoljenih granica za vrijeme kvarova i poremećaja. Ova metoda pomaže operateru sustava u identifikaciji potencijalno problematičnih dijelova sustava. Veća vrijednost ovog indeksa ukazuje operateru sustava na ozbiljnije probleme sa naponom i, posljedično, na rizik od naponskog sloma.

5.4. Verifikacija algoritma proširene analize nepredviđenih događaja

Istraživanja za potrebe verifikacije algoritma proširene analize nepredviđenih događaja provedena su na simulacijskom modelu zapadnog dijela hrvatskog EES-a. Model je izrađen na osobnom računalu u računalnom programu za analizu EES-a, a prikazan je na Slici 29. Model uključuje EES poluotoka Istre, zajedno sa međudržavnim dalekovodima koji povezuju zapadni dio hrvatskog EES-a sa EES-om Republike Slovenije.



Slika 29: Simulacijski model zapadnog dijela hrvatskog 110 kV EES-a

Ovakav model odabran je za provedbu verifikacije algoritma proširene analize nepredviđenih događaja umjesto uobičajenih IEEE modela zbog dostupnosti stvarnih podataka o opterećenjima sustava, kako bi se na što realnijem modelu dokazala ispravnost algoritma. Modelirani parametri EES-a prikazani su u Tablici 5 (impedancije grana) i Tablici 6 (opterećenje čvorova sustava).

Opterećenje u simuliranom scenariju bilo je visoko i odgovaralo je ljetnom vršnom opterećenju koje je ostvareno 10. kolovoza 2019. u 20. satu. Ovakvo opterećenje odabrano je radi razmatranja problematike naponske stabilnosti u najtežim uvjetima. Ukupno opterećenje od 270 MW i 23 MVar raspoređeno je na 16 čvorova potrošnje s jednim generatorskim čvorom (čvor 1). U ovom čvoru priključen je sinkroni generator koji u simuliranom scenariju plasira 200 MW i 13 MVar u EES. Opterećenja priključena na čvorove modela napajaju se preko transformatora s regulacijskim sklopkama koje rade pod opterećenjem. U čvoru 1 modelirana je i 220 kV razina, zajedno sa vezom prema ostatku EES-a Republike Hrvatske, te dva mrežna transformatora prijenosnog omjera 220/110 kV. Radi provođenja simulacija i određivanja protumjera za sprečavanje naponskog sloma, u svakom od čvorova 5, 8 i 11 modelirana je kombinacija obnovljivog izvora električne energije i baterijskog sustava za pohranu energije.

Provedena analiza N-1 nepredviđenih događaja uključuje pojedinačne ispade iz pogona svih 110 kV dalekovoda, ispad sinkronog generatora u čvoru 1, te ispad međudržavnog dalekovoda prema Republici Sloveniji i dalekovoda prema ostatku EES-a Republike Hrvatske.

Tablica 5: Parametri modeliranog EES-a

Dalekovod	$R_l[\Omega/\text{km}]$	$X_l[\Omega/\text{km}]$	$B_l[\mu\text{S}/\text{km}]$	$l[\text{km}]$	$I_{\max}[\text{A}]$
1-2	0,12	0,4	2,89	14,0	645
1-3	0,12	0,4	2,89	29,9	645
1-12	0,12	0,41	2,8	43,0	645
1-15	0,19	0,43	2,68	13,8	470
1-16	0,19	0,43	2,68	6,8	470
1-13	0,06	0,41	2,68	32,8	1280
11-12	0,12	0,41	2,8	23,4	645
12-13	0,12	0,41	2,8	10,2	645
2-3	0,12	0,4	2,89	18,8	645
3-4	0,12	0,41	2,81	12,1	645
3-8	0,12	0,4	2,89	20,7	645
4-5	0,12	0,4	2,8	9,0	645
5-6	0,12	0,4	2,8	26,7	645
6-7	0,12	0,41	2,8	12,5	645
7-8	0,12	0,4	2,8	29,9	645
8-9	0,12	0,41	2,78	10,0	645
9-10	0,12	0,41	2,78	20,0	645
10-11	0,12	0,42	2,8	19,3	645
12-13	0,12	0,41	2,8	10,1	645
13-14	0,12	0,41	2,8	6,7	645
14-15	0,24	0,35	2,68	35,3	645
15-16	0,12	0,41	2,78	6,7	470
15-17	0,12	0,4	2,89	13,2	645

Tablica 6: Parametri opterećenja po čvorovima

Čvor sustava	Radna komponenta opterećenja P [MW]	Jalova komponenta opterećenja Q [MVar]
2	2,2	0,0
3	7,8	-8,8
4	2,1	0,4
5	5,7	-0,9
6	19,1	4,5
7	9,0	2,2
8	50,0	8,8
9	22,0	4,6
10	27,1	4,8
11	7,8	-1,6
13	43,4	3,3
14	37,5	3,7
15	17,9	0,6
17	4,5	-0,5

Simulacije su provedene sljedećim redoslijedom:

1. U redovnom pogonskom stanju, sa svim elementima mreže u pogonu, izvršena je modalna analiza te su određene $P - V$ i $Q - V$ krivulje za najslabiji mod (za područje unutar kojeg su čvorovi s najmanjim svojstvenim vrijednostima). Za čvorove s najmanjim svojstvenim vrijednostima izračunata je udaljenost od trenutne radne točke do kritične točke na $P - V$ i $Q - V$ krivulji, te je izračunata udaljenost uspoređena s usvojenom sigurnosnom marginom. Opisani postupak nakon toga proveden je za sve pretpostavljene nepredviđene događaje.
2. Provedene su simulacije za rangiranje razmatranih protumjera u cilju sprečavanja naponske nestabilnosti (osjetljivost svojstvene vrijednosti s obzirom na raspoloživost jalove snage sinkronih generatora, obnovljivih izvora energije, djelovanje regulacijskih sklopki energetske transformatora koje rade pod opterećenjem).
3. Izračunat je indeks uspješnosti temeljen na naponu.

4. Istražen je učinak modeliranja opterećenja (sastava modeliranog opterećenja) na stabilnost napona.

5.4.1. Rezultati provedenih simulacija

Tablica 7 prikazuje rezultate modalne analize (svojstvena vrijednost prvog najslabijeg moda i naznaka područja koje mu pripada) za osnovni slučaj (sa svim elementima u pogonu) i za sve simulirane N-1 nepredviđene događaje.

Rezultati modalne analize prikazani u Tablici 7 pokazuju da je većina nepredviđenih događaja uzrokovala probleme s naponskom stabilnosti u istom području. Radi se o području u kojem se nalaze čvorovi 6 i 7. Uvažavajući topologiju mreže i električku udaljenost ovih čvorova od najznačajnijeg izvora jalove snage, rezultati su očekivani. Nepredviđeni događaji 15, 16, 17 i 18 imaju svojstvene vrijednosti skoro identične svojstvenoj vrijednosti osnovnog slučaja. Ovi rezultati pokazuje kako navedeni nepredviđeni događaji praktički nemaju utjecaja na naponsku stabilnost. Nepredviđene događaje koji uključuju ispade elemenata koji povezuju analizirano područje s ostatkom EES-a (mrežni transformatori 220/110 kV u čvoru 1, interkonekcijski vodovi 110 kV i 220 kV razine) karakteriziraju rezultati koji su usporedivi s nepredviđenim događajima 2 i 7.

U skladu sa rezultatima provedenih simulacija prikazanima u Tablici 7, određene su $P - V$ i $Q - V$ krivulje za čvorove koji pripadaju najslabijim modovima za svaki nepredviđeni slučaj (npr. za nepredviđeni događaj br. 3, određene su $P - V$ i $Q - V$ krivulje samo za čvor 5). Na osnovu određenih $P - V$ i $Q - V$ krivulja, uz unaprijed određene sigurnosne granice, izračunata je udaljenost do kritične radne točke sustava.

U Tablici 8 prikazani su rezultati provedenih simulacija dobiveni prema prethodno opisanoj metodologiji za osnovni slučaj kada su svi elementi sustava u pogonu, i za nepredviđeni N-1 događaj koji je rezultirao najmanjom svojstvenom vrijednošću λ_{min} , što ukazuje na moguće područje naponske nestabilnosti. Iako treći stupac Tablice 8 označava mod s najmanjom svojstvenom vrijednosti λ_{min} , ova vrijednost ne može definirati operateru sustava koliko je točno sustav blizu naponske nestabilnosti. Najvrjednije informacije operater sustava dobiva iz četvrtog i petog stupca, koji prikazuju apsolutnu udaljenost određenog čvora sustava do točke

nestabilnosti napona u smislu mogućnosti povećanja radnog i jalovog opterećenja. Ove udaljenosti dobivene su iz izračunatih $P - V$ i $Q - V$ krivulja za čvorove koji pripadaju najslabijem modu (području). Šesti stupac kvalitativno potvrđuje podatke iz četvrtog i petog stupca. Ovaj stupac prikazuje $V - Q$ osjetljivost (faktor osjetljivosti) napona čvorova sabirnica na injektiranje jalove snage i na taj način ukazuje na najslabije čvorove u smislu stabilnosti napona, ali ne daje informacije o tome koliko je sustav blizu nestabilnosti napona.

Tablica 7: Svojstvene vrijednosti koje odgovaraju najslabijem modu za svaki pojedini nepredviđeni događaj

Nepredviđeni događaj	Ispad elementa mreže	Svojstvena vrijednost λ [-]	Najslabiji mod i pripadajuće područje
0	Svi elementi mreže su u pogonu	0,416	6-7
1	Dalekovod 3-4	0,325	5
2	Dalekovod 1-11-13	0,335	11
3	Dalekovod 4-5	0,348	5
4	Dalekovod 8-3	0,353	8-9
5	Dalekovod 1-3	0,355	6-7
6	Dalekovod 1-2	0,356	6-7
7	Dalekovod 2-3	0,366	6-7
8	Generator u čvoru 1	0,368	6-7
9	Dalekovod 10-11	0,376	10
10	Dalekovod 5-6	0,390	6
11	Dalekovod 7-8	0,397	7
12	Dalekovod 1-13	0,403	6-7
13	Dalekovod 8-9	0,405	9
14	Dalekovod 14-16	0,405	6-7
15	Dalekovod 6-7	0,411	6-7
16	Dalekovod 9-10	0,411	6-7
17	Dalekovod 1-15	0,412	6-7
18	Dalekovod 13-44	0,415	6-7

Tablica 8: Indikatori stabilnosti napona za bazni slučaj i najteži nepredviđeni događaj

Nepredviđeni događaj	Svojstvena vrijednost λ_{min} [-]	Mod (čvorovi)	Mogućnost terećenja ΔP [%] u čvoru br.	Mogućnost terećenja ΔQ [MVar] u čvoru br.	$U - Q_{max}$ [%/MVar] u čvoru br.
0 (uključeni svi elementi)	0,416	6 i 7	čvor 6 → 87 [%] čvor 7 → 83 [%]	čvor 6 → 87,6 [MVar] čvor 7 → 85,5 [MVar]	čvor 6 → 0,17 čvor 7 → 0,17
1 (najgori)	0,325	5	čvor 5 → 72 [%]	čvor 5 → 41,3 [MVar]	čvor 5 → 0,36
18 (najpovoljniji)	0,415	6 i 7	čvor 6 → 88 [%] čvor 7 → 84 [%]	čvor 6 → 87,9 [MVar] čvor 7 → 85,6 [MVar]	čvor 6 → 0,17 čvor 7 → 0,17

Provedba modalne analize za razmatrani podsustav i naknadna analiza odgovarajućih $P - V$ i $Q - V$ krivulja samo za najslabiji mod daje operateru brzu i pouzdanu identifikaciju problematičnih područja EES-a. Međutim, čak i uz ove informacije, operater sustava nema odgovarajući uvid u odabir protumjera, odnosno korektivnih radnji za poboljšanje stabilnosti napona. Osnovni preduvjet za odabir trenutnih odluka od strane operatera sustava je postojanje unaprijed definiranog rangiranja protumjera za sprečavanje nestabilnosti napona. S obzirom da se pogonski uvjeti u sustavu (opterećenje sustava, topologija mreže, raspoloživost proizvodnih jedinica, kompenzacijskih uređaja itd.) stalno mijenjaju, potrebno je izvršiti velik broj simulacija različitih mogućih pogonskih uvjeta, odrediti protumjere i rangirati ih za svaki simulirani scenarij.

5.4.2. Prikaz utjecaja distribuiranih izvora i postrojenja za pohranu električne energije

Radi ispitivanja utjecaja izvora jalove snage na naponske prilike testiranog EES-a, u svakom od čvorova 5, 8 i 11 modeliran je obnovljivi izvor električne energije zajedno sa baterijskim

sustavom za pohranu energije. Sva tri sustava modelirana su sa jednakim karakteristikama (ukupna nazivna snaga $S_n = 10 \text{ MVA}$, faktor snage $\cos\varphi$ u rasponu od vrijednosti 0 do vrijednosti 1). Simulacije su provedene za sve razmatrane nepredviđene događaje, i za svaki nepredviđeni događaj izračunat je indeks uspješnosti temeljen na naponu PI_V , te odgovarajuće $P - V$ i $Q - V$ krivulje. U nastavku su prikazani rezultati za nepredviđeni događaj br. 7 (ispad dalekovoda 2–3).

Kao korektivne radnje razmatrane su promjene radne točke modeliranih izvora električne energije u čvorovima 5, 8 i 11, od pogona u kojem se proizvodi maksimalna radna snaga ($\cos\varphi = 1$), do pogona sa proizvodnjom maksimalne jalove snage ($\cos\varphi = 0$). Tablica 9 prikazuje rezultate simulacije potrebne za rangiranje korektivnih radnji.

Tablica 9: Indikatori stabilnosti napona i rangiranje korektivnih radnji (obnovljivi izvori električne energije i baterijski spremnici) za nepredviđeni događaj br. 7

Oznaka korektivne radnje	Korektivna radnja	$\lambda_{novi}/\lambda_{stari}$ [-]	Mogućnost terećenja ΔP [%] sustava	Mogućnost terećenja ΔQ [MVar] u čvoru 6	PI_V [-]
0	5 _{Pmax} , 8 _{Pmax} , 11 _{Pmax}	1,000	72	71,4	0,399
1	5 _{Qmax} , 8 _{Pmax} , 11 _{Pmax}	1,027	75	76,6	0,227
2	5 _{Pmax} , 8 _{Qmax} , 11 _{Pmax}	1,025	75	75,2	0,202
3	5 _{Pmax} , 8 _{Pmax} , 11 _{Qmax}	1,016	73	73,7	0,228
4	5 _{Qmax} , 8 _{Qmax} , 11 _{Pmax}	1,049	78	80,5	0,189
5	5 _{Qmax} , 8 _{Pmax} , 11 _{Qmax}	1,041	77	79,2	0,175
6	5 _{Pmax} , 8 _{Qmax} , 11 _{Qmax}	1,038	76	77,7	0,148
7	5 _{Qmax} , 8 _{Qmax} , 11 _{Qmax}	1,062	79	83,1	0,251

Drugi stupac Tablice 9 definira korektivnu radnju operatera sustava. Oznaka 5_{Qmax}, 8_{Pmax}, 11_{Pmax} znači da je radna točka modeliranog sustava sa obnovljivim izvorom električne energije i baterijskim spremnikom, spojenog na čvor 5 promijenjena, u odnosu na inicijalno stanje, sa maksimalne proizvodnje radne snage na maksimalnu proizvodnju jalove snage, dok su sustavi modelirani u čvorovima 8 i 11 ostali u režimu maksimalne proizvodnje radne snage. Isti sistem označavanja vrijedi za ostale korektivne radnje. Treći stupac pokazuje promjene odgovarajućih svojstvenih vrijednosti, ukazujući na pomicanje radne točke sustava dalje od točka nastanka

nestabilnosti napona. Stupci četiri i pet prikazuju moguće povećanje radnog i jalovog opterećenja prije dostizanja kritične točke u čvoru br. 6 koji je u ovom nepredviđenom događaju detektiran kao kritičan u smislu stabilnosti napona (u četvrtom stupcu prikazana je postotna vrijednost povećanja ukupne radne snage u odnosu na osnovni scenarij, a peti stupac predstavlja maksimalno povećanje jalove snage u [MVar] u čvoru br. 6). Šesti stupac prikazuje izračunati indeks uspješnosti temeljen na naponu PI_V na temelju kojeg se rangiraju razmatrane korektivne mjere.

Vidi se kako korektivna radnja br. 6 daje najbolje rezultate, s obzirom na ukupna odstupanja napona u analiziranom podsustavu s mogućim povećanjem ukupnog radnog opterećenja mreže za 76% i 77,7 MVar jalovog opterećenja u kritičnom čvoru br. 6 prije nego što dođe do sloma napona. Vidljivo je i kako provedbom korektivnih mjera raste mogućnost terećenja sustava u odnosu na bazno opterećenje koje je inicijalno prikazano u Tablici 6. Korektivna radnja označena br. 0 predstavlja bazni scenarij, što znači da nisu poduzete korektivne mjere.

5.4.3. Prikaz utjecaja sinkronih generatora

Radi usporedbe utjecaja injekcije jalove snage sinkronog generatora u čvoru 1 na stabilnost napona i rangiranja korektivnih radnji u odnosu na utjecaj prethodno razmatranih izvora jalove energije, analizirana su tri scenarija za nepredviđeni događaj br. 7 (ispad dalekovoda 2–3). Jalova snaga koju proizvodi sinkroni generator u čvoru 1 povećavana je u koracima po 10 MVar, a rezultati su prikazani u Tablici 10.

Tablica 10: Indikatori stabilnosti napona i rangiranje korektivnih radnji (sinkroni generator) za nepredviđeni događaj br. 7

Oznaka korektivne radnje	Korektivna radnja	$\lambda_{novi}/\lambda_{stari}$ [-]	Mogućnost terećenja ΔP [%] sustava	Mogućnost terećenja ΔQ [MVar] u čvoru 6	PI_V [-]
0	$Q_{SG} = 41$ MVar	1,000	72	71,4	0,399
1	$Q_{SG} = 51$ MVar	1,005	72	72,3	0,327
2	$Q_{SG} = 61$ MVar	1,008	72	72,7	0,283
3	$Q_{SG} = 71$ MVar	1,011	72	72,7	0,242

Prva korektivna radnja predstavlja povećanje proizvodnje jalove snage sinkronog generatora u čvoru 1 za 10 MVar što odgovara scenariju kada jedan od sustava modeliranih u čvorovima 5, 8 ili 11 proizvodi isti iznos jalove snage. Rezultati simulacije u Tablici 10 pokazuju kako povećanje injekcije jalove snage u čvoru 1 malo poboljšava indikator stabilnosti napona ($\lambda_{novi}/\lambda_{stari}$) i pruža mogućnost povećanja jalovog opterećenja u čvoru br. 6 koji je u ovom nepredviđenom događaju detektiran kao kritičan u smislu stabilnosti napona. Indeks uspješnosti temeljen na naponu se smanjio jer su se i odstupanja napona u analiziranom sustavu smanjila uslijed većeg injektiranja jalove snage u čvor 1. Ukupna radna snaga opterećenja analiziranog sustava ostala je nepromijenjena. U preostala dva slučaja proizvodnja jalove snage u čvoru 1 dodatno je povećavana u koracima po 10 MVar. Rezultati simulacija vrlo malo se razlikuju u odnosu na prvi razmatrani slučaj, što ukazuje na neučinkovitost razmatrane protumjere za ublažavanje nestabilnosti napona u usporedbi s prethodnim razmatranim korektivnim mjerama. Ovi rezultati su očekivani s obzirom na električku udaljenost čvora 1 od kritičnog čvora 6.

5.4.4. Prikaz utjecaja regulacijskih transformatora

Analizirani su različiti scenarij djelovanja transformatora opremljenih regulacijskim sklopkama koje rade pod opterećenjem radi vrednovanja mogućnosti njihovog doprinosa poboljšanju stabilnosti napona.

U prvom scenariju simuliran je utjecaj blokiranja rada regulacijskih sklopki i fiksiranje istih u srednjem položaju. Drugi scenarij simulira blokadu rada regulacijskih sklopki u položaju neposredno prije nastanka N-1 nepredviđenog događaja. Izračunati su odgovarajući pokazatelji, a rezultati su prikazani u Tablici 11.

Rezultati prikazani u Tablici 11 pokazuju kako provedene korektivne radnje malo povećavaju stabilnost napona i udaljavaju radnu točku sustava od granice stabilnosti napona u smislu mogućnosti povećanja radnog i jalovog opterećenja. Analizom indeksa uspješnosti temeljenog na naponu PI_V za ove korektivne radnje, i sa PI_V indeksom za scenarije koji uključuju korektivne mjere sa izvorima jalove snage električno blizu kritičnom području EES-a, može se zaključiti kako potonji u smislu stabilnosti napona predstavljaju bolji izbor za operatera sustava.

Tablica 11: Indikatori stabilnosti napona i rangiranje korektivnih radnji (manipulacije regulacijskim sklopkama koje rade pod opterećenjem) za nepredviđeni događaj br. 7

Oznaka korektivne radnje	Korektivna radnja	$\lambda_{novi}/\lambda_{stari}$ [-]	Mogućnost terećenja ΔP [%] sustava	Mogućnost terećenja ΔQ [MVar] u čvoru 6	PI_V [-]
0	Regulacijske sklopke u automatskom režimu rada	1,000	72	71,4	0,399
1	Regulacijske sklopke blokirane u srednjem položaju	1,003	86	77,0	0,302
2	Regulacijske sklopke u položaju prije nastanka N-1 nepredviđenog događaja	1,003	81	75,5	0,378

5.4.5. Prikaz utjecaja modeliranja električnog opterećenja

Utjecaj načina modeliranja opterećenja uz variranje komponenti parametara *ZIP* opterećenja analiziran je simulacijama koje su izvedene za osnovni scenarij i za nepredviđeni događaj br. 7, a rezultati su prikazani u Tablici 12. Izvršene su varijacije parametara *ZIP* modela za čvor br. 6 koji je u ovom nepredviđenom događaju detektiran kao kritičan u smislu stabilnosti napona.

Rezultati prikazani u Tablici 12 pokazuju značajan utjecaj sastava opterećenja na stabilnost napona. Simulacije provedene s opterećenjima koja su modelirana kao konstantna impedancija (samo parametar *Z* opterećenja) pokazale su najveću otpornost na probleme stabilnosti napona. Simulacije provedene s opterećenjem modeliranim kao konstantna snaga (samo parametar *P* opterećenja) rezultirale su znatno nepovoljnijim uvjetima.

Tablica 12: Indikatori naponske stabilnosti za različite vrste opterećenja priključene u čvor 6

Scenarij	Parametri ZIP modela opterećenja	λ_{min} [-]	Mogućnost terećenja ΔP [%] sustava	Mogućnost terećenja ΔQ [MVar] u čvoru 6	$U - Q_{max.}$ [%/MVar] u čvoru br.
0 (osnovni scenarij)	P _{ZIP} : 33% / 33 % / 33 % Q _{ZIP} : 33% / 33 % / 33 %	0,414	>87	>87,5	0,17
	P _{ZIP} : 50% / 0 % / 50 % Q _{ZIP} : 50% / 0 % / 50 %	0,414	>87	>87,5	0,17
	P _{ZIP} : 0% / 0 % / 100 % Q _{ZIP} : 0% / 0 % / 100 %	0,407	>85	>86,9	0,17
	P _{ZIP} : 100% / 0 % / 0 % Q _{ZIP} : 100% / 0 % / 0 %	0,421	>88	>88,0	0,16
1 (nepredviđeni događaj br. 7)	P _{ZIP} : 33% / 33 % / 33 % Q _{ZIP} : 33% / 33 % / 33 %	0,365	>72	>71,3	0,20
	P _{ZIP} : 50% / 0 % / 50 % Q _{ZIP} : 50% / 0 % / 50 %	0,364	>72	>71,3	0,19
	P _{ZIP} : 0% / 0 % / 100 % Q _{ZIP} : 0% / 0 % / 100 %	0,357	>71	>70,6	0,20
	P _{ZIP} : 100% / 0 % / 0 % Q _{ZIP} : 100% / 0 % / 0 %	0,372	>74	>71,8	0,19

6. MODEL ZA IZRADU BAZE SINTETIČKIH PODATAKA ZA TRENIRANJE NEURONSKE MREŽE

Problem osmišljavanja modela složenog električnog opterećenja sustava, u fizikalnom obliku koji je najbliži stvarnom stanju (prikazanom na Slici 23), moguće je, kako je prethodno navedeno u 4. poglavlju, raščlaniti na dva dijela:

- odabir modela opterećenja koji sadrži statičku i dinamičku komponentu,
- određivanje postotka statičke i dinamičke komponente odabranog modela.

Usporedba modeliranja električnog opterećenja koje je bazirano na komponentama (znanju) sa modeliranjem električnog opterećenja baziranom na mjerenu (ponašanju), pokazuje kako obje metode imaju određene prednosti i nedostatke.

Struktura potrošnje Distribucijskog područja (DP) Elektra Karlovac HEP Operatora distribucijskog sustava d.o.o. (HEP ODS) za 2022. godinu [74] prikazana je u Tablici 13. Iz podataka u tablici vidljiv je udio potrošnje pojedinih kategorija priključenih potrošača na srednjem i na niskom naponu. Podaci o strukturi priključenih potrošača nisu dostupni.

DP Elektra Karlovac povezana je sa prijenosnom mrežom Hrvatskog operatora prijenosnog sustava d.d. (HOPS) u 5 čvorova elektroenergetskog sustava. Radi se o trafostanicama prijenosnog omjera 110/35 kV i 110/20 kV, u zajedničkom vlasništvu i nadležnosti HOPS-a i HEP ODS-a. HOPS nema podatke o strukturi potrošača koji su priključeni na SN mrežu gore spomenutih trafostanica, niti prakticira slanje upitnika o strukturi potrošača. Slična je situacija i sa preostalim 20 Distribucijskih područja HEP ODS-a, te sa ostalim energetske subjektima koji dijele zajedničke elektroenergetske objekte sa HOPS-om. Postojeća zakonska regulativa koja obrađuje područje elektroenergetike ne predviđa obvezu dostave podataka o potrošačima operatoru prijenosnog sustava. Uvažavajući navedeno, vidi se kako modeliranje opterećenja bazirano na komponentama nema praktičnu primjenu u vođenju EES-a Republike Hrvatske.

Drugi način modeliranja – modeliranje električnog opterećenja bazirano na mjerenu – teoretski je lakše primjenjiv, i precizniji je u fizikalnom smislu jer bilježi stvarne fizikalne veličine. Današnji elektroenergetski objekti u pravilu su opremljeni suvremenim uređajima koji imaju mogućnost snimanja kvarova i poremećaja unutar EES-a, te odgovarajućih dinamičkih odziva priključenih opterećenja. Problem primjene ovog načina modeliranja opterećenja je dostupnost

relativno malog broja zapisa kvarova i poremećaja. To se naročito odnosi na kvarove koji zahvaćaju dvije ili tri faze, te uzrokuju značajan pad napona u zahvaćenim fazama i izazivaju odgovarajući dinamički odziv priključenog opterećenja. Interes svakog elektroenergetskog subjekta je svođenje broja kvarova na najmanju moguću mjeru, pa je relativno mali broj kvarova posljedica takvih nastojanja elektroenergetskih subjekata (radi se o provedbi što kvalitetnijeg preventivnog održavanja opreme u njihovom vlasništvu i nadležnosti).

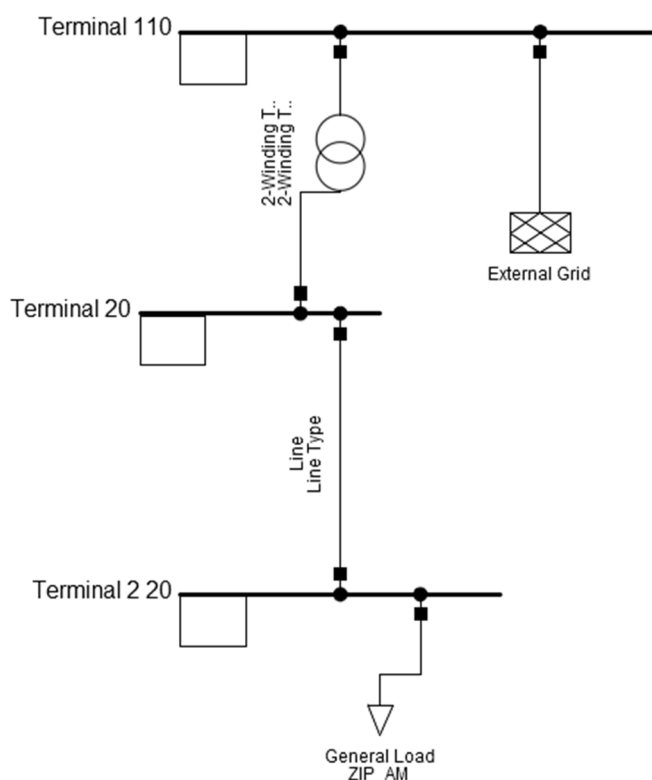
Zapisi kvarova i poremećaja operatoru prijenosnog sustava uglavnom su dostupni na zahtjev, ali svejedno ostaje problem malog broja (statistički cca 15 – 20 % od ukupnog broja) višefaznih kvarova unutar EES-a.

Tablica 13: struktura potrošnje električne energije (DP) Elektra Karlovac

Struktura potrošnje DP Elektra Karlovac	Udio (kWh)	Udio (%)
Nabava s mreže prijenosa	484.496.219	
Nabava iz susjednih DP	759.949	
Nabava iz susjednih država	255.127	
Nabava iz elektrana na distribucijskoj mreži	90.428.547	
Nabava za korisnika postrojenja za samoopskrbu	161.687	
Predano susjednim DP	3.350.988	
Predano susjednim državama	0	
Predano u mrežu prijenosa	460.176	
Ukupno nabava	572.290.365	
Gubici električne energije %	8,75%	
Gubici električne energije	50.064.029	
Sveukupno prodaja svim kupcima	522.226.336	
Visoki napon - poduzetništvo (bijeli)	0	
Srednji napon - poduzetništvo (bijeli)	215.331.283	41.23
Niski napon - poduzetništvo (plavi)	4.841.280	
Niski napon - poduzetništvo (bijeli)	34.400.482	
Niski napon - poduzetništvo (crveni)	62.905.879	
Niski napon - poduzetništvo (žuti - javna rasvjeta)	13.504.496	
Ukupno NN poduzetništvo	115.652.137	22.15
Sveukupno poduzetništvo	330.983.420	63.38
Niski napon - kućanstvo (plavi)	46.214.544	
Niski napon - kućanstvo (bijeli)	144.618.042	
Niski napon - kućanstvo (crveni)	410.330	
Niski napon - kućanstvo (crni)	0	
Ukupno kućanstvo	191.242.916	36.62

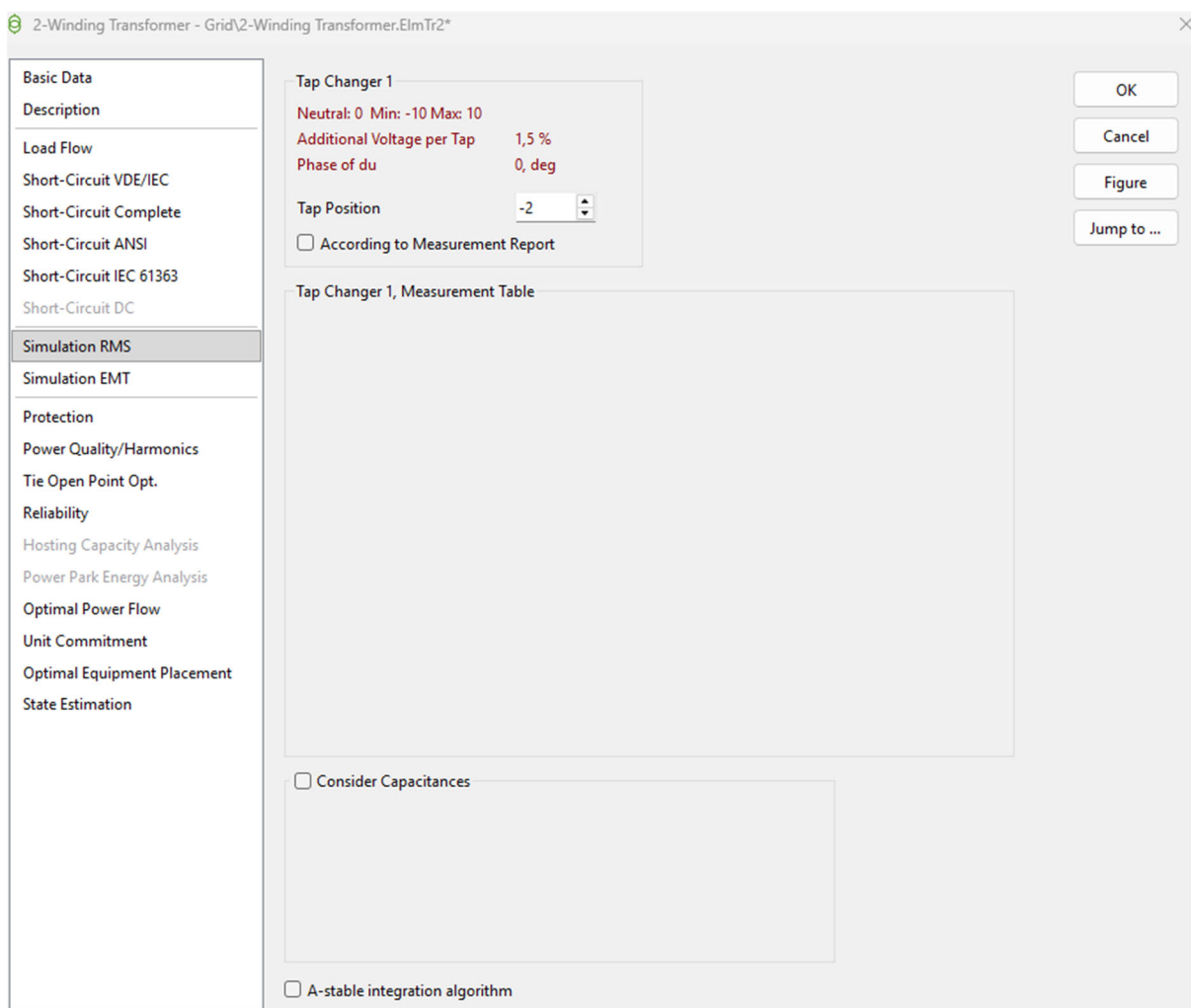
Uvažavajući prethodno navedene poteškoće dvaju najzastupljenijih načina modeliranja električnog opterećenja u praksi, osmišljen je novi način modeliranja električnog opterećenja. U programskom paketu za analizu rada elektroenergetskog sustava *PowerFactory* [75] izrađen je model sa svrhom stvaranja baze sintetičkih podataka različitih stanja opterećenja EES-a za treniranje neuronske mreže, pomoću koje će se određivati statički i dinamički parametri električnog opterećenja. Model, prikazan na Slici 30, identičan je modelima električnog opterećenja koji su opisani u poglavljima 4.2. i 4.3., a sastoji se od:

- ekvivalentne 110 kV mreže,
- VN 110 kV sabirnice,
- SN 20 kV sabirnica,
- regulacijskog transformatora prijenosnog omjera 110/20 kV čiji su VN i SN izvodi priključeni na VN, odnosno SN sabirnicu,
- SN odvoda,
- opterećenja.



Slika 30: model za stvaranje baze sintetičkih podataka različitih stanja opterećenja EES-a za treniranje neuronske mreže

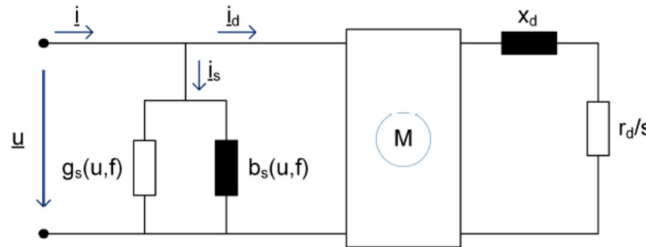
Regulacijski transformator i priključeno opterećenje predstavljaju ključne dijelove ovog modela za određivanje parametara električnog opterećenja. Ostali elementi modela (ekvivalent 110 kV mreže i 20 kV dalekovod koji povezuje sabirnice oznaka *Terminal 20* i *Terminal 2 20*) modelirani su tipskim podacima. Transformator prijenosnog omjera $110\pm 10 \times 1,5\%/20$ kV modeliran je sa regulacijskom sklopkom koja radi pod opterećenjem i ima 21 položaj. Na Slici 31 prikazan je prozor programskog paketa *PowerFactory* u kojem su vidljivi parametri regulacijske sklopke.



Slika 31: prozor programskog paketa za analizu rada EES-a – parametri transformatora

Priključeno opterećenje modelirano je odabirom kompleksnog modela opterećenja koji je prikazan na Slici 32. Model se sastoji od statičke komponente, te dinamičke komponente koju predstavlja asinkroni motor. Ovakav model u fizikalnom smislu odgovara modelu prikazanom na Slici 23. Ovisnost vodljivosti g_s i susceptancije b_s statičke komponente opterećenja o

frekvenciji se zanemaruje i smatra se kako su navedeni parametri ovisno isključivo o naponu. Isto vrijedi i za parametre dinamičke komponente opterećenja.



Slika 32: kompleksni model opterećenja u programskom paketu za analizu rada EES-a

Modeliranje električnog opterećenja u programskom paketu *PowerFactory* omogućava sljedeće:

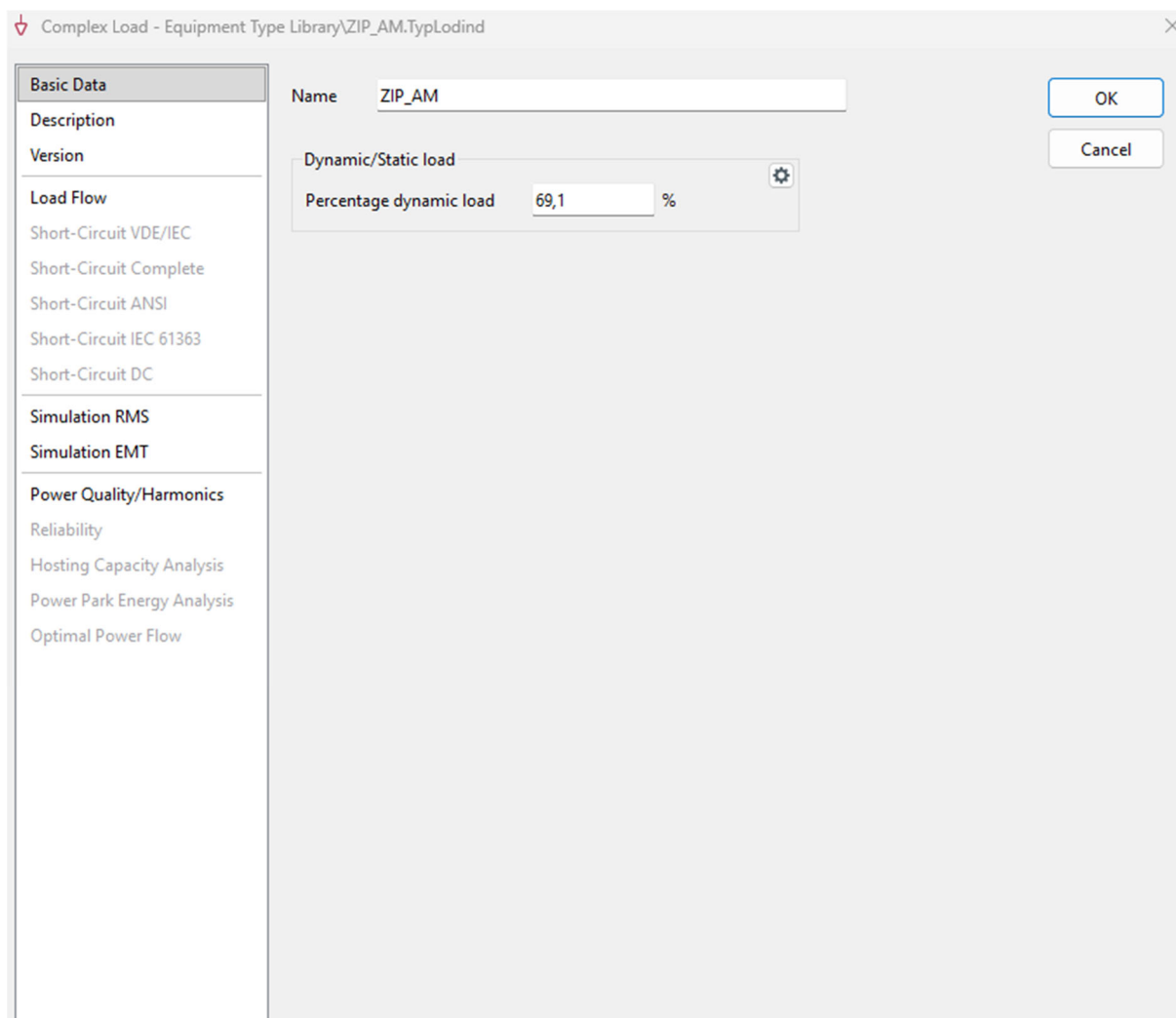
- modeliranje postotka udjela dinamičke komponente opterećenja u ukupnom opterećenju,
- modeliranje koeficijenata a_P , b_P i c_P radne komponente statičkog dijela opterećenja P ,
- modeliranje koeficijenata a_Q , b_Q i c_Q jalove komponente statičkog dijela opterećenja Q ,
- modeliranje postotka klizanja s_{cr} asinkronog motora pri maksimalnom (prekretnom) elektromagnetskom momentu T_e ,
- modeliranje postotka klizanja s_0 asinkronog motora u uvjetima ravnoteže elektromagnetskog momenta T_e i mehaničkog momenta T_m ,
- modeliranje eksponenta t_{m1} mehaničkog momenta asinkronog motora T_m ,
- modeliranje vremenske konstante inercije T_j u [s].

Prozori u kojima se modelira električno opterećenja prikazani su na Slici 33 i na Slici 34. Unutar programskog paketa *PowerFactory* kutna akceleracija asinkronog motora u vremenu računa se izrazom

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{xm_e - xm_t}{T_j} \quad (35)$$

gdje je

- xm_t – jedinična vrijednost mehaničkog momenta asinkronog stroja,
- xm_e – jedinična vrijednost elektromagnetskog momenta asinkronog stroja,
- T_j – vremenska konstanta inercije u [s].



Slika 33: modeliranje postotnog udjela dinamičke komponente električnog opterećenja

Mehanički moment asinkronog motora računa se izrazom

$$xm_t = xm_{t_0} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{t_{m1}} \quad (36)$$

gdje je

- xm_{t_0} – inicijalni mehanički moment,
- ω_0 – brzina pri kojoj je mehanički moment asinkronog motora T_m jednak elektromagnetskom momentu T_e ,
- t_{m1} – eksponent mehaničkog momenta.

Complex Load - Equipment Type Library\ZIP_AM.TypLodind

Basic Data
Description
Version
Load Flow
Short-Circuit VDE/IEC
Short-Circuit Complete
Short-Circuit ANSI
Short-Circuit IEC 61363
Short-Circuit DC
Simulation RMS
Simulation EMT
Power Quality/Harmonics
Reliability
Hosting Capacity Analysis
Power Park Energy Analysis
Optimal Power Flow

General Advanced

Static voltage dependence P

Coefficient aP	0.6436	Exponent e_aP	2.
Coefficient bP	0.3449	Exponent e_bP	1.
Coefficient cP	0.0115	Exponent e_cP	0.

Static voltage dependence Q

Coefficient aQ	0.6436	Exponent e_aQ	2.
Coefficient bQ	0.3449	Exponent e_bQ	1.
Coefficient cQ	0.0115	Exponent e_cQ	0.

Static frequency dependence

Frequency dependence on P	0.
Frequency dependence on Q	0.

Dynamic part

Critical slip	5.6	%
Normal operating slip	3.5	%
Mechanical torque exponent	2.8	
Inertia time constant	4.1	s

Voltage limits

Upper voltage limit	1.2	p.u.
Lower voltage limit	0.8	p.u.

OK Cancel

Slika 34: modeliranje parametara statičke i dinamičke komponente električnog opterećenja

U stanju ravnoteže elektromagnetskog i mehaničkog momenta asinkronog motora vrijedi izraz

$$xm_t = -xm_e \quad (37)$$

Ovi izrazi odgovaraju teoriji asinkronog stroja prikazanoj u [1] koja razliku elektromagnetskog i mehaničkog momenta definira izrazom

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} = J \frac{d^2\Theta}{dt^2} \quad (38)$$

gdje je:

- ω_m – kutna brzina rotora u $\left[\frac{rad}{s}\right]$,
- J – vremenska konstanta inercije rotora i priključenog opterećenja u [s].

Mehanički moment varira sa promjenom brzine, i za njega vrijedi izraz

$$T_m = T_0(\omega_r)^m \quad (39)$$

gdje je

- ω_r – brzina rotora izražena u jediničnim vrijednostima sinkrone brzine,
- m – eksponent mehaničkog momenta.

Za odabrani model električnog opterećenja (prikazan na Slici 32) će se primijeniti novi način modeliranja njegovih parametara, a ti parametri su:

- postotak udjela komponente konstantne impedancije statičkog dijela opterećenja, koji će se nadalje označavati oznakom Z ,
- postotak udjela komponente konstantne struje statičkog dijela opterećenja, koji će se nadalje označavati oznakom I ,
- postotak udjela komponente konstantne snage statičkog dijela opterećenja, koji će se nadalje označavati oznakom P ,
- postotak udjela dinamičke komponente opterećenja u ukupnom opterećenju, koji će se nadalje označavati oznakom AM ,
- eksponent mehaničkog momenta T_m asinkronog motora, koji će se nadalje označavati oznakom t_{m1} ,
- vremenska konstanta inercije asinkronog motora, koja će se nadalje (u skladu sa oznakom koja se koristi u odabranom programskom paketu) označavati oznakom T_j ,
- postotna vrijednost klizanja pri maksimalnom/prekretnom elektromagnetskom momentu T_e asinkronog motora, koje će se nadalje označavati oznakom s_{cr} ,
- postotna vrijednost klizanja u uvjetima ravnoteže elektromagnetskog momenta T_e i mehaničkog momenta T_m asinkronog motora, koje će se nadalje označavati oznakom s_0 .

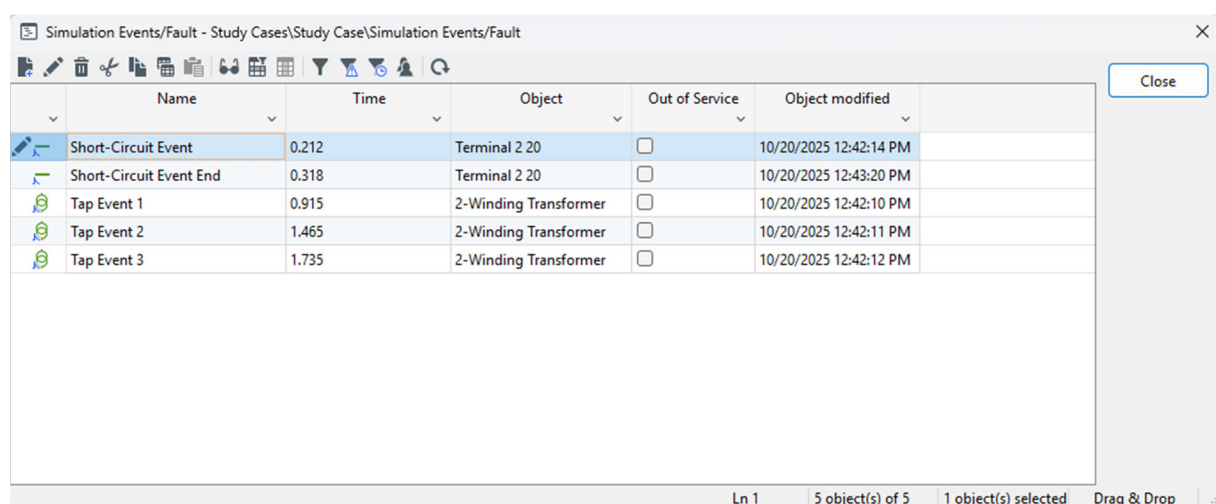
Na sabirnici oznake *Terminal 2 20*, na Slici 30, pomoću programskog paketa *PowerFactory* primijenjeno je 30 000 simulacija poremećaja u mreži tijekom kojih su mijenjane vrijednosti parametara opterećenja. Svaka simulacija sastojala se od trolnog kvara nakon kojeg je slijedila manipulacija regulacijskom sklopkom transformatora po principu „jedan položaj više – dva položaja niže“.

Simulacija poremećaja sastoji se, dakle, od dva dijela: prvog u kojem je model podvrgnut vrlo velikom propadu napona i drugog, prilikom kojeg dolazi do vrlo male promjene napona. Svrha primjene ovakvih simulacija, koje uzrokuju simetrične propade napona bitno različitih amplituda (od maksimalnih do minimalnih) u modeliranom sustavu, bila je osigurati što kvalitetnije ulazne podatke za trening neuronske mreže kako bi mreža uspjela naučiti obrasce i za male oscilacije, i za prijelaznu stabilnost, u skladu sa klasifikacijom poremećaja [33] koja je prikazana na Slici 2.

Simulacija poremećaja sastoji se od sljedećih segmenata:

- normalno pogonsko stanje, bez kvara (uz pogonske struje i napone) u intervalu od 0,1 s do 0,3 s,
- trolezni kratki spoj na sabirnici oznake *Terminal 2 20* u intervalu od 0,07 s do 0,22 s,
- normalno pogonsko stanje, u intervalu od 0,1 s do 0,9 s,
- nalog „više“ regulacijskoj sklopki transformatora,
- normalno pogonsko stanje, u intervalu od 0,1 s do 0,7 s,
- nalog „niže“ regulacijskoj sklopki transformatora,
- normalno pogonsko stanje, u intervalu od 0,1 s do 0,6 s,
- nalog „niže“ regulacijskoj sklopki transformatora.

Prozor simulacije gore opisanog poremećaja u programskom paketu *PowerFactory* prikazan je na Slici 35.



The screenshot shows the 'Simulation Events/Fault' window in PowerFactory. It contains a table with the following data:

	Name	Time	Object	Out of Service	Object modified
	Short-Circuit Event	0.212	Terminal 2 20	☐	10/20/2025 12:42:14 PM
	Short-Circuit Event End	0.318	Terminal 2 20	☐	10/20/2025 12:43:20 PM
	Tap Event 1	0.915	2-Winding Transformer	☐	10/20/2025 12:42:10 PM
	Tap Event 2	1.465	2-Winding Transformer	☐	10/20/2025 12:42:11 PM
	Tap Event 3	1.735	2-Winding Transformer	☐	10/20/2025 12:42:12 PM

At the bottom of the window, the status bar shows: Ln 1, 5 object(s) of 5, 1 object(s) selected, Drag & Drop.

Slika 35: Prozor simulacije poremećaja u programskom paketu PowerFactory

Python skripta unutar programskog paketa *PowerFactory* nasumice bira vremena trajanja pojedinog segmenta i bilježi sljedeće podatke:

- radnu [MW] i jalovu [MVAr] komponentu snage opterećenja priključenog na sabirnici *Terminal 2 20*,
- fazne struje [kA],
- fazne napone [kV].

Ovi podaci (radna i jalova komponenta snage opterećenja, odzivi struja i napona u obliku vremenskih nizova) služe kao ulaz za neuronsku mrežu.

Intervali trajanja pojedinih segmenata odabrani su na osnovu podataka o stvarnim tropolnim kvarovima i stvarnom radu regulacijske sklopke, što će biti detaljnije opisano u 8. poglavlju.

Vrijednosti parametara opterećenja mijenjaju se na sljedeći način:

- iznos AM nasumice se postavlja,
- s_{cr} se mijenja u rasponu od 5 % do 15 %, s korakom od 0,1,
- s_0 se mijenja u rasponu od 0,5 % do 5 %, s korakom od 0,1,
- t_{m1} se mijenja u rasponu od 2 do 5, s korakom od 1,
- T_j se mijenja u rasponu od 0,5 s do 5 s, s korakom od 1,
- Z i I se nasumice generiraju u intervalu od 0 do 1, a P se izračunava kao razlika od zbroja Z i I do iznosa 1.

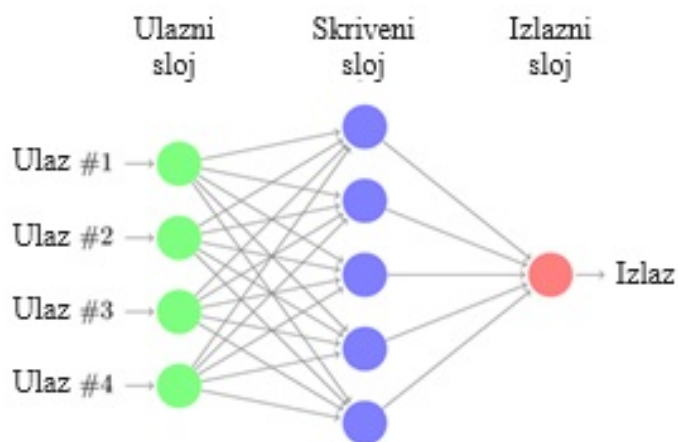
Python skripta nasumice varira vrijednosti parametara opterećenja tijekom trajanja gore opisanih simulacija i bilježi ih. Ovi podaci (parametri modela električnog opterećenja) predstavljaju ciljane vrijednosti za neuronsku mrežu.

7. METODA ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA MODELA ELEKTRIČNOG OPTEREĆENJA TEMELJENA NA NEURONSKIM MREŽAMA

7.1. Neuronske mreže

Neuronske mreže čini skup algoritama koji su inspirirani funkcioniranjem ljudskog mozga. Sve što čovjek vidi vlastitim očima može se smatrati podacima koje obrađuju neuroni (ćelije za obradu podataka) njegovog mozga. Neuroni na taj način prepoznaju što se događa u čovjekovom okruženju. Neuronske mreže funkcioniraju na sličnom principu: uzimaju veliku količinu podataka, obrađuju ih tako što iz podataka izvlače uzorke, i određuju o čemu se točno radi.

Neuronske mreže sastoje se od velikog broja međusobno dobro povezanih procesnih elemenata (neurona) koji zajedno rade u cilju rješavanja određenog problema. Imaju sposobnost učenja, pa se konfiguriraju za specifične primjene, poput prepoznavanja uzoraka [76], klasifikacije podataka, prepoznavanja fotografije ili glasa i sl., tijekom procesa učenja. Mogu pronaći uzorke i otkriti trendove koji su previše složeni da bi ih uočio čovjek, pa čak i određeni postojeći računalni algoritmi [77]. Trenirana neuronska mreža može se smatrati „ekspertom“ u kategoriji informacija koju je analizirala.



Slika 36: Neuronska mreža sa ulaznim, skrivenim i izlaznim slojem

Ovakva mreža, prikazana na Slici 36, naziva se još i umjetna neuronska mreža (engl. *Artificial Neuron Network – ANN*). Sastoji se od tri grupe (sloja):

- ulazni sloj – ulazne jedinice primaju informacije,
- skriveni sloj – aktivnost svake skrivene jedinice ovog sloja određena je aktivnostima ulaznih jedinica i težinskim faktorima veza ulaznih jedinica sa jedinicama skrivenog sloja,
- izlazni sloj – ponašanje jedinica izlaznog sloja ovisi o težinskim faktorima veza jedinica skrivenog sloja i izlaznih jedinica.

Neuron predstavlja osnovnu jedinicu neuronske mreže, a još se naziva i čvorom (engl. *node*). Neuron prima ulaze iz drugih neurona ili iz vanjskih izvora pa, na osnovu toga, računa izlazne vrijednosti. Svaki ulaz ima težinski faktor koji mu je pridijeljen na osnovu njegove relativne važnosti u odnosu na ostale ulaze. Izlazna vrijednost neurona računa se pomoću nelinearne aktivacijske funkcije. Svrha ove aktivacijske funkcije je uvođenje nelinearnosti u izlaz neurona što je važno zbog činjenice da je većina fizikalnih pojava, kao i podataka koje ih opisuju, nelinearnog karaktera, a neuronska mreža treba naučiti stvarno ponašanje fizikalnih parametara koji su predmet proučavanja.

7.2. Mreže dugotrajne kratkoročne memorije

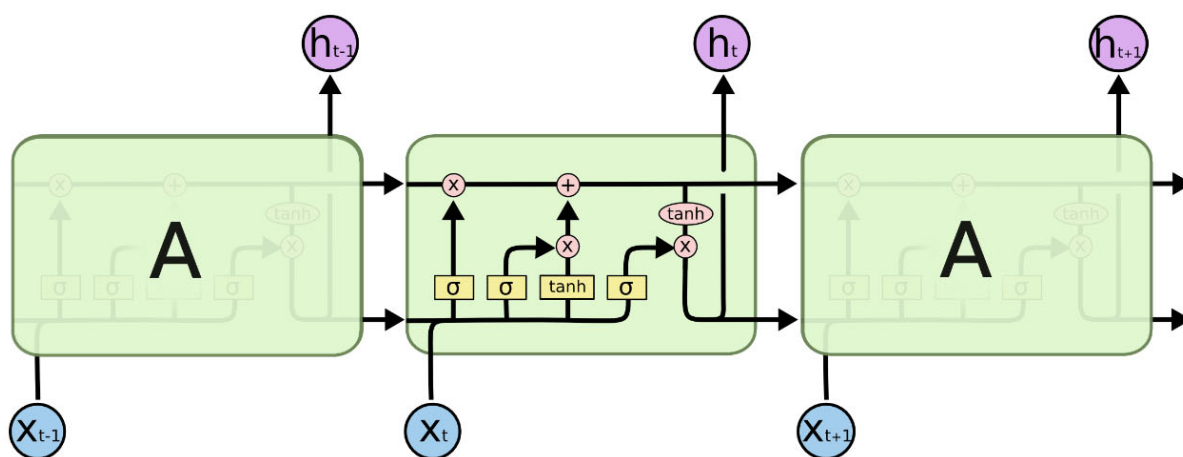
Mreže dugotrajne kratkoročne memorije (engl. *long short-term memory – LSTM*) dizajnirane su za obradu podataka vremenskih serija, s mogućnošću prepoznavanja i učenja dugoročnih i kratkoročnih trendova u podacima. Radi se o specijaliziranom tipu rekurentnih neuronskih mreža (engl. *recurrent neural network – RNN*), posebno dizajniranim za učenje dugoročnih zavisnosti u sekvencijalnim podacima [78] što ih čini idealnima za zadatke poput predviđanja vremenskih serija.

Za razliku od RNN-ova koji koriste jedno skriveno stanje koje prolazi kroz vrijeme [79], LSTM-ovi uvode memorijsku ćeliju koja pohranjuje informacije tijekom duljih razdoblja, i na taj način omogućavaju učenje dugoročnih ovisnosti.

Za potrebe određivanja parametara električnog opterećenja, LSTM mreže koriste se za analizu odziva faznih struja i napona u obliku vremenskih nizova.

Arhitektura LSTM mreže prikazana je na Slici 37. Sastoji se od memorijskih ćelija, a svaka od njih sadrži tri različita tipa vrata (ulaza):

- ulazna vrata koja kontroliraju dotok informacija u memorijsku ćeliju,
- vrata zaborava koja određuju koje se informacije uklanjaju iz memorijske ćelije,
- izlazna vrata koja kontroliraju odljev informacija iz memorijske ćelije [80].



Slika 37: Arhitektura LSTM mreže [80]

Zahvaljujući ovim vratima, LSTM može selektivno zadržati ili odbaciti informacije koje teku kroz mrežu, i na taj način učiti i zadržati dugoročne zavisnosti unutar sekvencijalnih podataka [81].

LSTM mreža ima skriveno stanje koje predstavlja njenu kratkoročnu memoriju. Ova memorija ažurira se korištenjem trenutnog ulaza, prethodnog skrivenog stanja i trenutnog stanja memorijske ćelije.

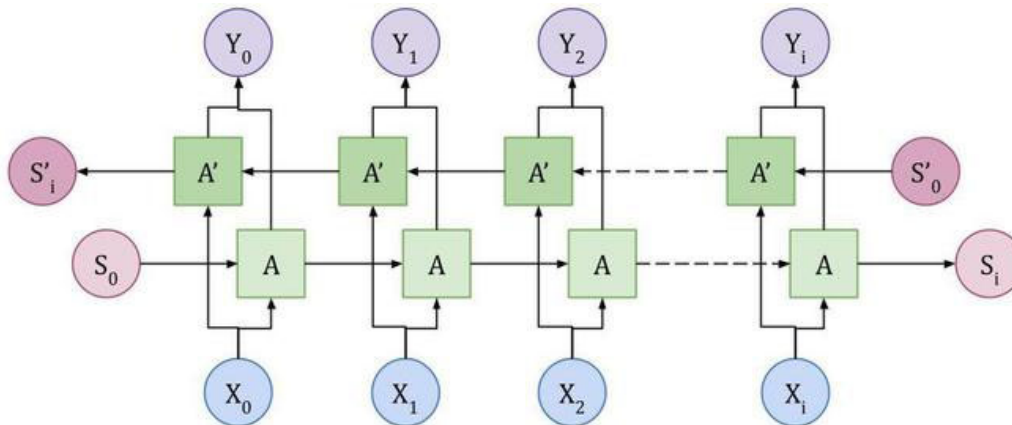
Treniranje LSTM-a obuhvaća metode poput propagacije unazad kroz vrijeme i optimizacije gradijentnog spusta čiji je cilj minimiziranje greške predviđanja [82]. Ove metode omogućavaju modelu identifikaciju i razumijevanje složenih vremenskih uzoraka i međuzavisnosti podataka, što je ključno za analizu odziva faznih struja i napona u obliku vremenskih nizova.

7.3. Mreže dvosmjerne dugotrajne kratkoročne memorije

Mreže dvosmjerne dugotrajne kratkoročne memorije (engl. *bidirectional long short-term memory* – BiLSTM) [83] predstavljaju prošireni oblik LSTM mreža. Za razliku od konvencionalnih LSTM-ova koji obrađuju sekvence samo u jednom smjeru, BiLSTM-ovi dozvoljavaju protok informacija u oba smjera (i naprijed i natrag), što im omogućuje prikupljanje i bilježenje više kontekstualnih informacija. To BiLSTM-ove čini posebno učinkovitima za zadatke u kojima je ključno razumijevanje prošlog i budućeg konteksta.

Arhitektura BiLSTM mreže prikazana je na Slici 38. Sastoji se od dva odvojena LSTM sloja:

- LSTM naprijed (memorijska ćelija oznake A) koji obrađuje sekvencu od početka do kraja,
- LSTM natrag (memorijska ćelija oznake A') koji obrađuje sekvencu od kraja do početka.



Slika 38: Arhitektura BiLSTM mreže

Izlazi oba LSTM-a nakon toga se kombiniraju radi formiranja konačnog izlaza. Konačni izlaz u trenutku t matematički se prikazuje izrazom

$$p_t = p_{t_f} + p_{t_b} \quad (40)$$

gdje je

- p_t – konačni vektor vjerojatnosti mreže,
- p_{t_f} – vektor vjerojatnosti iz LSTM mreže prema naprijed,
- p_{t_b} – vektor vjerojatnosti iz LSTM mreže prema natrag.

7.4. Priprema ulaznih podataka

Programski paket *PowerFactory* ima mogućnost skriptiranja u programskom jeziku otvorenog koda *Python*. *Python* se unutar programskog paketa *PowerFactory* može koristiti za:

- automatizaciju zadataka,
- stvaranje korisnički definiranih naredbi za proračune,
- integraciju programskog paketa *PowerFactory* sa drugim softverima.

Kako je navedeno u Poglavlju 6, na sabirnici oznake *Terminal 2 20* (model na Slici 30), pomoću programskog paketa *PowerFactory* primijenjeno je 30 000 simulacija tijekom kojih su mijenjane vrijednosti parametara opterećenja. Rezultati simulacija zabilježeni su u obliku *.csv (engl. *comma-separated values*) datoteka. Ova vrsta zapisa predstavlja tekstualni format za pohranu tabličnih podataka u kojem su vrijednosti odvojene zarezima (ili drugim separatorima poput točke-zareza). Zbog jednostavnosti i kompatibilnosti s različitim softverima, uključujući i programski jezik *Python*, ova vrsta zapisa ima široku primjenu.

Numpy je opći programski paket za obradu nizova (engl. *arrays*), a ujedno predstavlja temeljni paket za znanstveno računanje s programskim jezikom *Python*. Pruža visokoučinkovite višedimenzionalne objekte nizova i alate za rad s tim nizovima, a također se može koristiti kao učinkovit višedimenzionalni spremnik generičkih podataka.

Svaki *Numpy* niz je tablica elemenata (obično brojeva) istog tipa, indeksirana skupom pozitivnih cijelih brojeva. *Numpy* nizovi u programskom jeziku *Python* pohranjuju se u obliku *.npy zapisa. Ovaj zapis je u binarnom formatu i omogućuje brzo učitavanje i spremanje podataka, bez gubitka informacija o tipu podataka i obliku niza. *NumPy* biblioteka koristi ovaj format zapisa.

Python skripta u sklopu programskog paketa *PowerFactory* koristi se za pretvaranje *.csv zapisa u *.npy zapis. Pomoću ovog programskog paketa svih 30 000 zapisa simulacija, pojedinačno spremljenih u obliku *.csv zapisa, pretvoreno je u jednu *.npy datoteku u kojoj se odabiru ulazni i izlazni podatci, te se radi predobrada podataka za trening neuronske mreže. Parametri su u ovu datoteku spremljeni strukturalno, na način da je svaki stupac u matrici pridružen određenom parametru.

Predobrada podataka ključan je korak u strojnome učenju i analizi podataka, koji osigurava čistoću, konzistentnost i spremnost podataka za ulazak u model. Predobradom se poboljšava kvaliteta podataka, a performanse algoritama strojnog učenja se optimiziraju. Proces predobrade podataka uključuje:

1. Prikupljanje i integraciju podataka – spajanje podataka iz različitih izvora u jedinstveni skup podataka.
2. Čišćenje podataka – uklanjanje ili zamjenu vrijednosti koje nedostaju, uklanjanje podataka koji se ponavljaju, te ispravljanje pogrešnih ili nepravilnih vrijednosti.
3. Transformaciju podataka – skaliranje numeričkih vrijednosti, kodiranje kategorijskih varijabli i primjenu logaritamskih ili drugih matematičkih transformacija za poboljšanje raspodjele podataka.
4. Redukciju dimenzionalnosti – korištenje tehnika poput analize glavnih komponenti (engl. - *principal component analysis* – PCA) za smanjenje broja značajki i poboljšanje učinkovitosti modela.
5. Dijeljenje skupa podataka – razdvajanje podataka na skup za treniranje, validaciju i testiranje kako bi se osigurala pravilna generalizacija modela.

Predobrada podataka temeljni je dio analitičkih i prediktivnih sustava jer osigurava bolje rezultate i stabilnije modele strojnog učenja. Bez pravilne predobrade, mogu se pojaviti problemi poput prekomjernog učenja (engl. *overfitting*), loše konvergencije i pogrešnih zaključaka modela.

7.5. Određivanje parametara modela električnog opterećenja

7.5.1. Baza podataka za trening mreže

Baza učitanih podataka ima sljedeći oblik

X: (30000, 290, 8)

Y: (30000, 8)

X su ulazne vrijednosti, a Y su ciljane vrijednosti. Ulazne vrijednosti su 30 000 ranije opisanih simulacija, od kojih je svaka duga 290 vremenskih koraka, te ima 8 značajki koje se spremaju:

- radna [MW] i jalova [MVar] komponenta snage opterećenja priključenog na sabirnici *Terminal 2 20*,
- fazne struje I_R [kA], I_S [kA] i I_T [kA],
- fazne napone U_R [kV], U_S [kV] i U_T [kV].

Y je 8 ciljanih vrijednosti za svaku od 30 000 simulacija, i to:

- AM – postotak udjela dinamičke komponente opterećenja u ukupnom opterećenju,
- ZIP_Z – postotak udjela komponente konstantne impedancije statičkog dijela opterećenja,
- ZIP_I – postotak udjela komponente konstantne struje statičkog dijela opterećenja,
- ZIP_P – postotak udjela komponente konstantne snage statičkog dijela opterećenja,
- t_{m1} – eksponent mehaničkog momenta T_m asinkronog motora,
- T_j – vremenska konstanta inercije asinkronog motora [s],
- s_{cr} – postotna vrijednost klizanja pri maksimalnom/prekretnom elektromagnetskom momentu T_e asinkronog motora,
- s_0 – postotna vrijednost klizanja u uvjetima ravnoteže elektromagnetskog momenta T_e i mehaničkog momenta T_m asinkronog motora.

Podaci su strukturirani tako da se iz sekvenci ulaznih značajki (X) uči predviđanje odgovarajućih izlaza (Y).

Podaci za treniranje i testiranje neuronske mreže imaju sljedeći oblik:

$X_{train}: (24000, 290, 8) \mid Y_{train}: (24000, 8)$

$X_{test}: (6000, 290, 8) \mid Y_{test}: (6000, 8)$

Trening set čini 80% podataka i koristi se za učenje. Na osnovu ovih primjera neuronska mreža prilagođava svoje težine i poboljšava sposobnost prepoznavanja obrazaca. Testni set čini 20% podataka i koristi se isključivo za provjeru opće sposobnosti mreže, odnosno za provjeru koliko dobro mreža može predvidjeti primjere s kojima se do tada nije susretala. Na ovaj se način osigurava da mreža razvija sposobnost generalizacije, i da izbjegava učenje podataka napamet.

7.5.2. Normalizacija podataka

Normalizacija podataka prije treniranja neuronske mreže važan je korak predobrade u području umjetne inteligencije. Svrha normalizacije podataka je osigurati da su ulazne značajke na sličnoj skali, što značajno poboljšava izvedbu i konvergenciju neuronske mreže. Ulazne značajke – radna [MW] i jalova [MVar] komponenta snage opterećenja, fazne struje [kA] i fazni naponi [kV] – moraju biti u usporedivom rasponu jer se težine i pristranosti u mreži ažuriraju tijekom procesa učenja na temelju ulaznih podataka. Ako ulazne značajke imaju različite skale, mreža može dodijeliti veću važnost značajkama s većim vrijednostima i zanemariti značajke s manjim vrijednostima, što može dovesti do pristranih i netočnih predviđanja.

Normalizacija podataka rješava ovaj problem pretvaranjem ulaznih značajki u standardiziranu ljestvicu. Najčešća tehnika normalizacije naziva se skaliranje značajke, i uključuje oduzimanje srednje vrijednosti značajke i dijeljenje s njenom standardnom devijacijom. Ovaj proces osigurava da značajka ima srednju vrijednost nula i standardnu devijaciju jedan.

Normalizacijom podataka sve ulazne značajke dovode se na sličnu ljestvicu i postaju jednako važnima tijekom procesa obuke, što neuronskoj mreži daje veću učinkovitost i (posljedično) mogućnost boljeg predviđanja. Normalizacija dodatno ubrzava proces obuke poboljšavanjem konvergencije mreže. Kada su ulazne značajke na sličnoj skali, algoritam za optimizaciju spuštanja gradijenta ugađa parametre mreže tako da razlika između predviđanja mreže i stvarnih (očekivanih) vrijednosti mreže (koja se naziva gubitak) bude što je moguće manja, što rezultira bržim konvergiranjem i kraćim vremenom obuke.

Nakon što model izvrši predikciju, njegovi izlazi su još uvijek u normaliziranom obliku pa ih je potrebno vratiti u izvorni (realan i upotrebljiv) oblik kako bi imali fizikalno značenje i mogućnost interpretiranja na odgovarajući način. To se radi pomoću istog skalera koji se koristi u predobradi:

`Y_real = scaler.inverse_transform(Y_pred)`

7.5.3. Metoda gašenja

Metoda gašenja (engl. *dropout*) pojedinih neurona je tehnika sprječavanja pretreniranosti u neuronskim mrežama [84]. Do pretreniranosti dolazi kada model previše precizno nauči obrazac podataka za obuku, što rezultira lošijim performansama na podacima koje model do tada nije vidio. Pretreniranost nastaje u slučajevima kada model ne uspije generalizirati naučene obrasce kako bi bolje predvidio ciljne vrijednosti na novim podacima.

Metoda gašenja pojedinih neurona nasumično deaktivira određeni postotak neurona u svakoj iteraciji tijekom procesa treniranja. Ovo učinkovito mijenja topologiju modela u svakoj iteraciji, stvarajući robusniji model koji bolje generalizira na novim podacima. Primjena metode gašenja pojedinih neurona može rezultirati sporijim postizanjem željene točnosti na podacima za trening, ali je točnost na neviđenim podacima obično značajno veća.

7.5.4. Arhitektura modela

Primijenjen je dvosmjerni rekurentni model s LSTM jedinicama (BiLSTM) [85] u okviru Keras/TensorFlow-a. Tablica 14 prikazuje arhitekturu razvijenog dvosmjernog LSTM modela.

Tablica 14: Arhitektura razvijenog dvosmjernog LSTM modela

Layer (type)	Output Shape	Param #
bidirectional (Bidirectional)	(None, 256)	140288
dropout (Dropout)	(None, 256)	0
dense (Dense)	(None, 128)	32896
dense_1 (Dense)	(None, 8)	1032

Total params: 174,216 (680.53 KB)

Trainable params: 174,216 (680.53 KB)

Non-trainable params: 0 (0.00 B)

Ukupni broj parametara modela iznosi 174216, od čega su svi trenirajući (engl. *trainable*) parametri. Ne postoje netrenirajući (engl. *non-trainable*) parametri.

Odabrana su četiri sloja (engl. *layers*):

1. Bidirectional

Prvi sloj je Bidirectional (LSTM, 128 jedinica, `return_sequences=False`) sa 128 jedinica u smjeru unaprijed i 128 u smjeru unatrag (ukupno 256 neurona u izlazu). Jedan LSTM prolazi slijed unaprijed, a drugi unatrag. Njihovi se izlazi kombiniraju (povezuju) u vektor duljine 256. Dvosmjernost omogućuje iskorištavanje konteksta i iz prošlosti i iz “budućnosti” unutar prozora duljine 290 koraka. Postavka `return_sequences=False` vraća reprezentaciju cijelog slijeda u jednoj sažetoj vektorskoj reprezentaciji (zadnje skriveno stanje), koja je pogodna za završnu regresiju.

2. Dropout

Drugi sloj je Dropout (0,3) regularizacijski sloj kojim se slučajnim gašenjem 30% aktivacija tijekom učenja smanjuje prenaučenosť (engl. *overfitting*). Ovaj sloj svaki put nasumično gasi različitih 30 % aktivacija tijekom treniranja čime se postiže da model nauči robusnije i općenitije uzorke u ulaznim podacima, a ne da se prilagođava samo specifičnim vrijednostima treniranih uzoraka.

3. Dense

Treći sloj je skriveni sloj (Dense, 128 neurona, ReLU aktivacijska funkcija): nelinearna projekcija sažetka slijeda u prikladan prostor značajki za višedimenzionalnu regresiju.

Ovaj sloj je umjetna neuronska mreža (ANN) čiji je ulaz zapravo izlaz iz LSTM-a, a izlaz su mu predikcije 8 parametara (ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P , AM , t_{m1} , T_j , s_{cr} , s_0). LSTM pamti obrasce u vremenskom nizu i daje informacije o obrascima u obliku vektora od 256 brojeva. Dense sloj pretvara ovaj vektor u konkretne tražene parametre.

4. Dense_1

Četvrti sloj je izlazni sloj (Dense, 8 neurona, linearna aktivacijska funkcija) sa linearnom aktivacijom čije su mete kontinuirane realne veličine. Ovaj sloj izravno predviđa 8 ciljanih parametara po uzorku.

Optimizacija se provodi Adam (skraćenica od engl. *Adaptive Moment Estimation*) optimizatorom koji kombinira prednosti tehnika Momentum (ubrzavanje procesa gradijentnog spusta i omogućavanje brže konvergencije algoritma smanjivanjem oscilacija) i RMSprop (prevladavanje problema smanjenja brzine učenja), uz standardnu funkciju gubitka *MSE* (engl. *Mean Square Error* – srednja kvadratna pogreška) za regresijske zadatke. Kao dopunska metrika koristi se *MAE* (engl. *Mean Absolute Error* – srednja apsolutna pogreška) radi lakše interpretacije pogreške u fizikalnim jedinicama.

Srednja kvadratna pogreška *MSE* [86] koristi se za mjerenje prosječne magnitude pogrešaka predviđanja. Daje veću težinu većim pogreškama zbog kvadriranja razlike, što je čini korisnom pri naglašavanju veće pogreške. Izračunava se izrazom

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2 \quad (41)$$

gdje je

- y_i – predviđena vrijednost veličine uzorka,
- x_i – stvarna vrijednost veličine uzorka,
- N – broj uzoraka.

Srednja apsolutna pogreška *MAE* [87] izračunava se kao zbroj apsolutnih pogrešaka podijeljen s veličinom uzorka

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - x_i| \quad (42)$$

gdje je

- y_i – predviđena vrijednost veličine uzorka,
- x_i – stvarna vrijednost veličine uzorka,
- N – broj uzoraka.

Srednja apsolutna pogreška koristi istu skalu kao i podaci koji se razmatraju, te jasno pokazuje točnost modela i njegovu osjetljivost na pojedinačne pogreške.

Za ublažavanje prenaučivosti (engl. *overfitting*) i nepotrebnog treniranja koristi se regularizacijska tehnika rane obustave (engl. *early stopping*) sa sljedećim parametrima:

- `monitor='val_loss'` (praćenje *MSE* na validacijskim podacima),
- `patience=10` (zaustavljanje ako nema poboljšanja kroz 10 epoha),
- `restore_best_weights=True` (vraćanje najboljih težina prema minimalnoj validacijskoj pogrešci).

Model uči do najviše 100 epoha uz `batch size = 128`. Za validaciju se koristi izdvojeni validacijski skup od 20 % ulaznih podataka.

Nakon učenja, najbolja verzija modela sprema se u HDF5 (*.h5) datoteku s nazivom koji uključuje sufiks verzije (BiLSTM_v1) i opis skupa (`save_name`).

7.5.5. Obrazloženje odabira

BiLSTM je pogodan za sekvencijske vremenske nizove jer istodobno koristi informacije iz cijelog prozora (i naprijed i natrag), što poboljšava uočavanje i bilježenje obrazaca koji ovise o kontekstu unutar prozora od 290 koraka. U ovom istraživanju na raspolaganju su (za potrebe konačne verifikacije) bili kompletni zapisi stvarnih kvarova i poremećaja sa unaprijed dostupnim vremenskim nizovima, što znači da postoji mogućnost istovremene upotrebe informacija iz prošlosti i budućnosti. U takvim je okolnostima BiLSTM bolji izbor u usporedbi sa LSTM-om jer bolje uočava obrasce u podacima i postiže veću točnost predviđanja.

Linearni izlaz i *MSE* metrika predstavljaju prirodan izbor za višedimenzionalnu regresiju s kontinuiranim metama, a *MAE* metrika omogućuje praktičnu interpretaciju pogreške.

Tehnike gašenja (Dropout 0,3) i rane obustave (engl. *early stopping*) uravnotežuju kapacitet modela i generalizaciju bez potrebe za agresivnim smanjenjem složenosti.

7.5.6. Treniranje BiLSTM modela

Za treniranje parametara modela električnog opterećenja odabran je BiLSTM model (dvosmjerni LSTM model). Ovaj model odabran je zbog mogućnosti analize podataka i kronološkim slijedom, i unatrag, što u konačnici daje bolje rezultate.

Treniranje BiLSTM modela provedeno je u oblaku (engl. *cloud*), na *Google Colab* [85] okruženju s dodijeljenim NVIDIA Tesla T4 grafičkom procesnom jedinicom (engl. *graphic processor unit* – GPU) koja je bazirana na Turingovoj arhitekturi i usmjerena na ubrzanje zaključivanja modela dubokog učenja. Tesla T4 GPU ima 16 GB GDDR6 memorije i tenzorske jezgre (engl. *tensor cores*), što omogućuje učinkovito treniranje dubokih modela i znatno brže izvođenje u odnosu na CPU, osobito uz mješovitu preciznost.

Tenzorske jezgre specijalizirane su procesorske jedinice u GPU-ima, posebno NVIDIA GPU-ima, dizajnirane za značajno ubrzanje opterećenja dubokog učenja i visokoučinkovitog računanja (engl. *high-performance computing* – HPC) učinkovitim izvođenjem matričnih izračuna. One obrađuju aritmetiku mješovite preciznosti, množeći i akumulirajući više vrijednosti odjednom, što drastično ubrzava obuku i zaključivanje umjetne inteligencije izvođenjem množenja matrica i drugih tenzorskih operacija mnogo brže i energetski učinkovitije od procesorskih jedinica opće namjene.

Korištenje *Google Colab* okruženja sa NVIDIA Tesla T4 (16 GB) grafičkom procesnom jedinicom pruža dobar omjer dostupnosti, performansi i jednostavnosti. Za sekvencijske modele poput BiLSTM-a uz umjerene dimenzije podataka omogućuje brzu iteraciju (epohe u razini sekundi), stabilan rad i eksperimente koje je moguće reproducirati, uz mogućnosti daljnje optimizacije.

Model je treniran na 3D tenzoru oblika $(N, 290, 8)$, gdje N označava broj uzoraka, 290 je broj vremenskih koraka po uzorku, a 8 broj ulaznih značajki po koraku. Ciljne vrijednosti su vektor dimenzije 8 po uzorku $(N, 8)$, što predstavlja višedimenzionalnu regresiju.

Treniranje BiLSTM modela mreže trajalo je 847 sekundi, odnosno 14 minuta i 7 sekundi, ili 88 epoha, jer je tehnika rane obustave (engl. *early stopping*) zaustavila treniranje prije isteka 100 epoha. Tijek treniranja bio je sljedeći:

1. Prolazak podataka kroz mrežu (engl. *forward pass*)

U svakoj epohi mreža uzima seriju (engl. *batch*) po seriju podataka (od 128 uzoraka). Svaka serija prolazi kroz sve slojeve: (BiLSTM, Dropout, Dense, Dense izlaz). Na izlazu mreža daje predikciju 8 ciljanih parametara (ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P , AM , t_{m1} , T_j , s_{cr} , s_0) i ta se predikcija uspoređuje s točnim vrijednostima Y .

2. Računanje pogreške (engl. *loss*)

Pogreška se računa pomoću *MSE* metrike, uz dodatno praćenje *MAE* metrike. Na početku je pogreška velika pa mreža nasumično pogađa, a pogreška se smanjuje kako epohe prolaze.

3. Ažuriranje težina

Optimizacija je provedena Adam optimizatorom u kombinaciji s algoritmom povratnog širenja pogrešaka [88] (engl. *backpropagation* što je kratica od engl. *Backward Propagation of Errors*) za prilagodbu brzine učenja tijekom treninga. Optimizator Adam za svaku težinu mreže računa u kojem smjeru, i za koliko, mrežu treba promijeniti, a taj postupak ide sloj po sloj unatrag. Nakon što se obradi jedna serija podataka, težine se malo promijene i mreža postaje „pametnija“. Kombinacija tehnike optimizacije i algoritma povratnog širenja pogrešaka omogućuje modelu smanjenje gubitaka kroz epohe i učinkovito učenje složenih obrazaca iz podataka.

4. Validacija

Nakon što cijeli trening skup prođe kroz mrežu tijekom jedne epohe, mreža se testira na validacijskom skupu od 20% podataka. Mreža ne uči iz tih podataka, nego se na osnovu tih podataka mjeri koliko dobro mreža generalizira. Jedinice mjere su *val_loss* i *val_mae* (rezultati na testu nakon svake epohe).

5. Rana obustava (engl. *early stopping*)

Ova tehnika prati *val_loss* (*MSE* na validacijskim podacima). Kad *val_loss* prestane padati kroz više epoha (podešena granica je 10), trening se prekida i uzima se najbolji model. Zbog tog razloge trening je završio na 88. epohi, iako je postavljen maksimum od 100 epoha.

Tijekom treniranja mreža je 88 puta pročitala cijeli skup podataka, svaki put pokušala je bolje pogoditi izlazne vrijednosti, računala je pogreške i podešavala 174 216 parametara, te je svaku epohu provjeravala koliko dobro predviđa podatke koje još nije vidjela.

7.5.7. Analiza distribucije podataka

Analiza distribucije ulaznih podataka važna je zbog činjenice da neuronske mreže nisu osjetljive samo na odnose među značajkama, nego i na učestalost pojavljivanja određenih vrijednosti u skupu za treniranje. Analiza distribucije podataka osigurava da mreža uči na ispravnim, uravnoteženim i fizikalno smislenim podacima, te smanjuje rizik od grešaka i pogrešnih zaključaka.

Glavni problem javlja se u slučaju nejednolike raspodjele podataka. Ako se neki raspon vrijednosti pojavljuje znatno češće od drugih, mreža može pogrešno naučiti predviđati upravo te vrijednosti i postići naizgled dobru točnost, iako pritom zanemaruje primjere koji se rjeđe pojavljuju. U takvom slučaju mreža se ponaša kao da pogađa prosjek ili najčešću vrijednost, a ne uči stvarne obrasce u podacima. Ako su podaci jednoliko raspodijeljeni, mreža nema privilegiranih vrijednosti, i prisiljena je za svako predviđanje koristiti ulazne značajke kako bi pronašla ispravnu vrijednost.

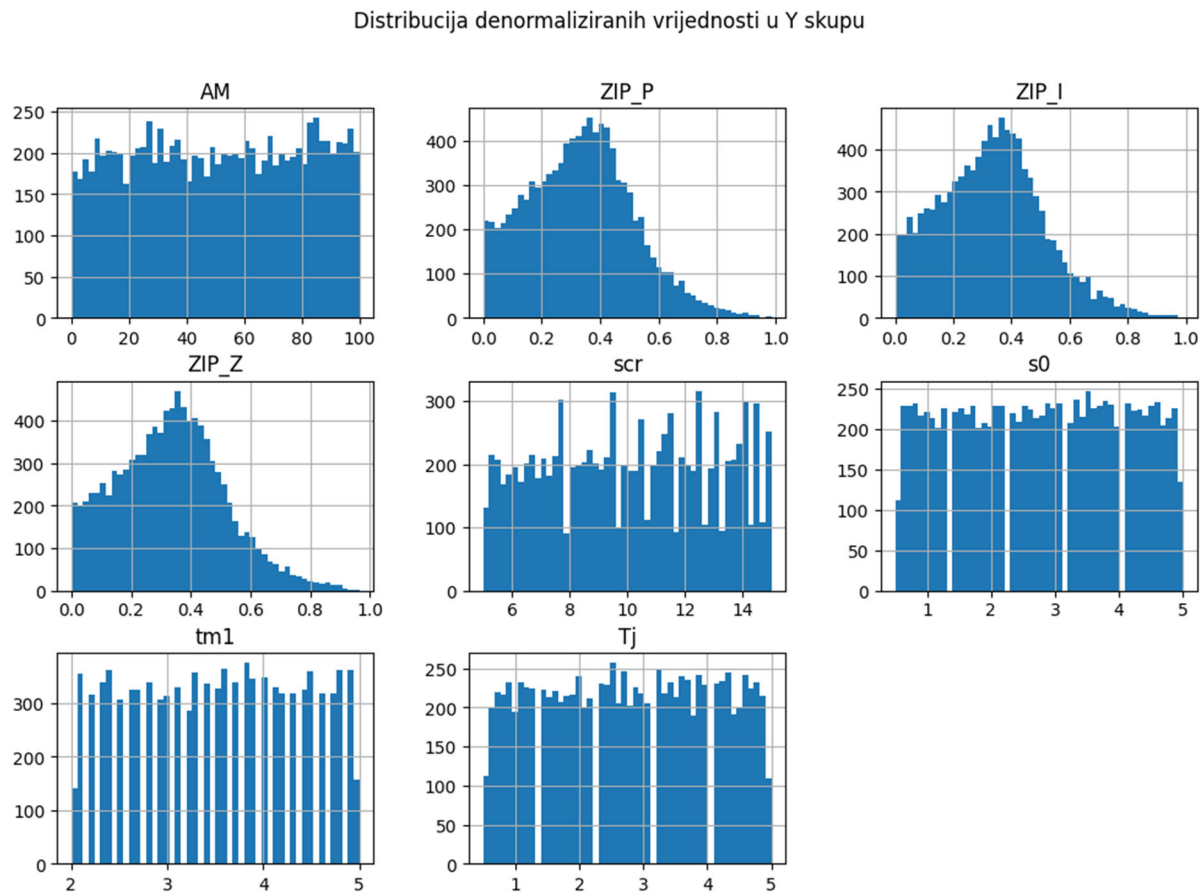
Analizom distribucije provjerava se da ne postoje neželjene pristranosti u podacima i osigurava se da mreža uči obrazac, a ne samo da “pamti” najčešće vrijednosti.

Prikaz histograma za svaku značajku (ulaznu i izlaznu) omogućuje procjenu:

1. Raspona vrijednosti – vidi se jesu li podaci u očekivanom fizikalnom rasponu.
2. Oblika distribucije – uočava se jesu li podaci približno uniformni, normalno raspodijeljeni, ili imaju asimetričnu distribuciju.
3. Potencijalnih anomalija (engl. *outlier*) – na histogramu je vidljivo ako je neki parametar imao ekstremno različite vrijednosti od ostatka parametara.
4. Balansa podataka – ravnomjernija raspodjela znači da mreža ima dovoljno uzoraka za učenje u cijelom rasponu vrijednosti; neuravnoteženost može dovesti do pristranog modela.
5. Smislenosti nakon denormalizacije – provjerava se jesu li vraćene vrijednosti u realnom fizičkom obliku, što potvrđuje da je skaliranje ispravno provedeno.

Na Sliku 39 prikazana je distribucija denormaliziranih vrijednosti u Y skupu. Na slici se vidi da su ciljane vrijednosti jednoliko distribuirane.

Jedinu iznimku u ovim razmatranjima predstavljaju parametri statičkog dijela opterećenja Z , I i P (označeni oznakama ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P). Razlog tome je što, kako je navedeno u poglavlju 3.3.1, njihova suma iznosi 1 pa zbog tog ograničenja njihove distribucije ne mogu biti jednolike u cijelom intervalu $[0,1]$. Između ovih varijabli postoji međusobna ovisnost zbog fizikalnih zakonitosti. Posljedica spomenute ovisnosti je da raspodjela svake pojedine komponente (ZIP_Z , ZIP_I ili ZIP_P) prirodno ima oblik koncentriran oko određenih vrijednosti umjesto ravnomjerne distribucije. Na histogramima na Slici 39 to se vidi u obliku sličnom zvonu (gomilanje vrijednosti oko sredine histograma), dok su ekstremi (vrijednosti blizu 0 ili 1) rjeđi.



Slika 39: Distribucija denormaliziranih vrijednosti u Y skupu

Mreža tijekom treniranja češće vidi kombinacije sa raspodjelom ZIP komponenti u srednjem području između ekstrema, a puno rjeđe kombinacije gdje jedna komponenta dominira u odnosu na ostale (npr. $ZIP_P \approx 1$, $ZIP_Z \approx 0$ i $ZIP_I \approx 0$). Zbog toga se srednje vrijednosti (oko 0.3–0.5) pojedinih komponenti prirodno pojavljuju puno češće nego ekstremi (0 ili 1).

7.5.8. Pokazatelji točnosti rezultata metode

Nakon uspješno provedenog razvoja i treninga BiLSTM modela, izvršena je evaluacija modela korištenjem testnog seta (20% od ukupnog broja) podataka koje model nije vidio tijekom treniranja. Radi procjene performansi modela dubokog učenja, za potrebe određivanja parametara električnog opterećenja, korištene su tri metrike evaluacije:

- srednja apsolutna pogreška (engl. *mean absolute error*) - *MAE*,
- srednja kvadratna pogreška (engl. *root mean square error*) - *MSE*,
- koeficijent determinacije R^2 [89].

Koeficijent determinacije R^2 koristi se kao mjera kvalitete prilagodbe modela koja pokazuje postotak varijance zavisne varijable koji je objašnjen nezavisnim varijablama u modelu. Varijanca je matematička mjera raspršenosti skupa podataka koja pokazuje koliko podaci odstupaju od njihove srednje vrijednosti (prosjeaka), odnosno srednje kvadratno odstupanje svakog podatka od srednje vrijednosti. Ovo varijancu čini pozitivnim brojem i, posljedično, pogodnom za analizu varijabilnosti unutar skupa podataka. Koeficijent determinacije R^2 računa se izrazom

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (43)$$

gdje je

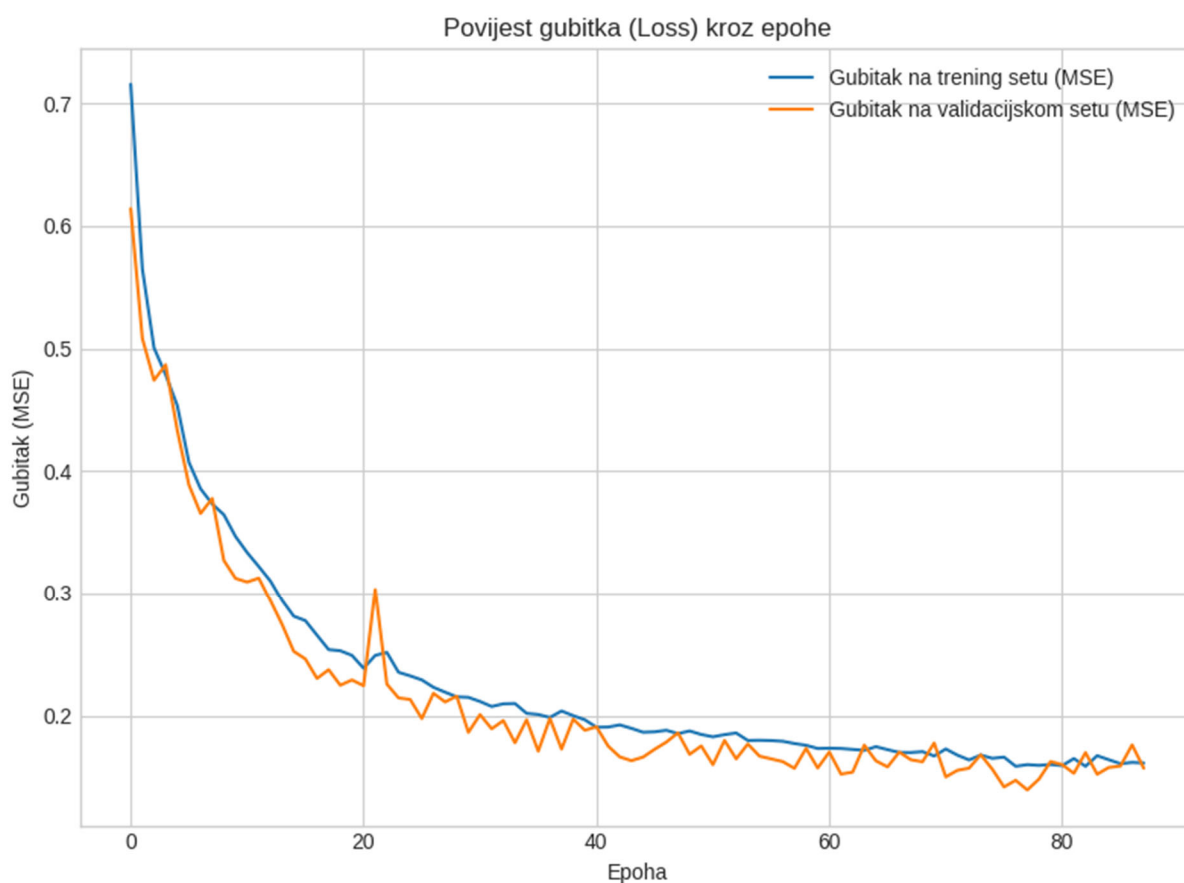
- y_i – stvarna vrijednost zavisne varijable,
- $\hat{y}_i$ – predviđena vrijednost zavisne varijable,
- $\bar{y}$ – srednja vrijednost zavisne varijable,
- N – broj promatranih vrijednosti.

Koeficijent determinacije R^2 pokazuje koliko dobro regresijski model točno predviđa stvarne podatke. U stvarnosti R^2 ima vrijednost između 0 i 1:

- $R^2 = 1$ – znači da model u potpunosti predviđa ciljnu varijablu,
- $R^2 = 0$ – znači da nema predviđanja (model nema nikakvu predviđenu vrijednost).

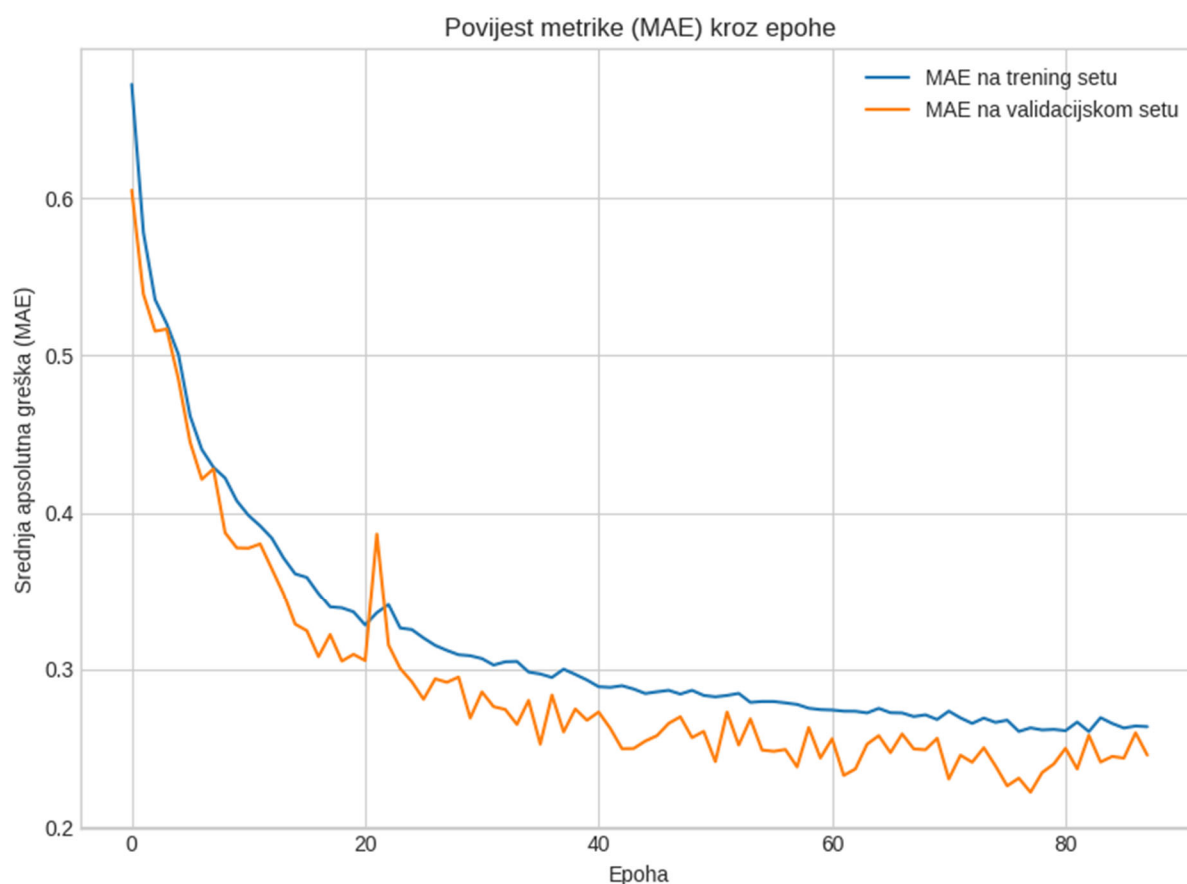
Vrijednosti metrika MAE , MSE i R^2 kombinirano pružaju sveobuhvatnu sliku performansi modela uključujući točnost predviđanja, osjetljivost na velike pogreške i sposobnost modela da objasni varijabilnost u podacima. Procjena koeficijenta determinacije R^2 izvršena je po svakom ciljanom parametru (ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P , AM , t_{m1} , T_j , s_{cr} , s_0).

Slika 40 i Slika 41 prikazuju krivulje MSE gubitka (srednje kvadratne pogreške) i MAE (srednje apsolutne pogreške) po epohama, posebno za trening i za validacijski uzorak.



Slika 40: Povijest metrike srednje kvadratne pogreške (MSE) kroz epohe

Na ovaj se način provjerava dinamika konvergencije i usklađenost treninga s validacijom (indikator prenaučivosti). Budući da je primijenjena tehnika brze obustave (engl. *early stopping*), zadržana je epoha s najmanjim validacijskim gubitkom, čime je poboljšana generalizacija.



Slika 41: Povijest metrike srednje apsolutne pogreške (*MAE*) kroz epohe

Algoritam je za tri sekunde prošao kroz 6 000 do tada neviđenih setova podataka (validacijski test set) te pomoću ulaznih podataka predvidio 6 000 setova ciljanih vrijednosti (ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P , AM , t_{m1} , T_j , s_{cr} , s_0). U idućem koraku algoritam je usporedio predviđene vrijednosti sa stvarnim vrijednostima za tih 6000 setova podataka i izračunao *MAE*, *MSE* i R^2 metrike.

Konačne metrike na testnom uzorku prikazane su u Tablici 15. Prikazane vrijednosti pokazuju efikasnost modela i relativno malo odstupanje od stvarnih vrijednosti.

Tablica 15: Konačne metrike na testnom uzorku

Konačne metrike na testnom uzorku	
Srednja kvadratna pogreška <i>MSE</i>	0.1396
Srednja apsolutna pogreška <i>MAE</i>	0.2221

Koeficijent determinacije R^2 za svaki izlazni parametar prikazan je u Tablici 16. Ovaj koeficijent koristi se u strojnom učenju za procjenu kvalitete regresijskog modela i mjeri koliko dobro model odgovara podacima procjenjujući udio varijance u zavisnoj varijabli objašnjenjone nezavisnim varijablama. Što je vrijednost R^2 bliža jedinici, model bolje odgovara podacima. Za većinu izlaznih parametara koeficijent R^2 ima vrijednost blizu 1 što dokazuje efikasnost modela. Jedinu iznimku predstavlja izlazni parametar ZIP_I čiji se koeficijent determinacije može smatrati nedovoljno dobrim. Ovakav rezultat može se objasniti sljedećim razlozima:

- fizikalnim osobinama parametara statičke komponente opterećenja koji mogu, kako je naglašeno u poglavlju 3.3.1, poprimiti negativne vrijednosti,
- međusobnoj fizikalnoj ovisnosti parametara statičke komponente opterećenja koja je ranije naglašena u poglavlju 7.5.7,
- glavnom nedostatku koeficijenta determinacije R^2 koji pretpostavlja da su sve varijable u modelu neovisne [90].

Tablica 16: Koeficijent determinacije R^2 za svaki izlazni parametar

Izlazni parametar	Koeficijent determinacije R^2
ZIP_Z	0.7699
ZIP_I	0.4896
ZIP_P	0.8921
AM	0.9926
t_{m1}	0.7864
T_j	0.9749
s_{cr}	0.9843
s_0	0.9849

Uvažavajući konačne metrike prikazane u Tablica 15 i Tablica 16, može se zaključiti kako mjerni podaci predloženog modela – srednja apsolutna pogreška (MAE), srednja kvadratna

pogreška (MSE) i koeficijent determinacije (R^2) pokazuju visoku korelaciju između stvarnih i predviđenih parametara električnog opterećenja čime dokazuju visoku točnost predviđanja.

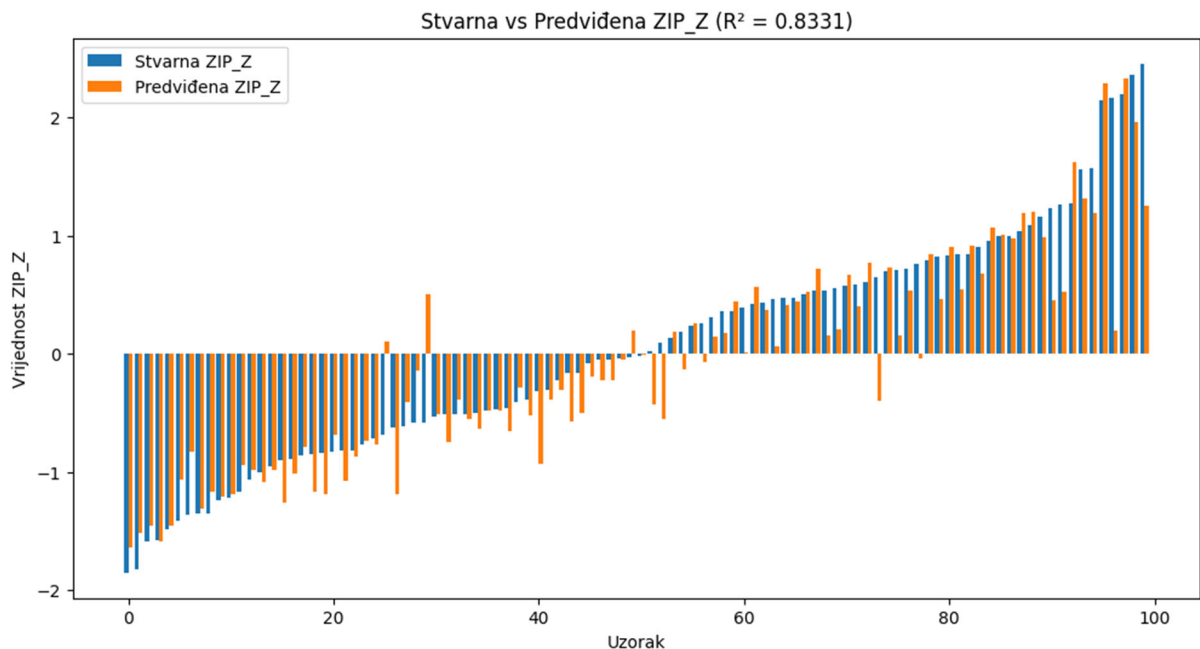
7.5.9. Vizualni prikaz točnosti modela

Za vizualni prikaz točnosti modela uzeto je 100 nasumičnih vrijednosti, za svaki od osam ciljanih parametara (ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P , AM , t_{m1} , T_j , s_{cr} , s_0). Vrijednosti su zatim poredane po veličini i prikazane u obliku stupaca zajedno s pripadajućim predikcijama modela.

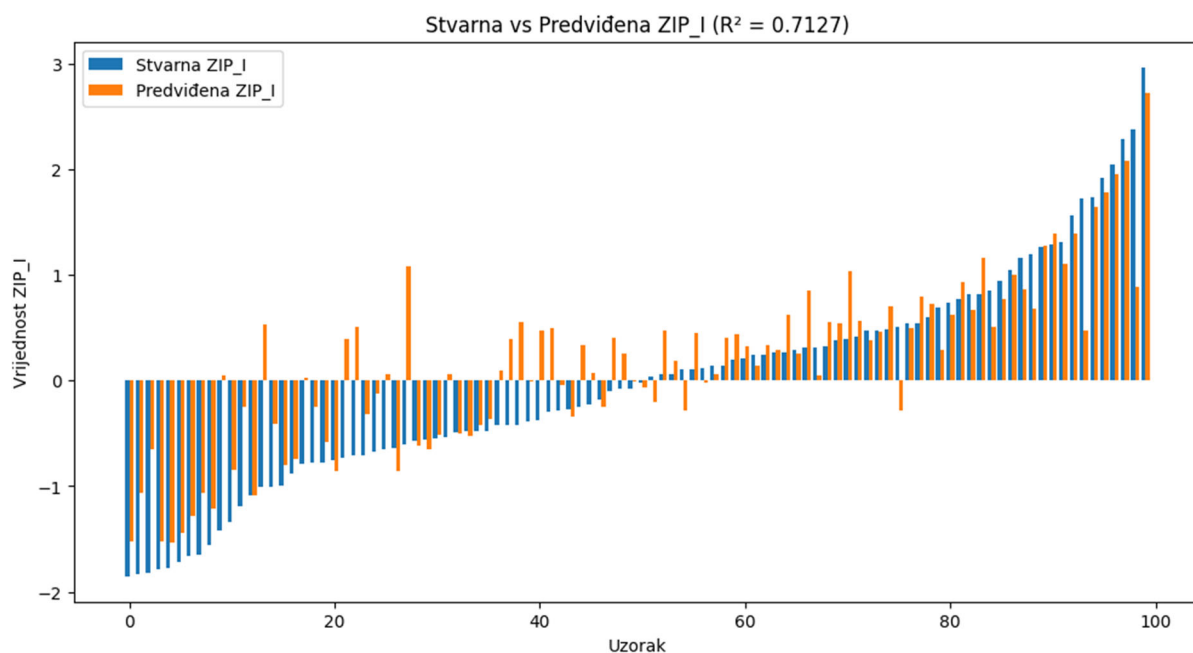
Ovakav prikaz jasno pokazuje poklapanje modela s ciljanim vrijednostima:

- Ako je model točan, stupci koji prikazuju stvarne vrijednosti i stupci koji prikazuju predviđanja, biti će gotovo jednake visine.
- Veće razlike u visini stupaca upućuju na odstupanja modela od stvarnih vrijednosti.

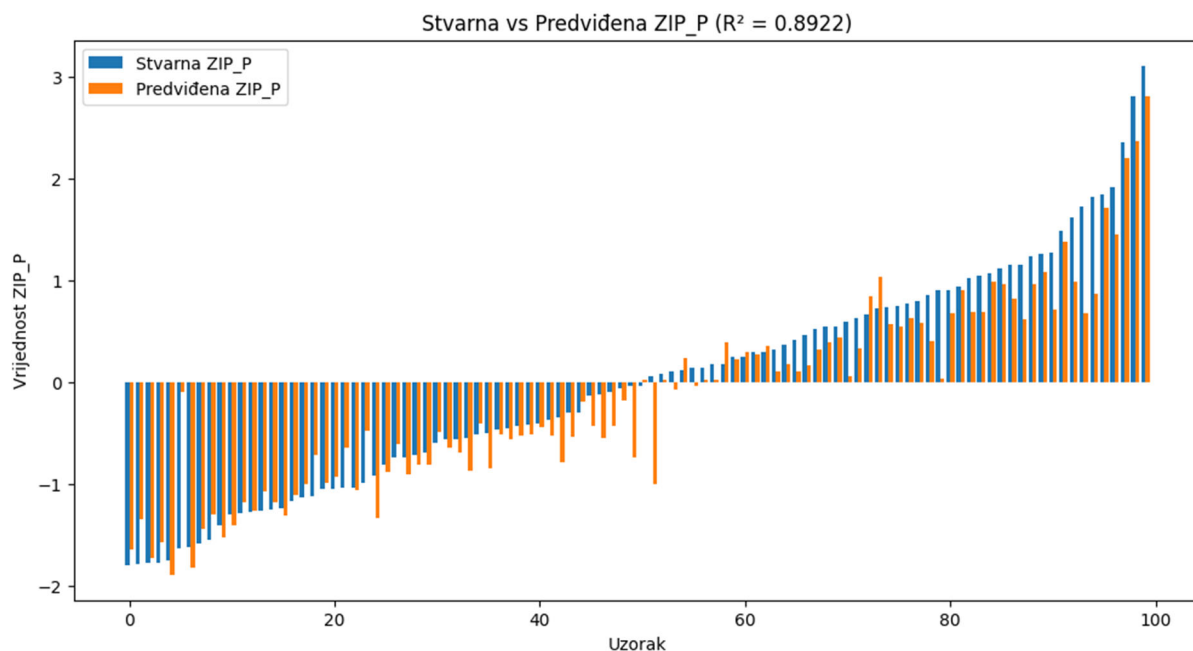
Grafovi sa stupcima prikazuju rezultate prije denormalizacije, u skaliranom obliku koji je korišten tijekom treniranja. Time se naglašava relativna točnost modela, dok se apsolutno značenje u fizičkim jedinicama dobiva tek nakon denormalizacije.



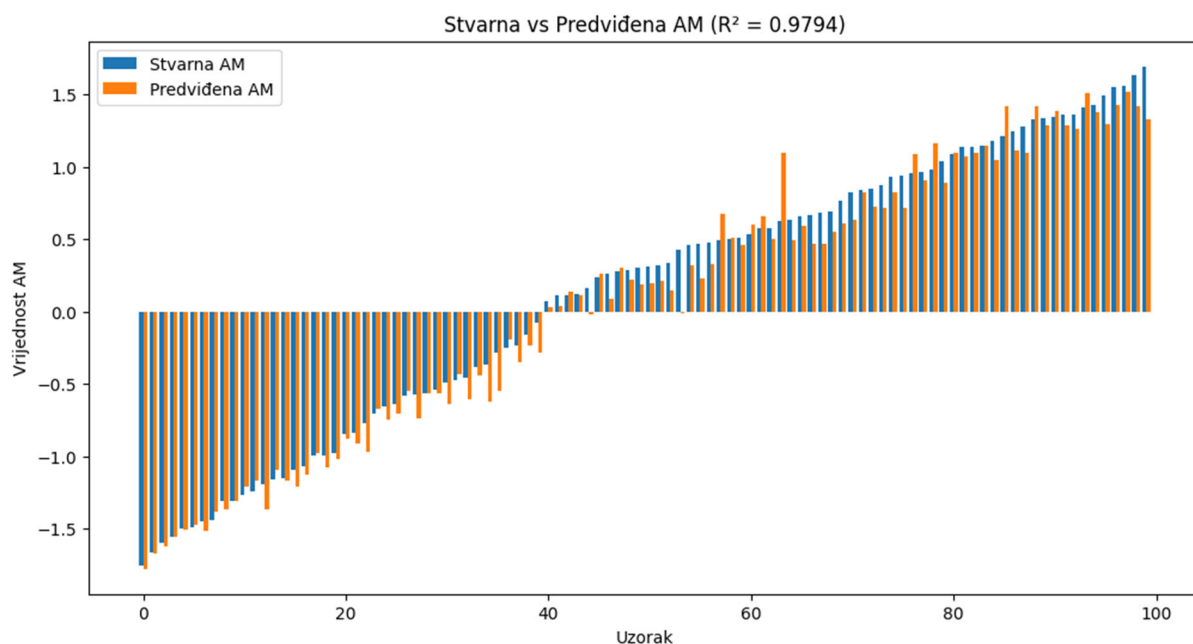
Slika 42: Usporedba stvarnih vrijednosti konstantne impedancije Z sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže



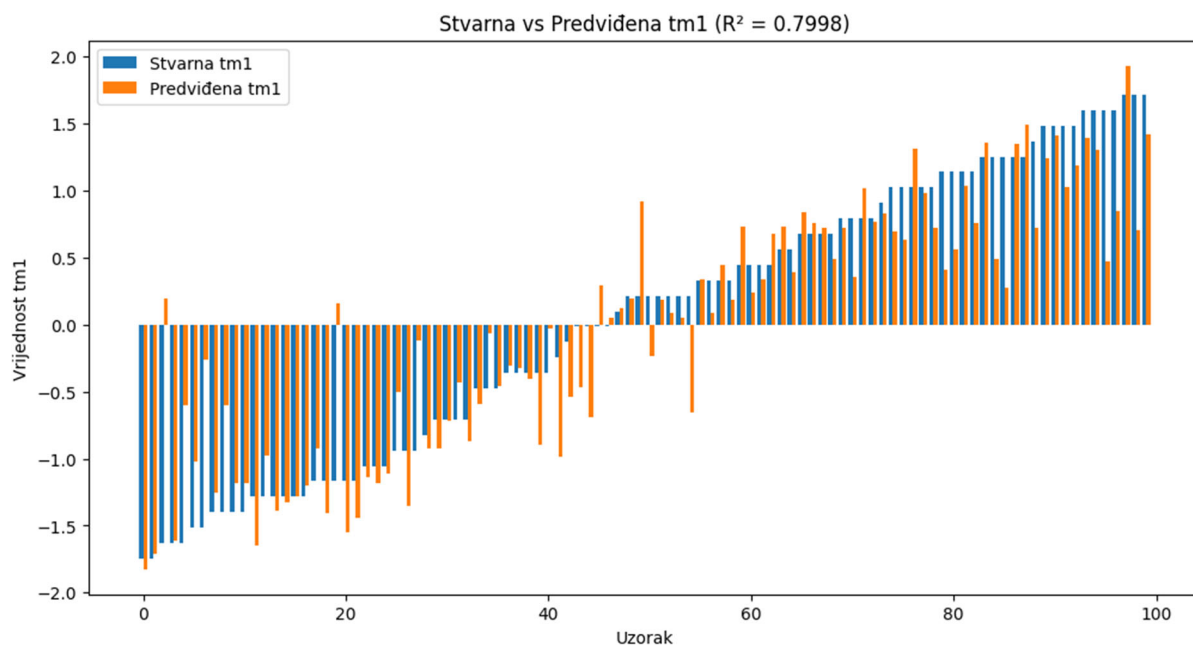
Slika 43: Usporedba stvarnih vrijednosti konstantne struje I sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže



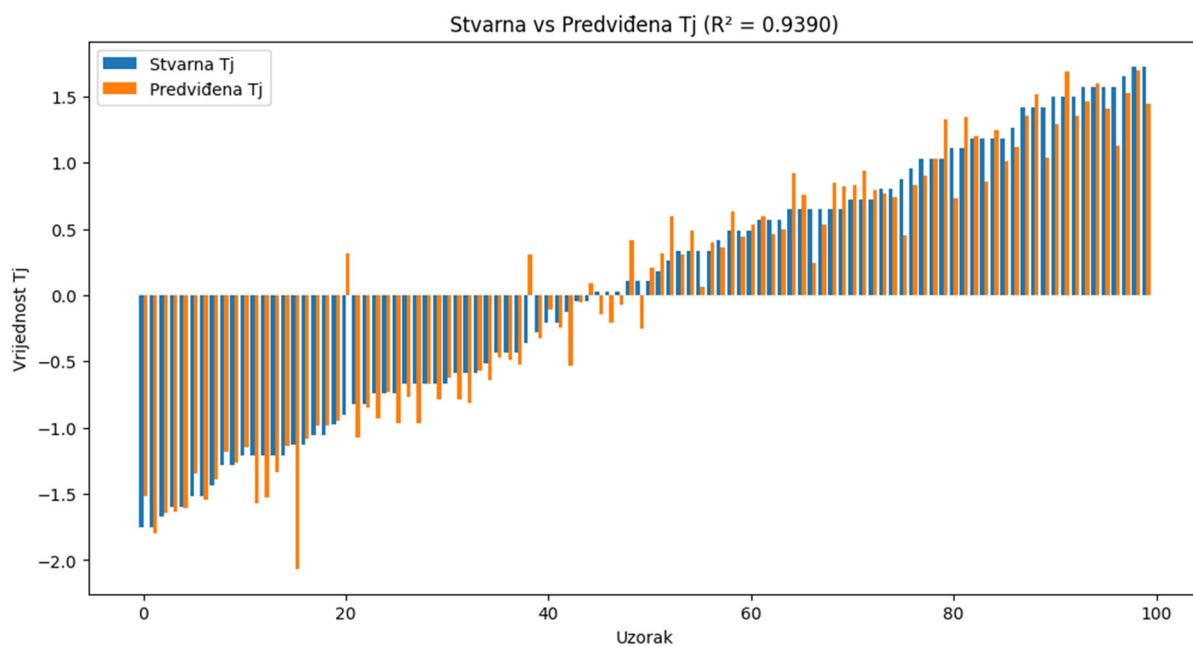
Slika 44: Usporedba stvarnih vrijednosti konstantne snage P sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže



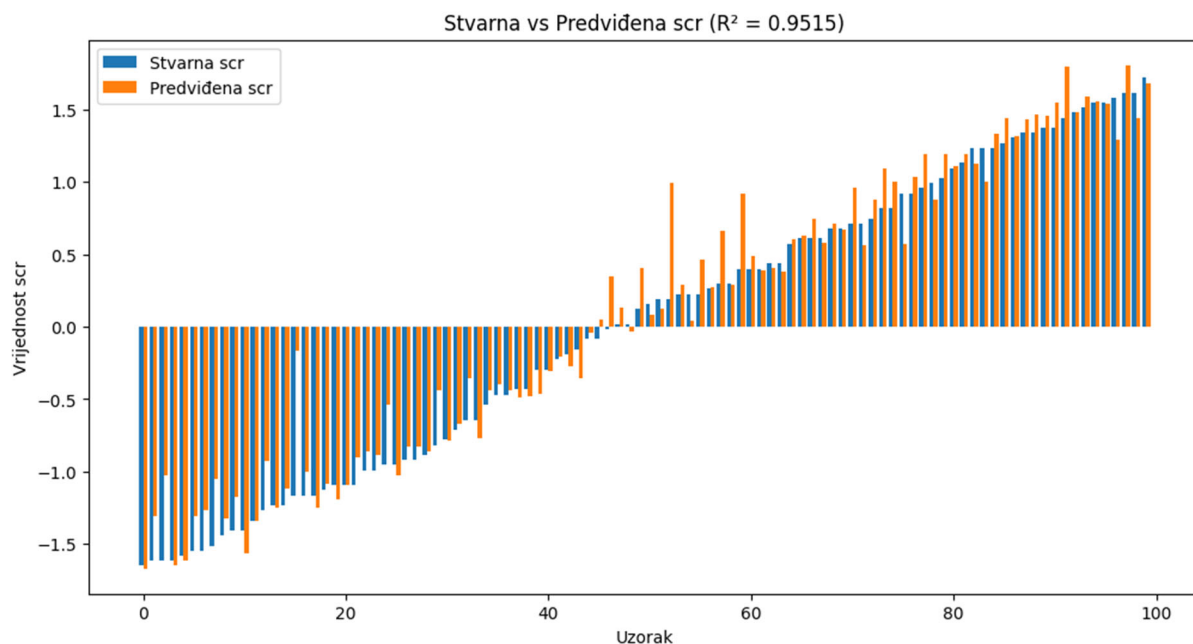
Slika 45: Usporedba stvarnih vrijednosti postotnog udjela dinamičke komponente opterećenja AM u odnosu na ukupno opterećenje sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže



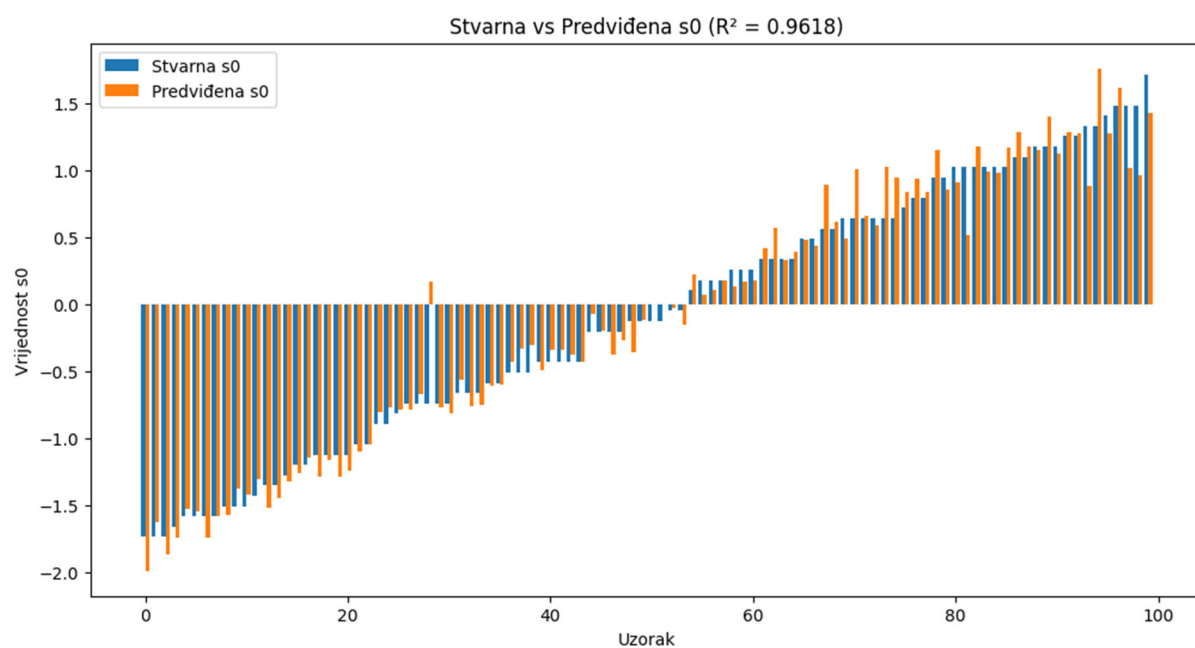
Slika 46: Usporedba stvarnih vrijednosti eksponenta t_{m1} mehaničkog momenta asinkronog motora sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže



Slika 47: Usporedba stvarnih vrijednosti vremenske konstante inercije T_j asinkronog motora, sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže



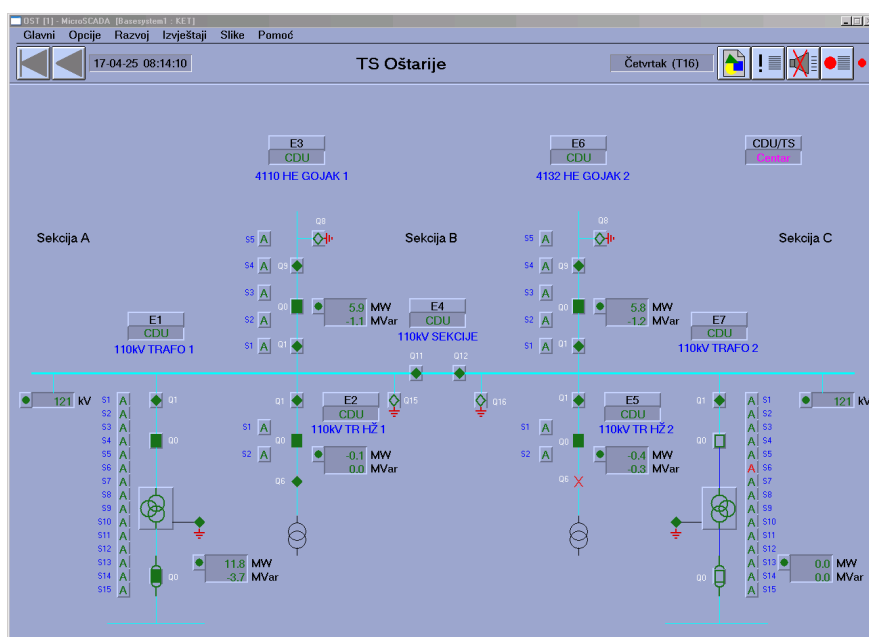
Slika 48: Usporedba stvarnih vrijednosti klizanja s_{cr} pri maksimalnom/prekretnom elektromagnetskom momentu asinkronog motora, sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže



Slika 49: Usporedba stvarnih vrijednosti klizanja s_0 u uvjetima ravnoteže elektromagnetskog momenta i mehaničkog momenta asinkronog motora, sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže

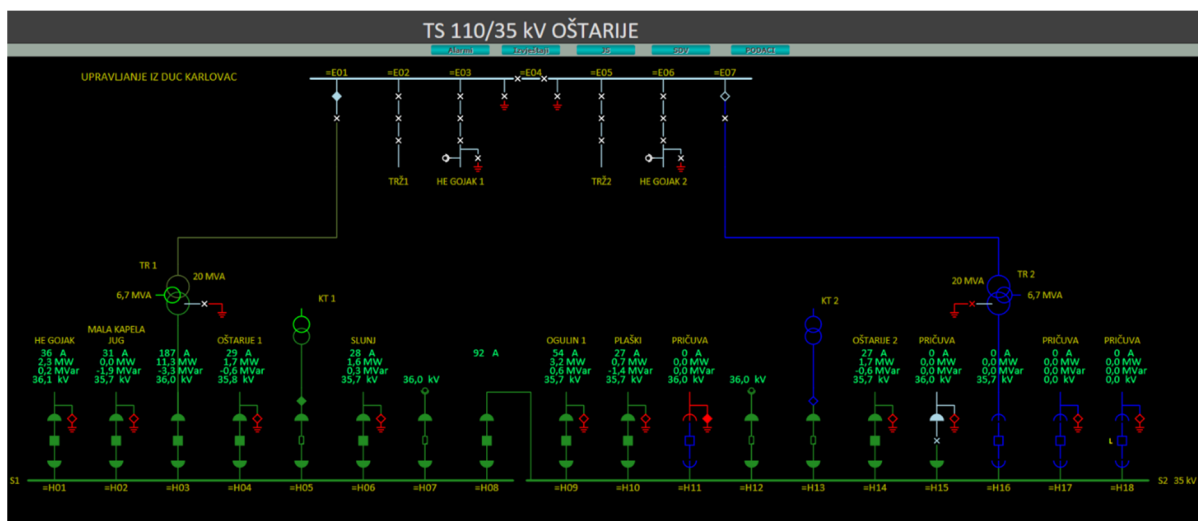
8. PRIMJENA METODE ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA ELEKTRIČNOG OPTEREĆENJA

U svrhu primjene metode za određivanje parametara električnog opterećenja u stvarnim okolnostima odabrano je opterećenje priključeno na 35 kV sabirnice TS 110/35 kV Oštarije. Radi se o zajedničkoj trafostanici HOPS-a, HEP ODS-a i HŽ Infrastrukture koja je locirana u mjestu Oštarije, nekoliko kilometara udaljenom od grada Ogulina. Elektrovučno postrojenje HŽ Infrastrukture, koje je priključeno na 110 kV postrojenje, koristi transformaciju 110/25 kV. Elektroenergetske mreže HOPS-a i HEP ODS-a povezane su dvama transformatorima prijenosnog omjera $110 \pm 10 \times 1,5\% / 36,75 / 10,5$ kV, oba opremljena regulacijskim sklopkama za rad pod opterećenjem. Jedan transformator zadovoljava potrebe opterećenja priključenog na 35 kV sabirnice, pa je uobičajeno pogonsko stanje sa jednim uključenim transformatorom. Jednopolna shema 110 kV postrojenja TS Oštarije [91] prikazana je na Slici 50.



Slika 50: Jednopolna shema 110 kV postrojenja TS Oštarije

DP Elektra Karlovac organizirano je u 7 terenskih jedinica. Jedna od njih je terenska jedinica (TJ) Ogulin koja se napaja iz TS Oštarije. Na 35 kV sabirnice TS Oštarije priključeno je 7 dalekovoda od kojih su 4 kableske (DV Plaški, DV Oštarije 1, DV Oštarije 2, DV Mala Kapela), a preostala 3 dominantno zračne izvedbe (DV Gojak, DV Ogulin, DV Slunj). Jednopolna shema 35 kV postrojenja TS Oštarije [92] prikazana je na Slici 51.

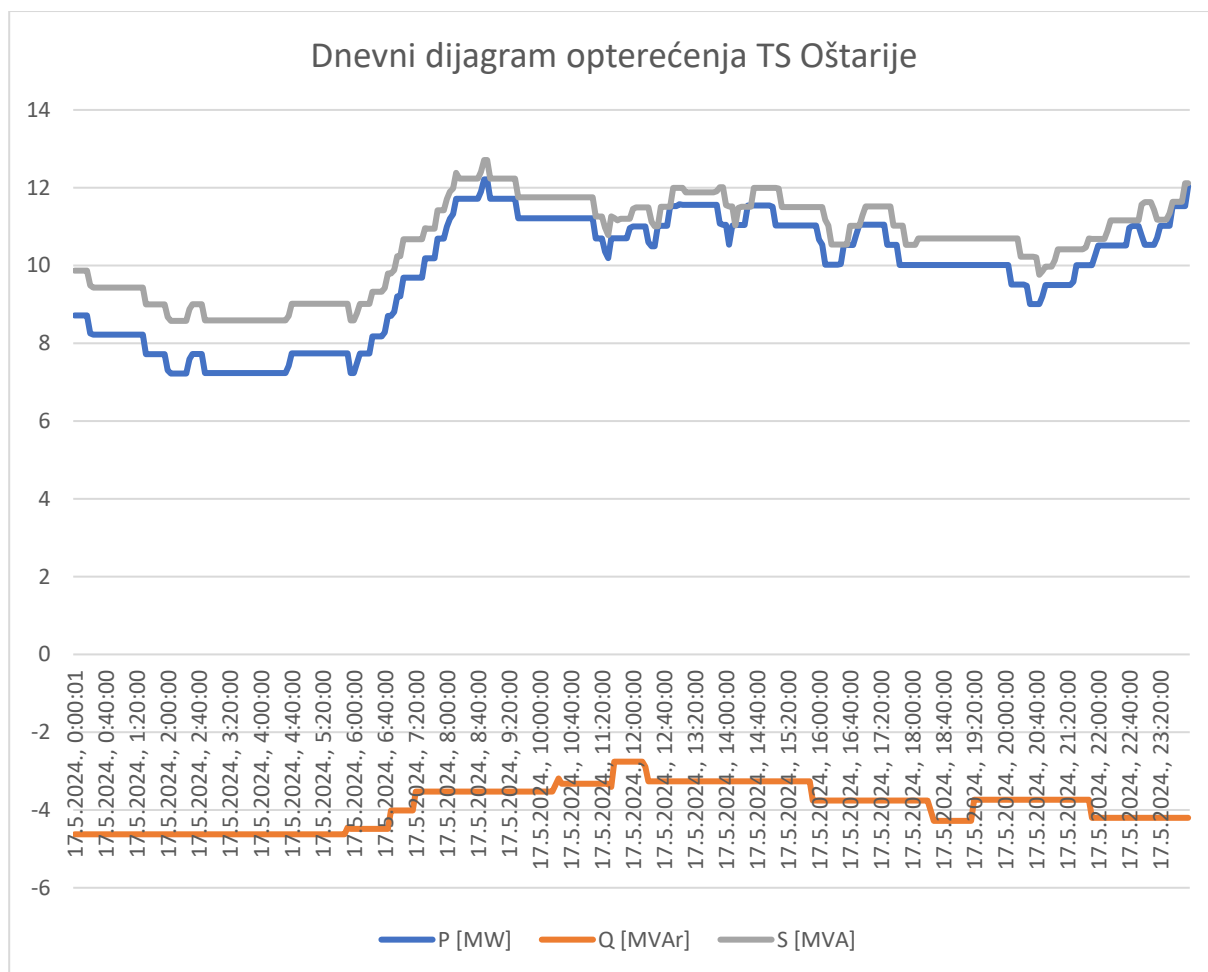


Slika 51: Jednopolna shema 35 kV postrojenja TS Oštarije

Struktura priključenog opterećenja u prosjeku odgovara strukturi potrošača DP Elektra Karlovac što znači da kućanstva čine 38 %, a industrijski potrošači 62 % opterećenja TJ Ogulin. Na 35 kV mrežu, napajanu sa sabirnica TS Oštarije, posredno je priključeno cca 1 MW instalirane snage proizvodnje obnovljivih izvora električne energije. Radi se uglavnom o solarnim elektranama koje su priključene na 0,4 kV naponsku razinu.

Tipičan dnevni dijagram opterećenja TS Oštarije [91] prikazan je na Slici 52. Vidi se kako opterećenje varira u rasponu od minimalnih 7,2 MW u ranim jutarnjim satima do vršnog opterećenja od 12,2 MW između 8 i 9 sati ujutro. Jalova komponenta opterećenja sa negativnim predznakom posljedica je znatne duljine kableske mreže TJ Ogulin.

TJ Ogulin (opterećenje priključeno na TS Oštarije) ima 10 korisnika priključenih na 10 kV mrežu, te 3 korisnika priključena na 20 kV mrežu. Ostali potrošači priključeni su na mrežu nazivnog napona 0,4 kV (NN mrežu). Najveći potrošači priključeni na SN mrežu su subjekti koji se bave drvnom proizvodnjom, proizvodnjom kamene galanterije, proizvodnjom građevinskog materijala ili obavljanjem zdravstvene djelatnosti, a većina njih obavlja posao u dvije smjene što se vidi iz dnevnog dijagrama opterećenja na Slici 52. Jedini značajniji potrošač koji radi bez prestanka je bolnica u Ogulinu. Najveći potrošači priključeni na NN mrežu su subjekti koji se bave obradom drva ili poljoprivrednom djelatnošću. Ukupna snaga koju najveći potrošači preuzimaju iz mreže iznosi preko 4 MW.



Slika 52: Dnevni dijagram opterećenja TS Oštarije

Metoda za određivanje parametara električnog opterećenja će se primijeniti na stvarnim kvarovima koji su zabilježeni u 35 kV mreži napajanoj iz TS Oštarije, te na zapisima odziva opterećenja za vrijeme izazivanja poremećaja napona manipuliranjem regulacijskom sklopkom transformatora. Za primjenu metode odabrani su zapisi 5 trolnih kvarova (3 kvara zabilježena su na DV 35 kV Gojak, a 2 kvara na DV 35 kV Slunj) i zapisi 9 provedenih manipulacija regulacijskom sklopkom transformatora. Datume nastanka trolnih kvarova nije moguće nedvosmisleno utvrditi jer uređaji relejne zaštite 35 kV dalekovoda, koji su zabilježili kvarove, povremeno gube vremensku sinkronizaciju. Gubitak vremenske sinkronizacije ne predstavlja prepreku za ovu analizu jer, u smislu razmatranja modeliranja električnog opterećenja, sve ostaje isto: model opterećenja sastoji se od regulacijskog transformatora koji povezuje prijenosnu i distribucijsku mrežu, na SN sabirnicama priključeno je opterećenje, i dolazi do poremećaja tijekom kojeg se bilježi odziv priključenog opterećenja.

Broj raspoloživih zapisa kvarova relativno je mali. Ta je činjenica očekivana, u prvom redu zbog činjenice da su samo 3 dalekovoda (dominantno) zračne izvedbe, a osim toga i zbog geometrije stupova 35 kV dalekovoda, odnosno relativno velikih udaljenosti između faza ovih dalekovoda. Preventivno održavanje koje provodi DP Elektra Karlovac, dodatno smanjuje mogućnost nastanka kvarova višepolnog karaktera. Iako je na raspolaganju bio i određeni broj zapisa dvopolnih kvarova, u razmatranje su, radi usporedbe, uzeti samo tropolni kvarovi jer su takvi kvarovi primjenjivani na sabirnici *Terminal 2 20* modela na Slici 30.

Manipulacije regulacijskom sklopkom provedene po principu „jedan položaj više – dva položaja niže“, u razdoblju od 17.05.2024. do 24.05.2024. godine. Za to je vrijeme tijekom jutra i tijekom večeri provedeno ukupno 13 ovakvih manipulacija, a odziv opterećenja bilježen je prijenosnim uređajem za mjerenje kvalitete električne energije PowerXplorer PX5 [93]. Ovaj uređaj bio je podešen [94] tako da svake sekunde snimi fazne struje i napone, te radnu i jalovu komponentu snage opterećenja. Korak regulacije od 1,5 % nazivnog linijskog napona na SN strani predstavlja promjenu od 525 V kod nazivnog napona 35 kV mreže, pa je opisani princip, uz suglasnost nadležnih kolega iz Elektre Karlovac, odabran zbog toga što je primjenjiv u pogonu bez posljedica po kvalitetu napona isporučenog krajnjim potrošačima električne energije. Korak regulacije na 35 kV strani, u faznim vrijednostima (koje će se koristiti za prikaz) iznosi 303 V. Iako su dispečeri imali uputu manipulirati regulacijom po gore navedenom principu, u nekoliko slučajeva izvršili su drugačije manipulacije što će biti prikazano u poglavljima koja slijede.

8.1. Trening BiLSTM neuronske mreže

Radi verificiranja metode za određivanje parametara električnog opterećenja, provedena su još dva treniranja neuronske BiLSTM mreže, na identičan način kao i u poglavlju 7.5.6. Skup ulaznih podataka koji je korišten u prvom testiranju rastavljen je na dva dijela: prvi skup koji služi za treniranje mreže na tropolne kratke spojeve, i drugi skup koji služi za treniranje mreže na manipulacije regulacijskom sklopkom po principu „jedan položaj više – dva položaja niže“. Jednako kao i u poglavlju 7.5.1, u bazi učitanih podataka X su ulazne vrijednosti, a Y ciljane vrijednosti.

Baza učitanih podataka za treniranje mreže na tropolne kratke spojeve ima sljedeći oblik:

X: (30000, 80, 8)

Y: (30000, 8)

Podaci za treniranje i testiranje neuronske mreže na trolne kratke spojeve imaju sljedeći oblik:

X_train: (24000, 80, 8) | Y_train: (24000, 8)

X_test: (6000, 80, 8) | Y_test: (6000, 8)

Dakle, ulazne vrijednosti za treniranje mreže na trolne kratke spojeve čini 30 000 simulacija trolnih kratkih spojeva, od kojih je svaka duga 80 vremenskih koraka, te ima 8 značajki koje se spremaju:

- radna [MW] i jalova [MVar] komponenta snage opterećenja priključenog na sabirnici *Terminal 2 20*,
- fazne struje I_R [kA], I_S [kA] i I_T [kA],
- fazni naponi U_R [kV], U_S [kV] i U_T [kV].

Baza učitanih podataka za treniranje mreže na manipulacije regulacijskom sklopom ima sljedeći oblik

X: (30000, 210, 8)

Y: (30000, 8)

Podaci za treniranje i testiranje neuronske mreže na manipulacije regulacijskom imaju sljedeći oblik:

X_train: (24000, 210, 8) | Y_train: (24000, 8)

X_test: (6000, 210, 8) | Y_test: (6000, 8)

Dakle, ulazne vrijednosti za treniranje mreže na manipulacije regulacijskom sklopom čini 30 000 simulacija manipulacija regulacijskom sklopom po principu „jedan položaj više – dva položaja niže“, od kojih je svaka duga 210 vremenskih koraka, te ima 8 značajki koje se spremaju:

- radna [MW] i jalova [MVar] komponenta snage opterećenja priključenog na sabirnici *Terminal 2 20*,

- fazne struje I_R [kA], I_S [kA] i I_T [kA],
- fazni naponi U_R [kV], U_S [kV] i U_T [kV].

Y su 8 ciljanih vrijednosti za oba tipa treniranja mreže, i to:

- AM – postotak udjela dinamičke komponente opterećenja u ukupnom opterećenju,
- ZIP_Z – postotak udjela komponente konstantne impedancije statičkog dijela opterećenja,
- ZIP_I – postotak udjela komponente konstantne struje statičkog dijela opterećenja,
- ZIP_P – postotak udjela komponente konstantne snage statičkog dijela opterećenja,
- t_{m1} – eksponent mehaničkog momenta T_m asinkronog motora,
- T_j – vremenska konstanta inercije asinkronog motora [s],
- s_{cr} – postotna vrijednost klizanja pri maksimalnom/prekretnom elektromagnetskom momentu T_e asinkronog motora,
- s_0 – postotna vrijednost klizanja u uvjetima ravnoteže elektromagnetskog momenta T_e i mehaničkog momenta T_m asinkronog motora.

Podaci su strukturirani tako da se iz sekvenci ulaznih značajki (X) uči predviđanje odgovarajućih izlaza (Y). Trening set u oba slučaja čini 80% podataka koji se koriste za učenje. Na osnovu ovih primjera neuronska mreža prilagođava svoje težine i poboljšava sposobnost prepoznavanja obrazaca. Testni set u oba slučaja čini preostalih 20% podataka i koristi se isključivo za provjeru opće sposobnosti mreže, odnosno za provjeru koliko dobro mreža može predvidjeti primjere s kojima se do tada nije susretala. Na ovaj se način osigurava da mreža razvija sposobnost generalizacije, i da izbjegava učenje podataka napamet.

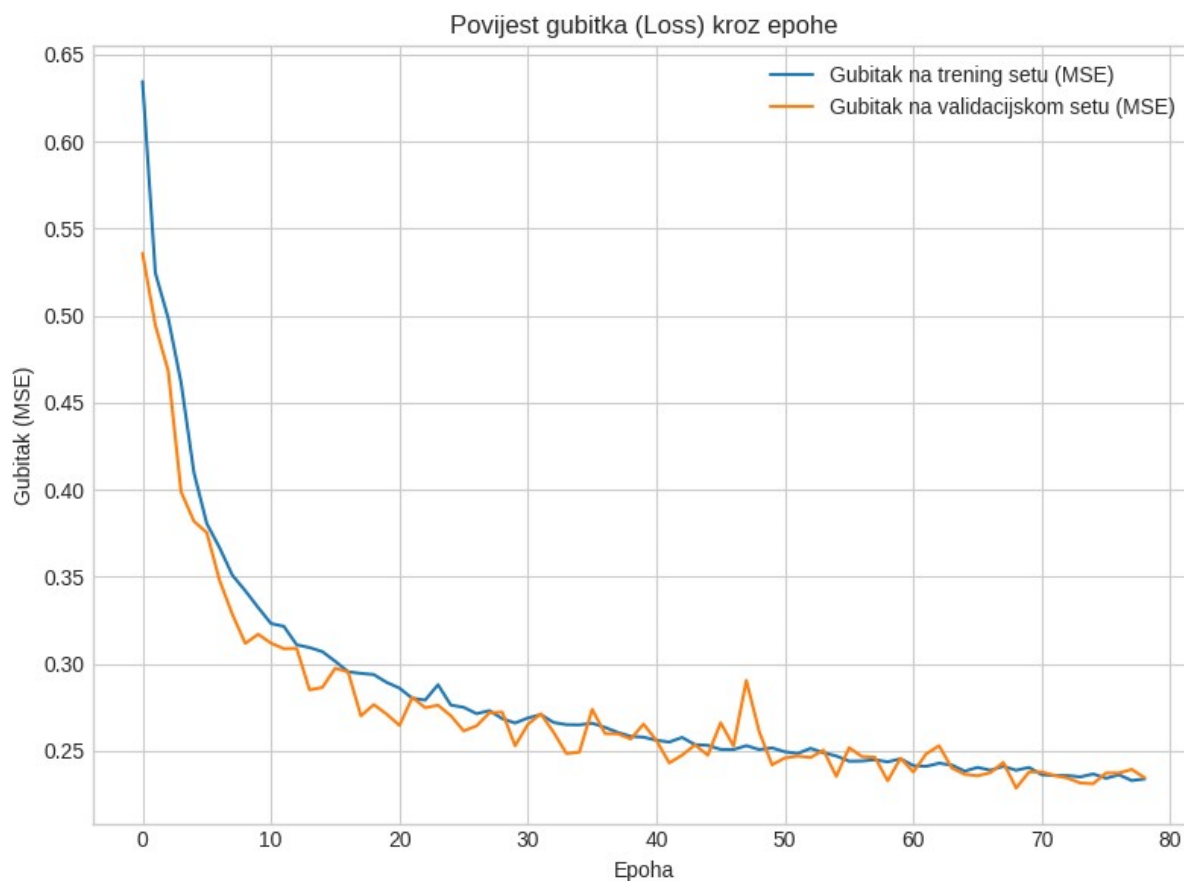
8.1.1. Pokazatelji točnosti rezultata metode za trole kvarove

Nakon uspješno provedenog razvoja i treninga BiLSTM modela, izvršena je evaluacija modela korištenjem testnog seta podataka (20% od ukupnog broja) koje model nije vidio tijekom treniranja. Za potrebe određivanja parametara električnog opterećenja, radi procjene performansi modela dubokog učenja, korištene su metrike evaluacije MSE , MAE i R^2 . Procjena

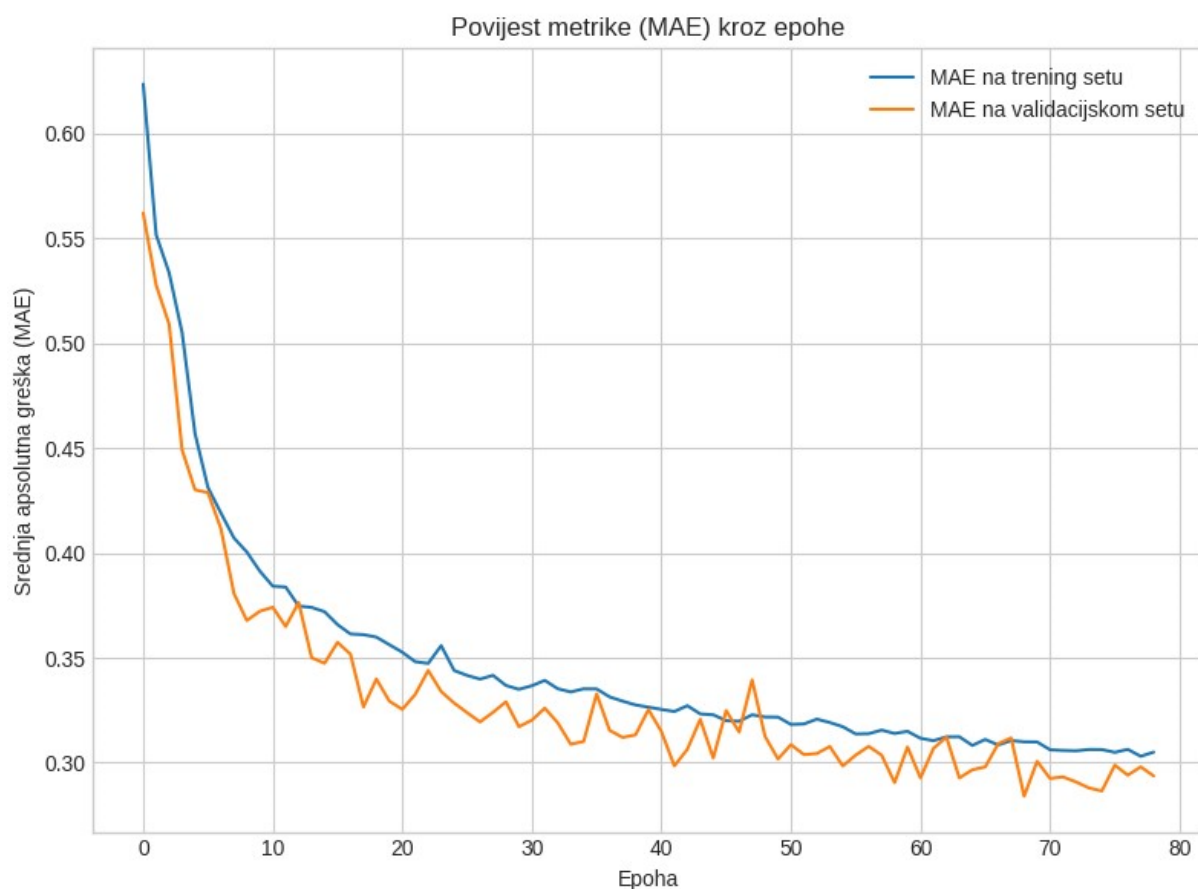
koeficijenta determinacije R^2 izvršena je po svakom ciljanom parametru (ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P , AM , t_{m1} , T_j , s_{cr} , s_0).

Ovim metrikama provjerena je dinamika konvergencije i usklađenost treninga s validacijom (indikator prenaučenosti). Budući da je primijenjena tehnika brze obustave (engl. *early stopping*), zadržana je epoha s najmanjim validacijskim gubitkom, čime je poboljšana generalizacija.

Slika 53 i Slika 54 prikazuju krivulje MSE gubitka (srednje kvadratne pogreške) i MAE (srednje apsolutne pogreške) po epohama, posebno za trening i za validacijski uzorak.



Slika 53: Povijest metrike srednje kvadratne pogreške (MSE) kroz epohe za treniranje mreže na tropolne kvarove



Slika 54: Povijest metrike srednje apsolutne pogreške (*MAE*) kroz epohe za treniranje mreže na trole kvarove

Konačne metrike testnog uzorka prikazane su u Tablici 17. Prikazane vrijednosti pokazuju efikasnost modela i relativno malo odstupanje od stvarnih vrijednosti.

Tablica 17: Konačne metrike na testnom uzorku za treniranje mreže na trole kvarove

Konačne metrike na testnom uzorku	
Srednja kvadratna pogreška <i>MSE</i>	0.2286
Srednja apsolutna pogreška <i>MAE</i>	0.2840

Koeficijent determinacije R^2 za svaki izlazni parametar prikazan je u Tablici 18.

Tablica 18: Koeficijent determinacije R^2 za svaki izlazni parametar za treniranje mreže na trole kvarove

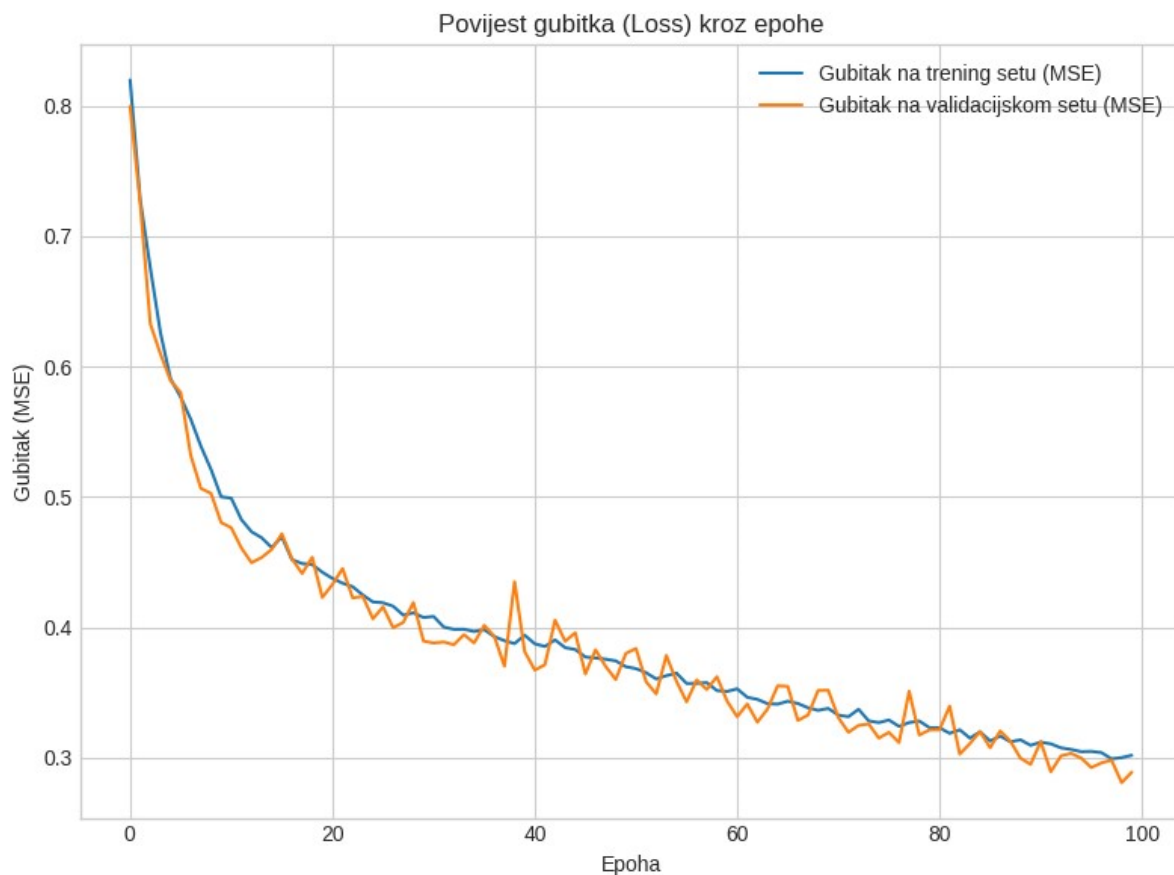
Izlazni parametar	Koeficijent determinacije R^2
ZIP_Z	0.5385
ZIP_I	0.0752
ZIP_P	0.8448
AM	0.9932
t_{m1}	0.7561
T_j	0.9770
s_{cr}	0.9841
s_0	0.9855

Za pet izlaznih parametara koeficijent R^2 ima odlične vrijednosti, za jedan parametar (t_{m1}) vrlo dobre, jedan parametar (ZIP_Z) ima upitne vrijednosti a parametar ZIP_I ima jako lošu vrijednost.

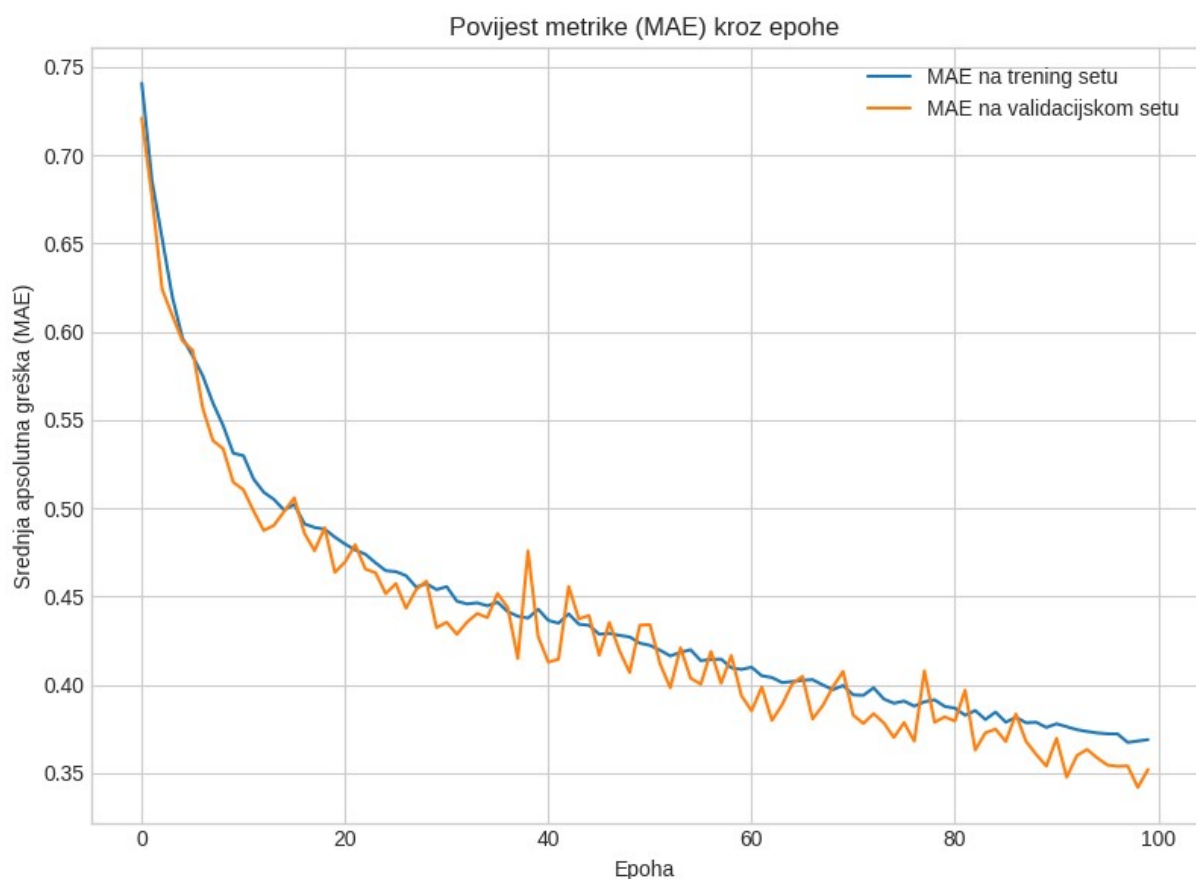
8.1.2. Pokazatelji točnosti rezultata metode za manipulacije regulacijskom sklopkom

Nakon uspješno provedenog razvoja i treninga BiLSTM modela, izvršena je evaluacija modela korištenjem testnog seta (20% od ukupnog broja) podataka koje model nije vidio tijekom treniranja. Radi procjene performansi modela dubokog učenja, za potrebe određivanja parametara električnog opterećenja, korištene su metrike evaluacije MSE , MAE i R^2 . Procjena koeficijenta determinacije R^2 izvršena je po svakom ciljanom parametru (ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P , AM , t_{m1} , T_j , s_{cr} , s_0).

Slika 55 i Slika 56 prikazuju krivulje MSE gubitka (srednje kvadratne pogreške) i MAE (srednje apsolutne pogreške) po epohama, posebno za trening i za validacijski uzorak.



Slika 55: Povijest metrike srednje kvadratne pogreške (MSE) kroz epohe za treniranje na manipulacije regulacijskom sklopkom



Slika 56: Povijest metrike srednje apsolutne pogreške (*MAE*) kroz epohe za treniranje na manipulacije regulacijskom sklopom

Konačne metrike na testnom uzorku prikazane su u Tablici 19. Prikazane vrijednosti pokazuju efikasnost modela i relativno malo odstupanje od stvarnih vrijednosti.

Tablica 19: Konačne metrike na testnom uzorku za treniranje mreže na manipulacije regulacijskom sklopom

Konačne metrike na testnom uzorku	
Srednja kvadratna pogreška <i>MSE</i>	0.2808
Srednja apsolutna pogreška <i>MAE</i>	0.3419

Ovim metrikama provjerena je dinamika konvergencije i usklađenost treninga s validacijom (indikator prenaučivosti). Budući da je primijenjena tehnika brze obustave (engl. *early*

stopping), zadržana je epoha s najmanjim validacijskim gubitkom, čime je poboljšana generalizacija.

Koeficijent determinacije R^2 za svaki izlazni parametar prikazan je u Tablici 20.

Za četiri izlazna parametra koeficijent R^2 ima odlične vrijednosti, za dva parametra (ZIP_Z i ZIP_P) vrlo dobre, jedan parametar (t_{m1}) ima upitnu vrijednost, a parametar ZIP_I ima jako lošu vrijednost.

Tablica 20: Koeficijent determinacije R^2 za svaki izlazni parametar za treniranje mreže na manipulacije regulacijskom sklopom

Izlazni parametar	Koeficijent determinacije R^2
ZIP_Z	0.6967
ZIP_I	0.0410
ZIP_P	0.6949
AM	0.9854
t_{m1}	0.4718
T_j	0.9302
s_{cr}	0.9614
s_0	0.9591

8.2. Primjena stvarnih kvarova u predikciji parametara električnog opterećenja

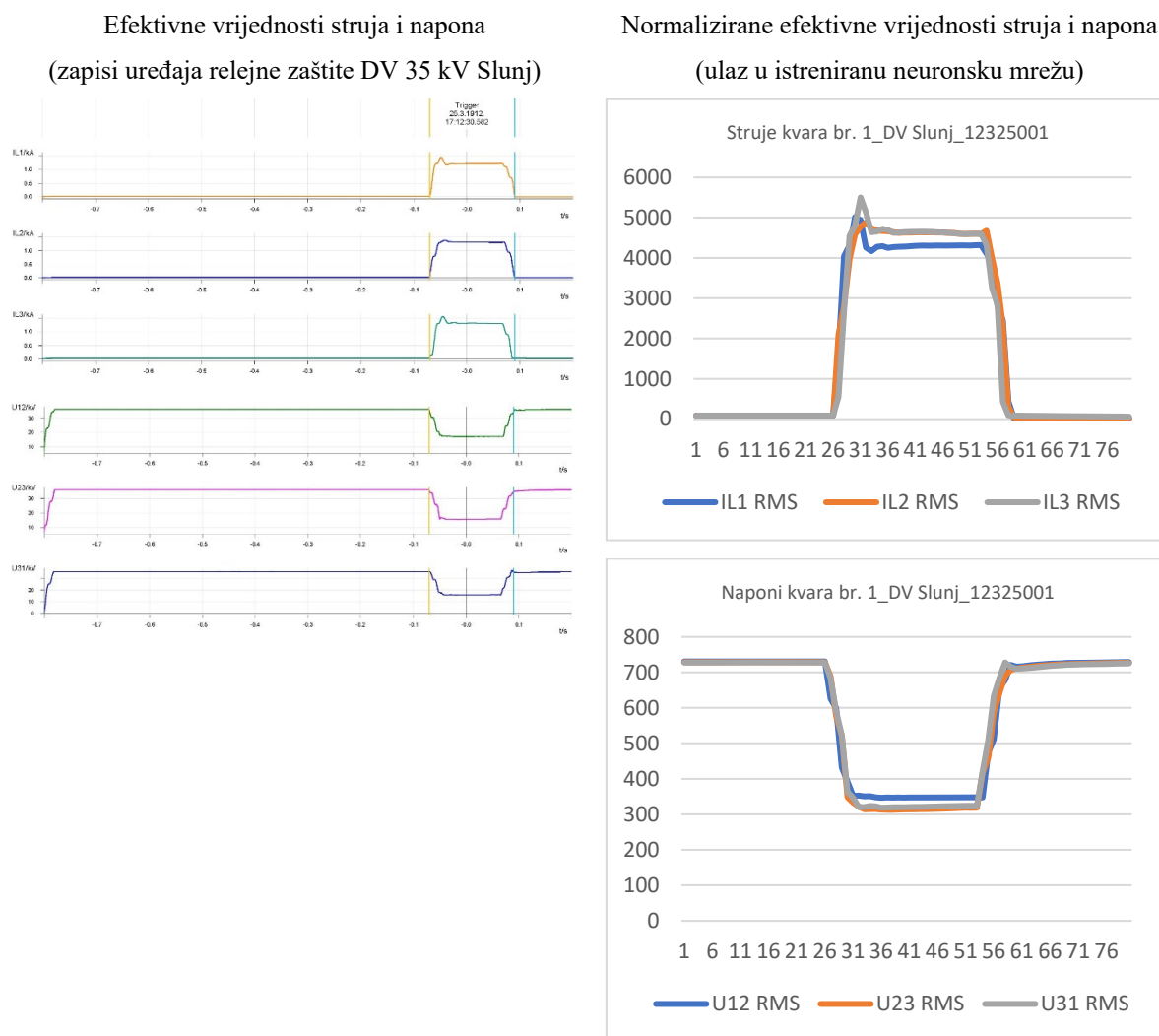
U ovom poglavlju će se dati usporedni prikaz kvarova koje su zabilježili uređaji relejne zaštite 35 kV dalekovoda DV Gojak i DV Slunj sa oblicima struja i napona koji su bili ulazni podatak istreniranoj neuronskoj mreži za predviđanje parametara električnog opterećenja. Radi se o zapisima stvarnih kvarova koji su najvjerojatnije posljedica udara groma u dalekovod. Tri kvara nastala su tijekom ljeta, jedan u rano, i jedan u kasno proljeće (pretpostavka na osnovu iskustva autora u radu sa tipom uređaja relejne zaštite koji se koriste u 35 kV postrojenju TS Oštarije i zapisima kvarova, uvažavajući problem gubitka vremenske sinkronizacije), kada je pojava jakih grmljavinskih nevremena na području na kojem je locirana TS Oštarije i njen 35 kV rasplet relativno česta.

Usporedni prikaz sadrži efektivne vrijednosti stvarnih faznih struja i linijskih napona za vrijeme kvarova, i normalizirane vrijednosti efektivnih vrijednosti faznih struja i linijskih napona koji su bili ulazni parametar za istreniranu neuronsku mrežu. Na prikazima se jasno vide identični oblici faznih struja i napona tijekom vremena. Na kraju ovog rada, u poglavlju PRILOZI, dani su kompletni zapisi svih 5 kvarova u efektivnim i trenutnim vrijednostima, sa uključenim analognim i digitalnim signalima.

Trajanje pojedinih kvarova varira u iznosu od najmanje 100 do najviše 200 ms, od trenutka nastanka kvara, do potpunog prekida toka struje. Vrijeme trajanja kvara ovisi o podešenju zaštitne funkcije unutar uređaja relejne zaštite čija je zadaća otklanjanje kvara, kao i o prilikama u elektroenergetskoj mreži (različita uklopna stanja, različite strane napajanja kvara, i sl.). Za provjeru rada istrenirane neuronske mreže koristiti će se tropolni kvarovi trajanja 100, 110, 150, 160 i 200 ms. Djelovanje uređaja relejne zaštite na prekidače (u smislu iniciranja automatskog ponovnog uključanja ili naloga za definitivni isklop) ovdje se ne razmatra. Predmet razmatranja je isključivo predikcija ciljanih parametara opterećenja od strane istrenirane neuronske mreže na valne oblike struja i napona za vrijeme stvarnih kvarova u promatranoj elektroenergetskoj mreži, koji se očito razlikuju od idealno simetričnih kvarova na kojima je trenirana neuronska mreža.

8.2.1. Stvarni kvar br. 1

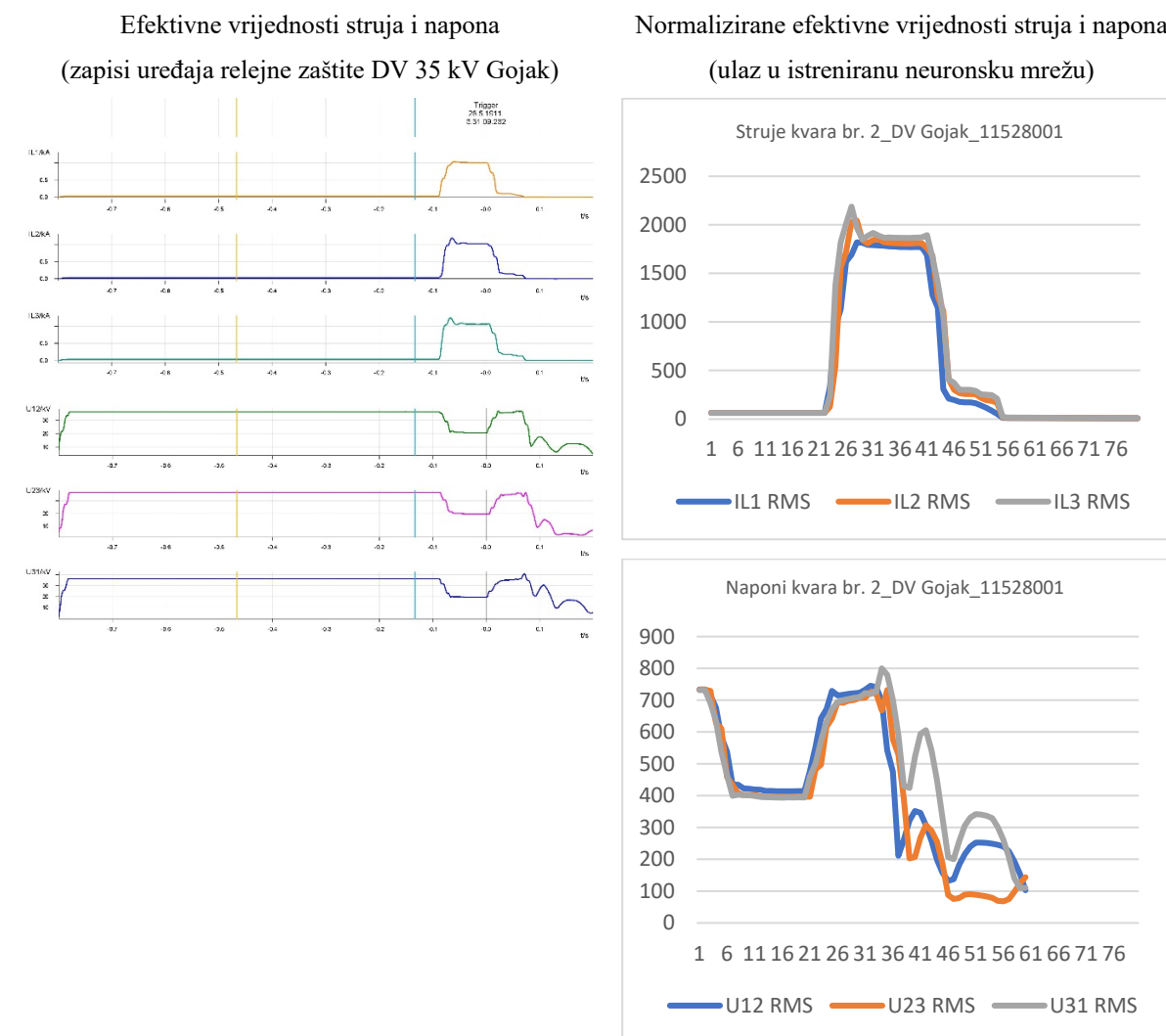
U ovom poglavlju prikazani su valni oblici prvog kvara koji se koristi za verifikaciju. Radi se o kvaru na DV 35 kV Slunj, interne oznake 12325001 unutar uređaja relejne zaštite ovog dalekovoda.



Slika 57: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 1 (DV 35 kV Slunj)

8.2.2. Stvarni kvar br. 2

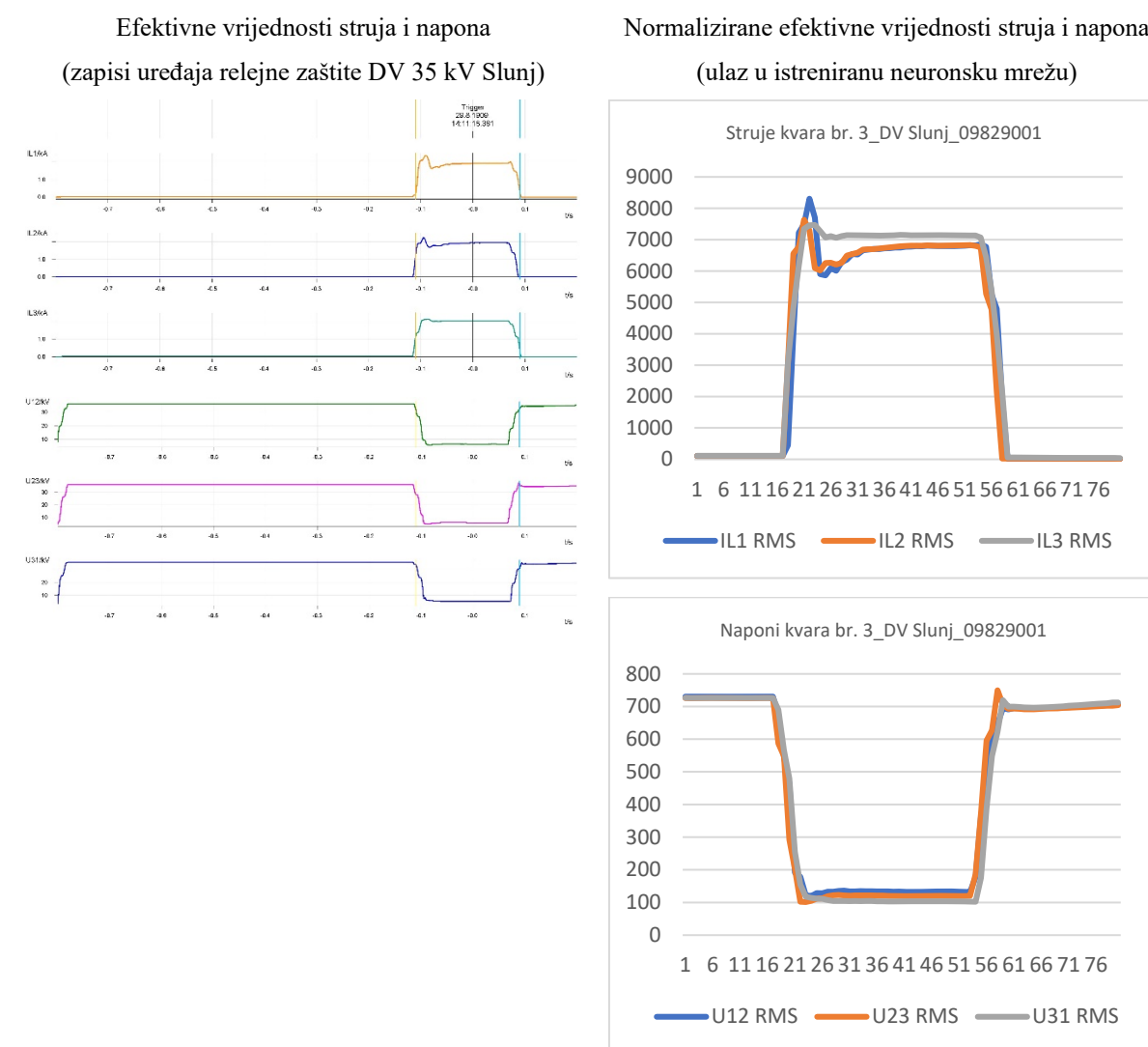
U ovom poglavlju prikazani su valni oblici drugog kvara koji se koristi za verifikaciju. Radi se o kvaru na DV 35 kV Gojak, interne oznake 11528001 unutar uređaja relejne zaštite ovog dalekovoda.



Slika 58: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 2 (DV 35 kV Gojak)

8.2.3. Stvarni kvar br. 3

U ovom poglavlju prikazani su valni oblici trećeg kvara koji se koristi za verifikaciju. Radi se o kvaru na DV 35 kV Slunj, interne oznake 09829001 unutar uređaja relejne zaštite ovog dalekovoda.

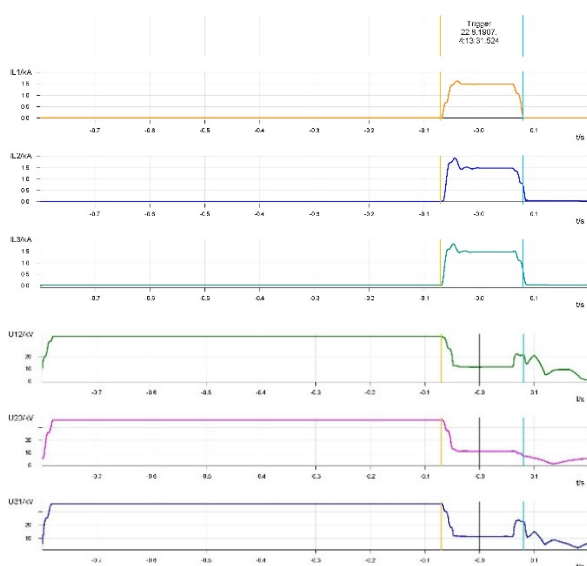


Slika 59: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 3 (DV 35 kV Slunj)

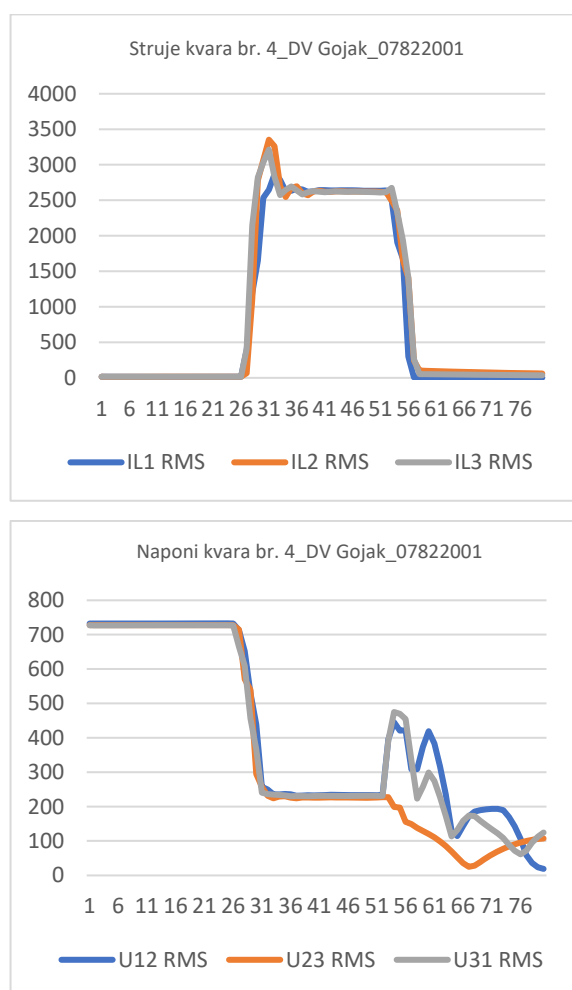
8.2.4. Stvarni kvar br. 4

U ovom poglavlju prikazani su valni oblici drugog kvara koji se koristi za verifikaciju. Radi se o kvaru na DV 35 kV Gojak, interne oznake 07822001 unutar uređaja relejne zaštite ovog dalekovoda.

Efektivne vrijednosti struja i napona
(zapisi uređaja relejne zaštite DV 35 kV Gojak)



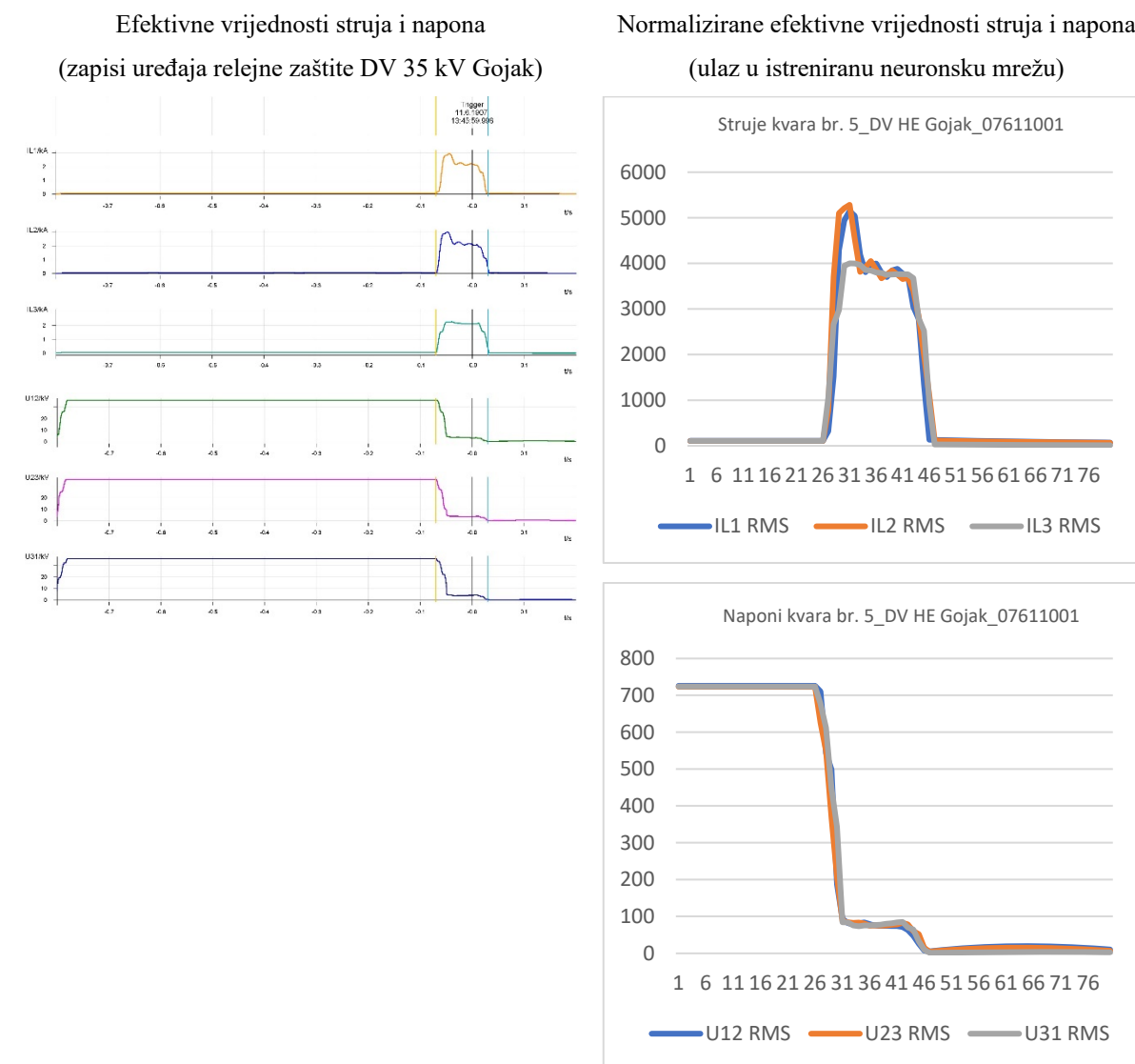
Normalizirane efektivne vrijednosti struja i napona
(ulaz u istreniranu neuronsku mrežu)



Slika 60: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 4 (DV 35 kV Gojak)

8.2.5. Stvarni kvar br. 5

U ovom poglavlju prikazani su valni oblici drugog kvara koji se koristi za verifikaciju. Radi se o kvaru na DV 35 kV Gojak, interne oznake 07611001 unutar uređaja relejne zaštite ovog dalekovoda.



Slika 61: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 5 (DV 35 kV Gojak)

8.2.6. Predikcije ciljanih vrijednosti na osnovu stvarnih kvarova

U ovom poglavlju prikazano je 8 ciljanih parametara električnog opterećenja koje je istrenirana neuronska mreža predviđela na osnovu stvarnih kvarova. Uzeti su stvarni kvarovi br. 2, br. 4 i br. 5 iz prethodnih poglavlja koji su zabilježeni na DV 35 kV Gojak, te je na osnovu tih kvarova izvršena predikcija parametara električnog opterećenja za stvarne kvarove br. 1 i br. 3 koji su zabilježeni na DV 35 kV Slunj. Pretpostavljeni su ovi ulazni parametri:

- $ZIP_Z = 0,27$
- $ZIP_I = 0,62$
- $ZIP_P = 0,11$
- $s_{cr} = 5,2 \%$
- $s_0 = 1,2 \%$
- $t_{m1} = 2,0$
- $T_j = 0,6$
- $AM = 66 \%$

Parametri statičkog dijela opterećenja proizvoljno su odabrani, a parametri dinamičkog dijela opterećenja odabrani su iz [1]. Predikcija parametara prikazana je u Tablici 21.

Tablica 21: Vrijednosti predikcija ciljanih parametara opterećenja na osnovu stvarnih kvarova

stvarni kvar br.	ZIP_Z	ZIP_I	ZIP_P	AM	t_{m1}	T_j	s_{cr}	s_0
1	0,1736	0,4633	0,3740	68,1423	2,5333	0,3453	10,0039	1,3710
3	0,1823	0,4314	0,3955	65,0837	2,9521	1,1735	11,4047	1,5070

8.3. Primjena stvarnih manipulacija regulacijskom sklopkom u predikciji parametara električnog opterećenja

U ovom poglavlju će se dati usporedni prikaz zapisa uređaja za mjerenje kvalitete električne energije za vrijeme manipulacija regulacijskom sklopkom sa oblicima struja i napona koje su bile ulazni podatak za predviđanje parametara električnog opterećenja. Zbog velike količine podataka, kao i zbog simetrije struja i napona, prikazane su samo struja i napon faze R u obliku vremenskih nizova. Iste prilike vrijede za ostale dvije faze, uz odgovarajući fazni pomak.

U usporedbi će se redom dati snimka zaslona (engl. *screenshot*) SCADA sustava HOPS-a na kojem su vidljivi nalozi za manipulacije regulacijskom sklopkom, zatim prikaz efektivnih vrijednosti stvarnog napona i struje faze R, te konačno prikaz efektivnih vrijednosti napona i struje faze R koji su bili ulazni parametar za istreniranu neuronsku mrežu. Na prikazima se vide identični oblici faznih struja i napona tijekom vremena.

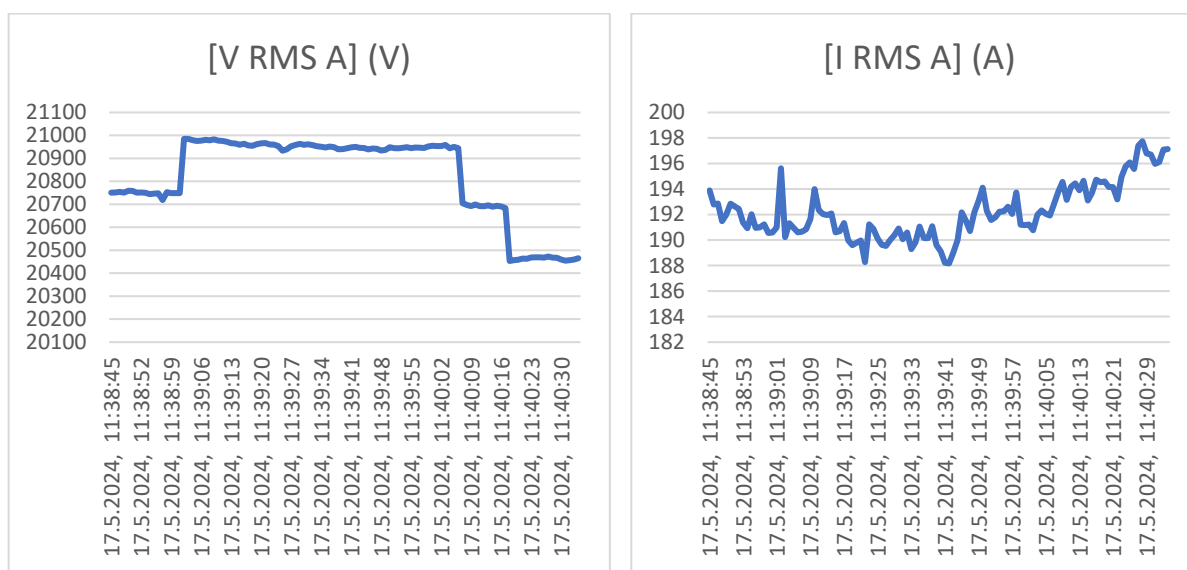
Uzorci br. 1, 2, 6, 8 i 9 prikazuju simulacije po principu „jedan položaj više – dva položaja niže“, uzorak br. 3 prikazuje simulaciju po principu „dva položaja više – jedan položaj niže“, a uzorci br. 4, 5 i 7 prikazuju simulaciju po principu „jedan položaj više – jedan položaj niže“. S obzirom da su transformatori na kojima su vršene manipulacije regulacijskom sklopkom vlasništvo HOPS-a, operater sustava HOPS-a vrši gore opisane manipulacije na zahtjev dispečera Elektre Karlovac. Do odstupanja od dogovorenih principa u manipuliranju regulacijskom sklopkom vjerojatno je došlo zbog pogonskih prilika u elektroenergetskim mrežama kojima upravljaju dispečer Elektre Karlovac, odnosno operater sustava HOPS-a, ali za ovo istraživanje to ne predstavlja problem nego samo dodatni test za istreniranu neuronsku mrežu.

Struje i naponi faze R zabilježeni uređajem za mjerenje kvalitete električne energije tijekom manipulacija regulacijskom sklopkom prikazane su u stvarnim fizikalnim vrijednostima, dok su struje i naponi faze R, koji predstavljaju ulazni podatak za istreniranu neuronsku mrežu, prikazani u normaliziranim vrijednostima.

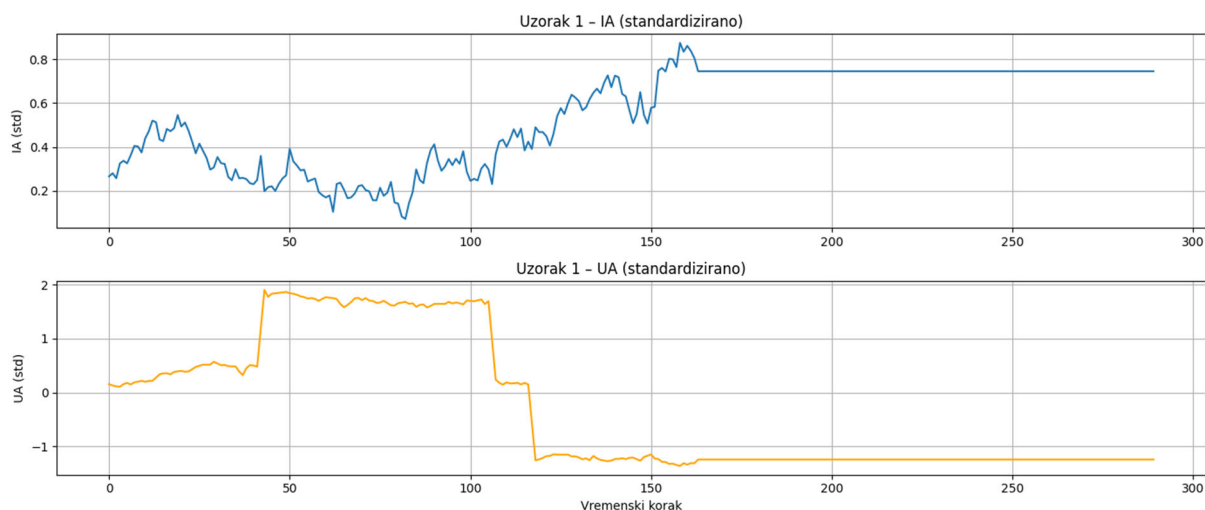
8.3.1. Uzorak br. 1

2024-05-17 11:38:47:150	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-17 11:38:48:144	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO
2024-05-17 11:39:00:370	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	VIŠE -Naredba
2024-05-17 11:40:05:138	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-17 11:40:16:313	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-17 11:40:32:374	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-17 11:40:33:278	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI

Slika 62: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 1



Slika 63: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 1

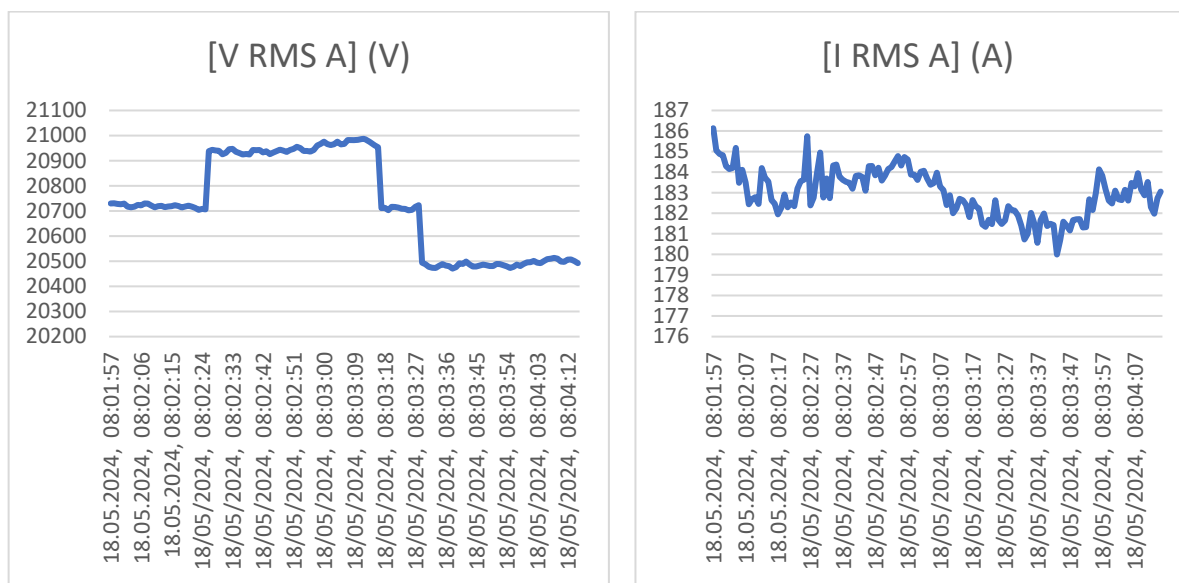


Slika 64: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 1

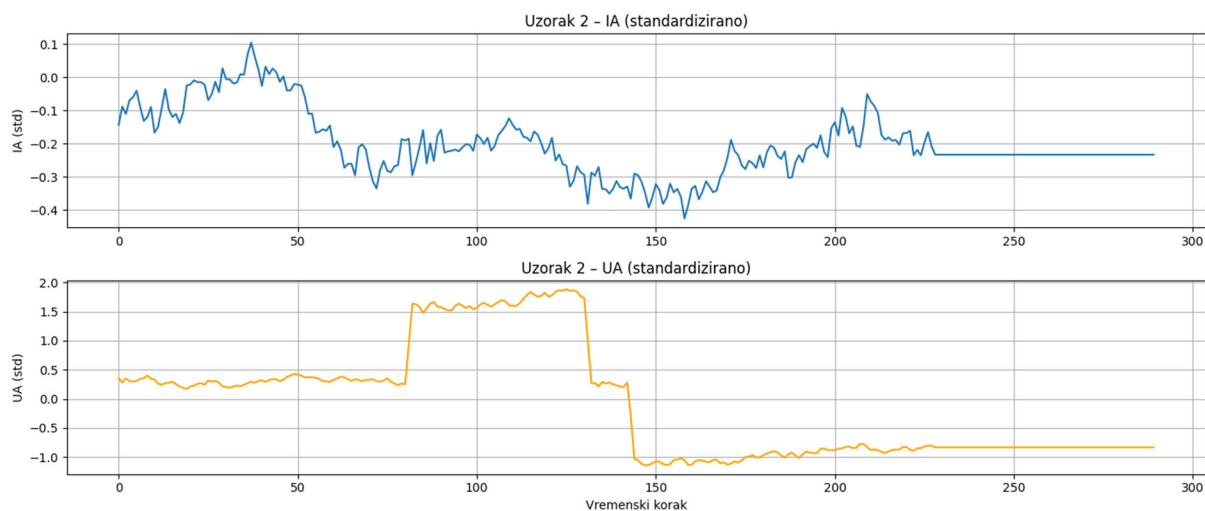
8.3.2. Uzorak br. 2

2024-05-18 08:01:57:459	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	AUTOM	RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-18 08:01:58:457	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	AUTOM	RUČNO	RUČNO
2024-05-18 08:02:24:607	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA			VIŠE -Naredba
2024-05-18 08:03:14:515	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA			NIŽE -Naredba
2024-05-18 08:03:27:264	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA			NIŽE -Naredba
2024-05-18 08:04:10:509	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	AUTOM	RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-18 08:04:11:412	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	AUTOM	RUČNO	AUTOMATSKI

Slika 65: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 2



Slika 66: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 2

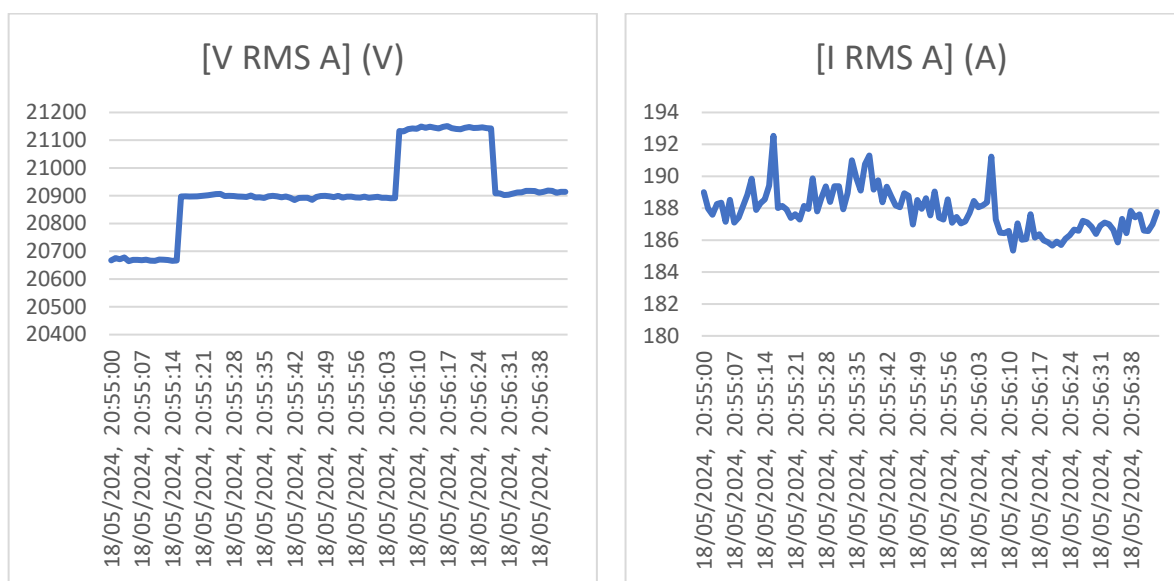


Slika 67: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 2

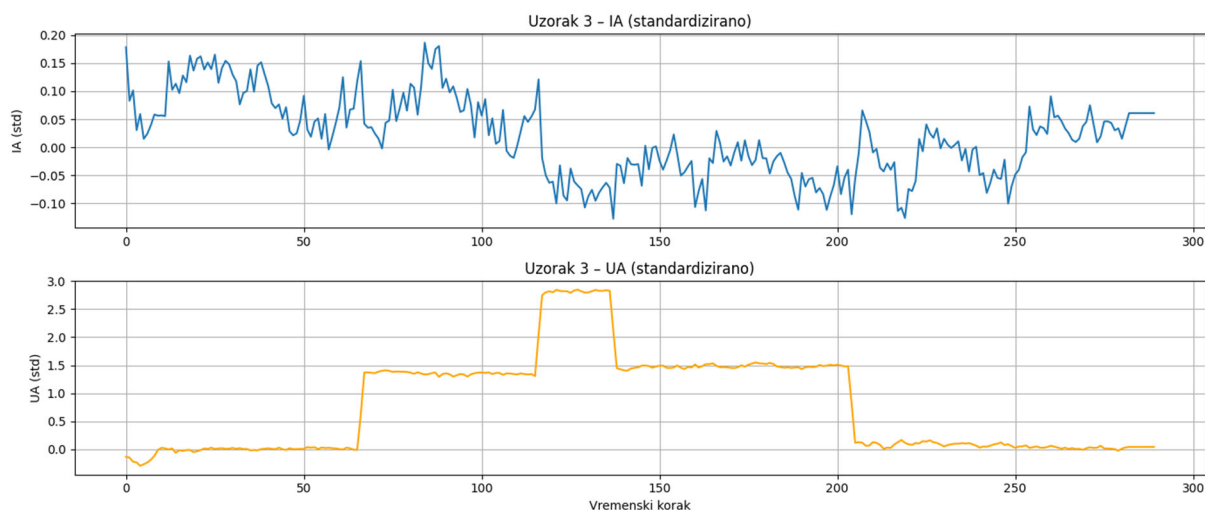
8.3.3. Uzorak br. 3

2024-05-18 20:55:01:285	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	AUTOM	RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-18 20:55:02:115	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	AUTOM	RUČNO	RUČNO
2024-05-18 20:55:14:166	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA			VIŠE -Naredba
2024-05-18 20:56:04:712	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA			VIŠE -Naredba
2024-05-18 20:56:25:738	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA			NIŽE -Naredba
2024-05-18 20:56:42:561	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	AUTOM	RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-18 20:56:43:364	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	AUTOM	RUČNO	AUTOMATSKI

Slika 68: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 3



Slika 69: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 3

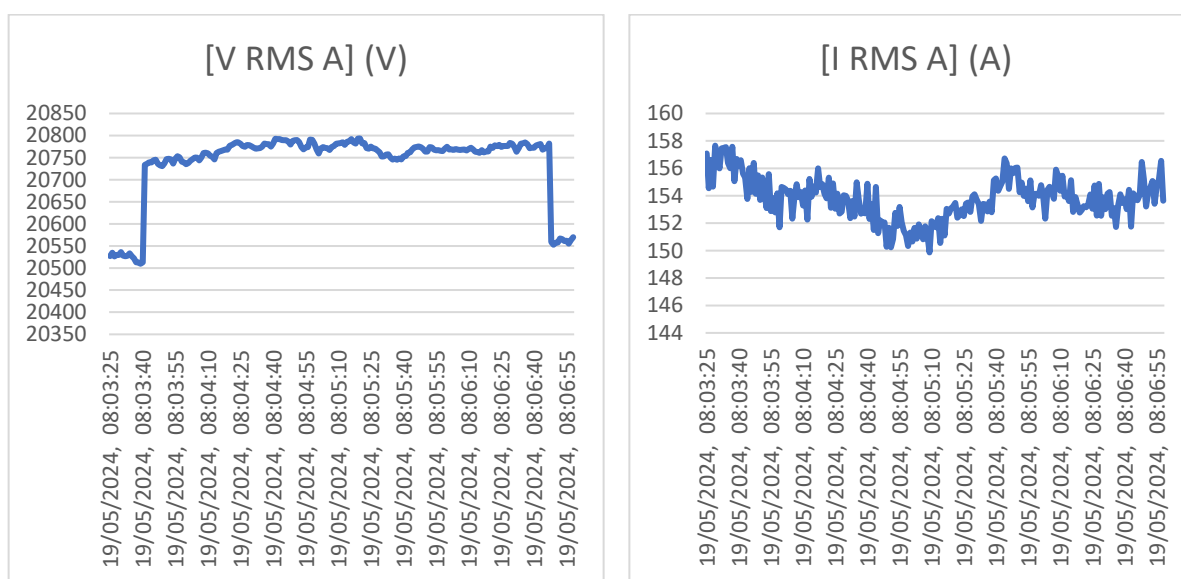


Slika 70: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 3

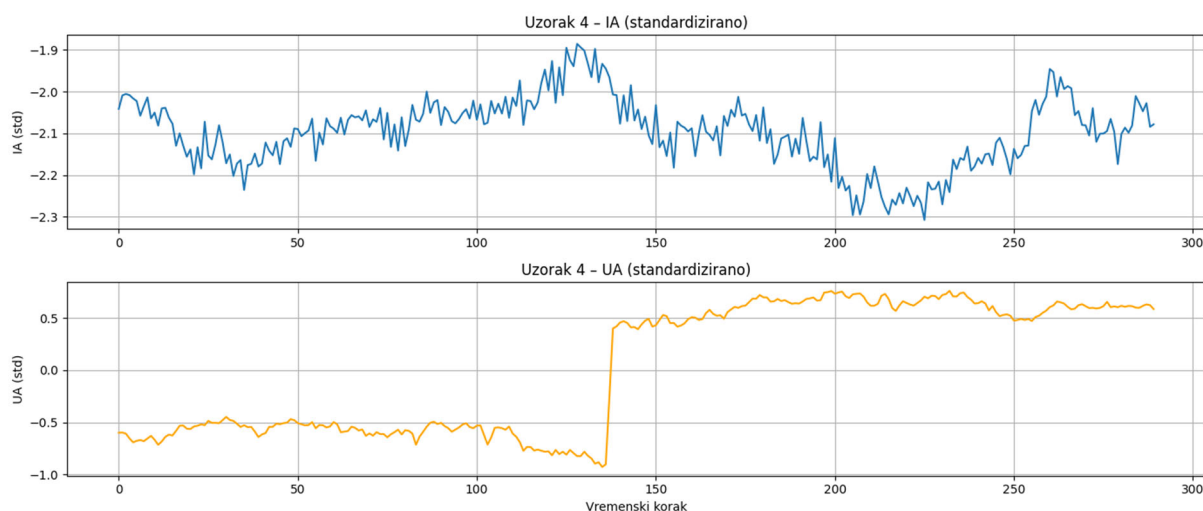
8.3.4. Uzorak br. 4

2024-05-19 08:03:26:619	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-19 08:03:27:622	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO
2024-05-19 08:03:39:506	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA	VIŠE -Naredba
2024-05-19 08:04:13:724	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-19 08:04:14:637	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI
2024-05-19 08:06:38:266	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-19 08:06:39:187	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO
2024-05-19 08:06:45:808	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-19 08:06:57:270	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-19 08:06:58:216	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI

Slika 71: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 4



Slika 72: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 4

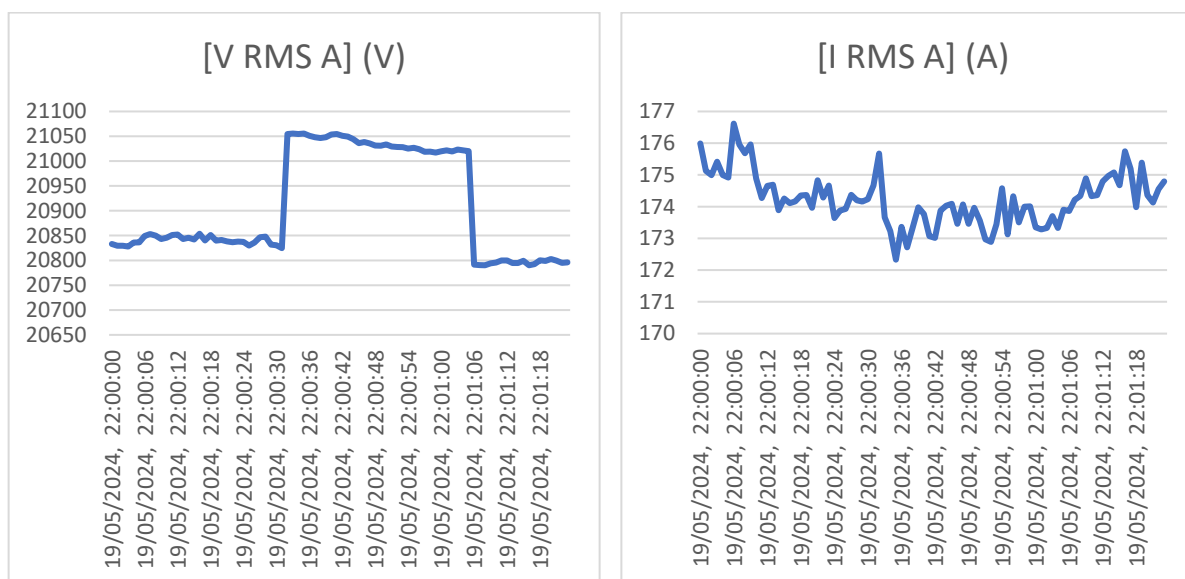


Slika 73: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 4

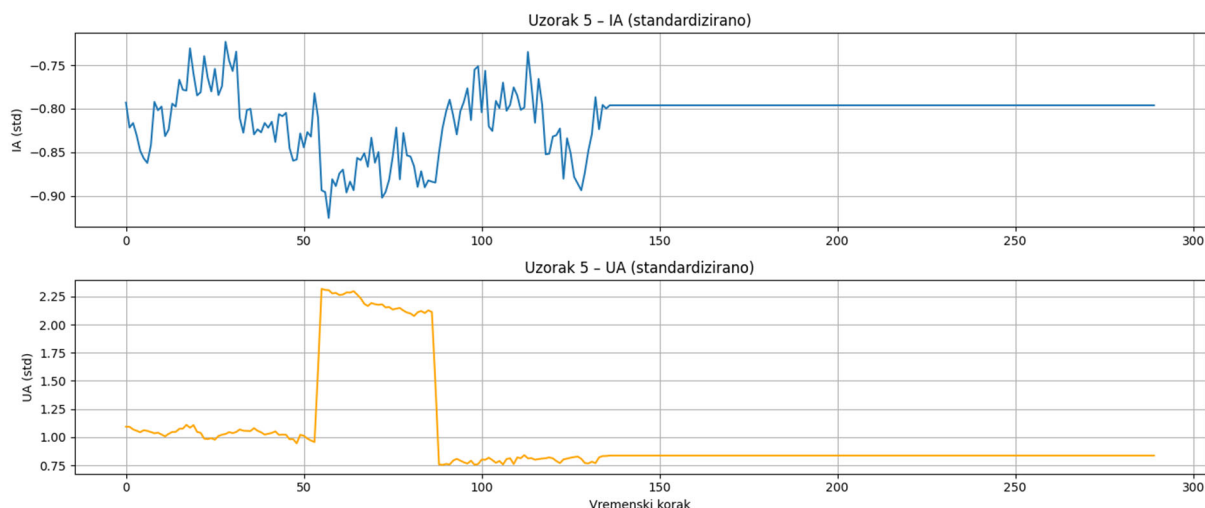
8.3.5. Uzorak br. 5

2024-05-19 22:00:19:414	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-19 22:00:20:469	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO
2024-05-19 22:00:29:971	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	VIŠE -Naredba
2024-05-19 22:01:04:196	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-19 22:01:18:673	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-19 22:01:19:558	OŠTARI	110/35	TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI

Slika 74: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 5



Slika 75: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 5

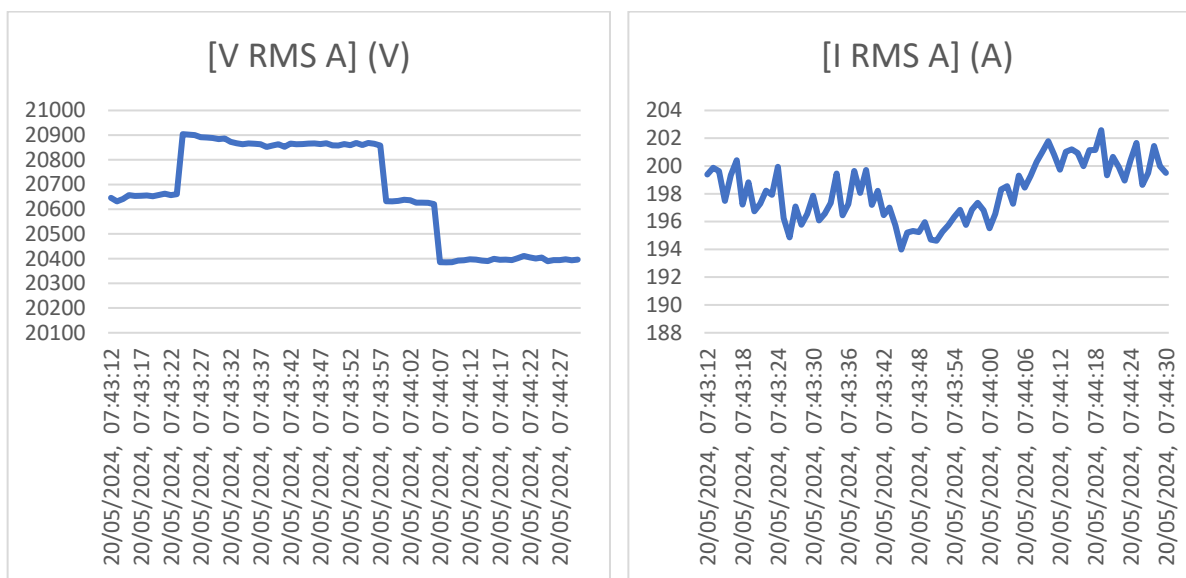


Slika 76: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 5

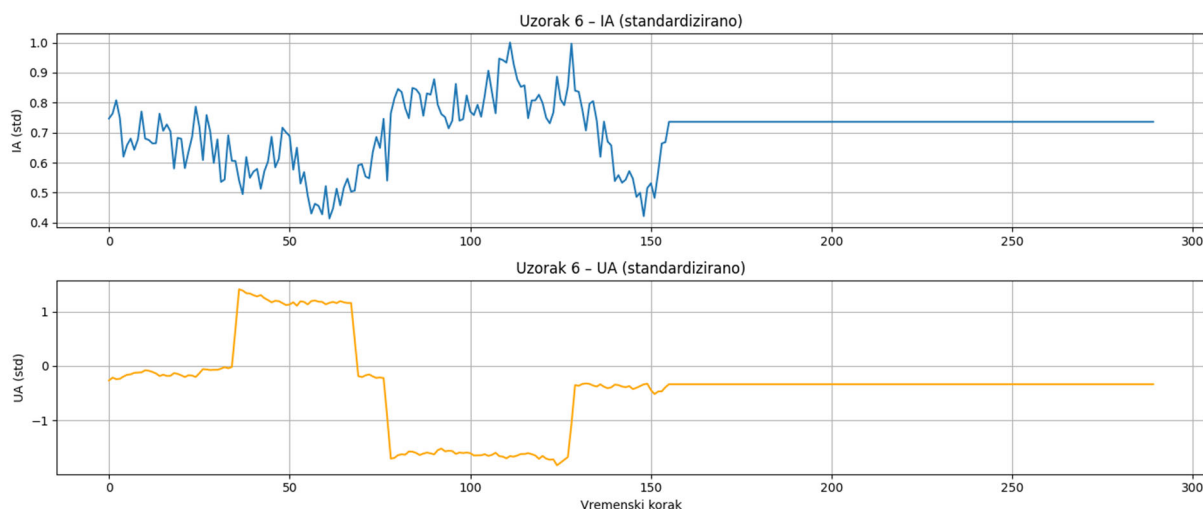
8.3.6. Uzorak br. 6

2024-05-20 07:43:12:979	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-20 07:43:13:996	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO
2024-05-20 07:43:22:254	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA	VIŠE -Naredba
2024-05-20 07:43:55:348	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-20 07:44:04:614	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-20 07:44:27:563	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-20 07:44:28:636	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI

Slika 77: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 6



Slika 78: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 6

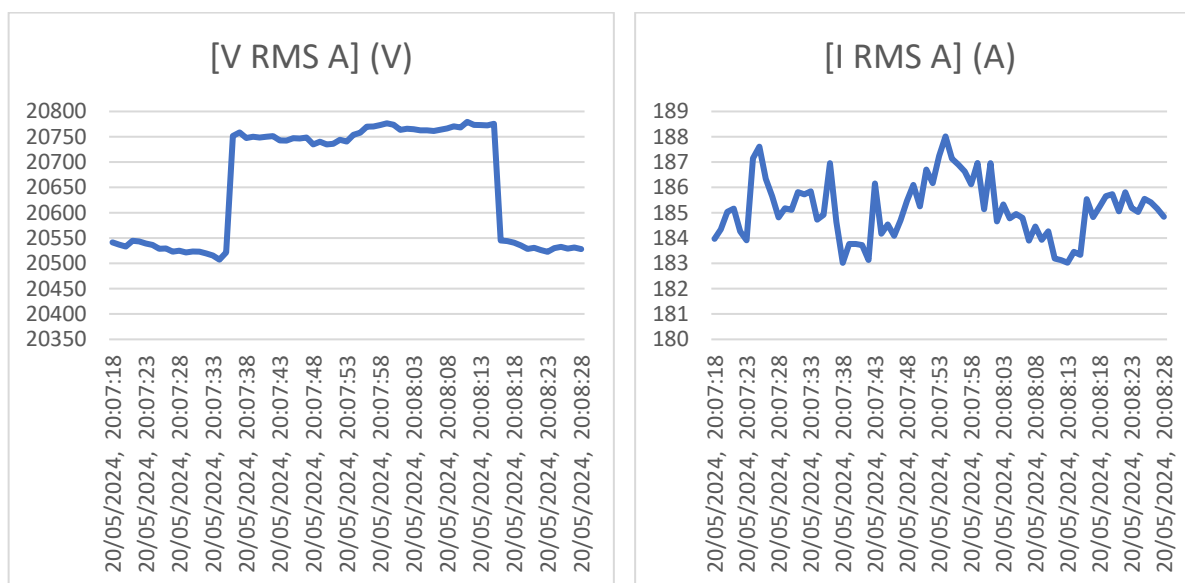


Slika 79: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 6

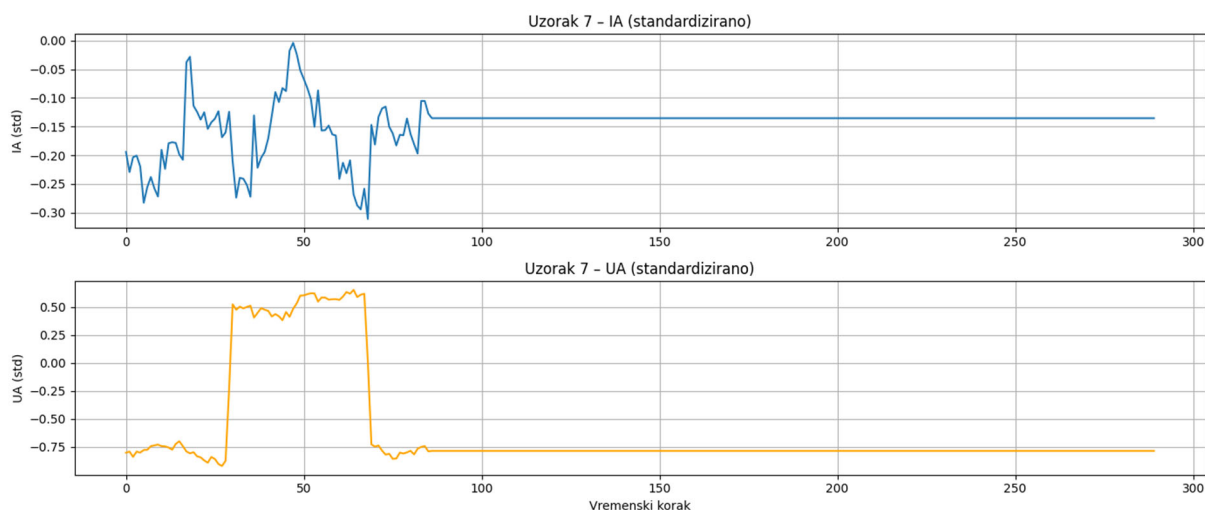
8.3.7. Uzorak br. 7

2024-05-20 20:07:20:785	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-20 20:07:21:902	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO
2024-05-20 20:07:34:370	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA	VIŠE -Naredba
2024-05-20 20:08:14:154	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-20 20:08:26:595	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-20 20:08:27:620	OŠTARI 110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI

Slika 80: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 7



Slika 81: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 7

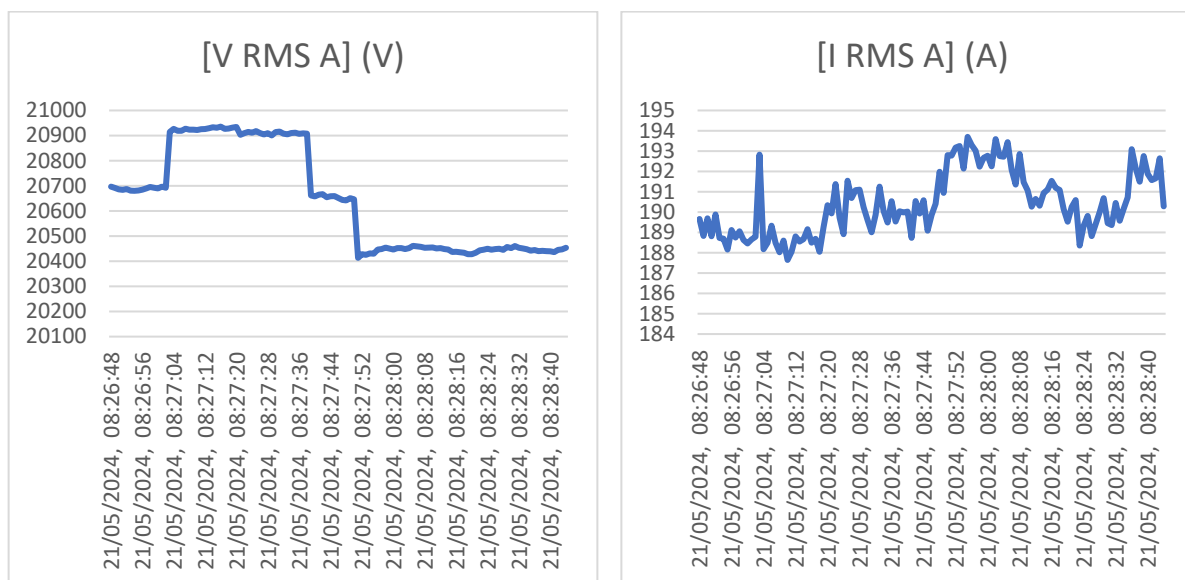


Slika 82: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 7

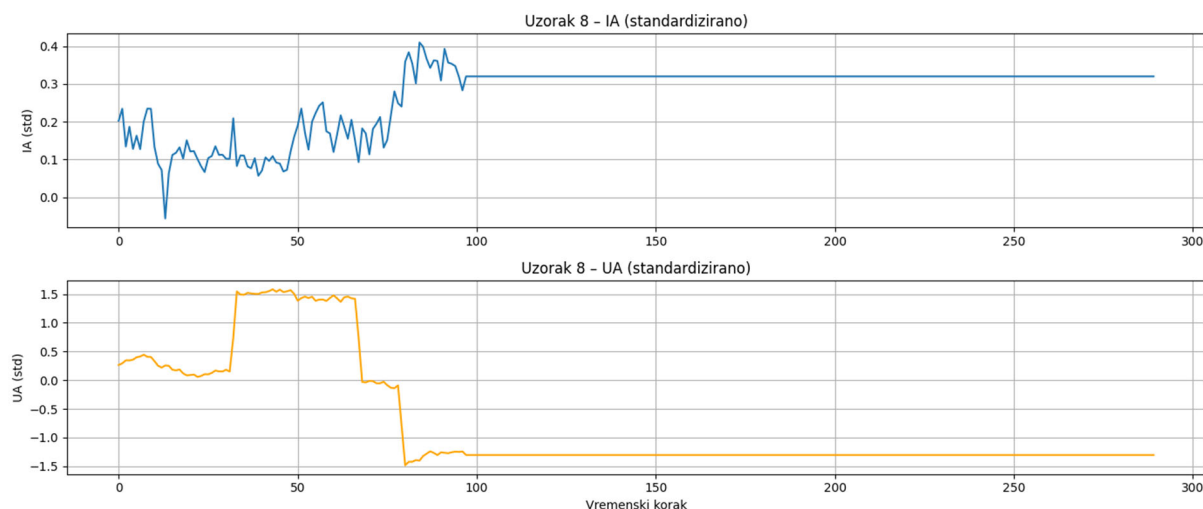
8.3.8. Uzorak br. 8

2024-05-21 08:26:48:782	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-21 08:26:49:698	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO
2024-05-21 08:27:01:650	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA	VIŠE -Naredba
2024-05-21 08:27:36:459	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-21 08:27:48:496	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-21 08:28:41:565	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-21 08:28:42:393	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI

Slika 83: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 8



Slika 84: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 8

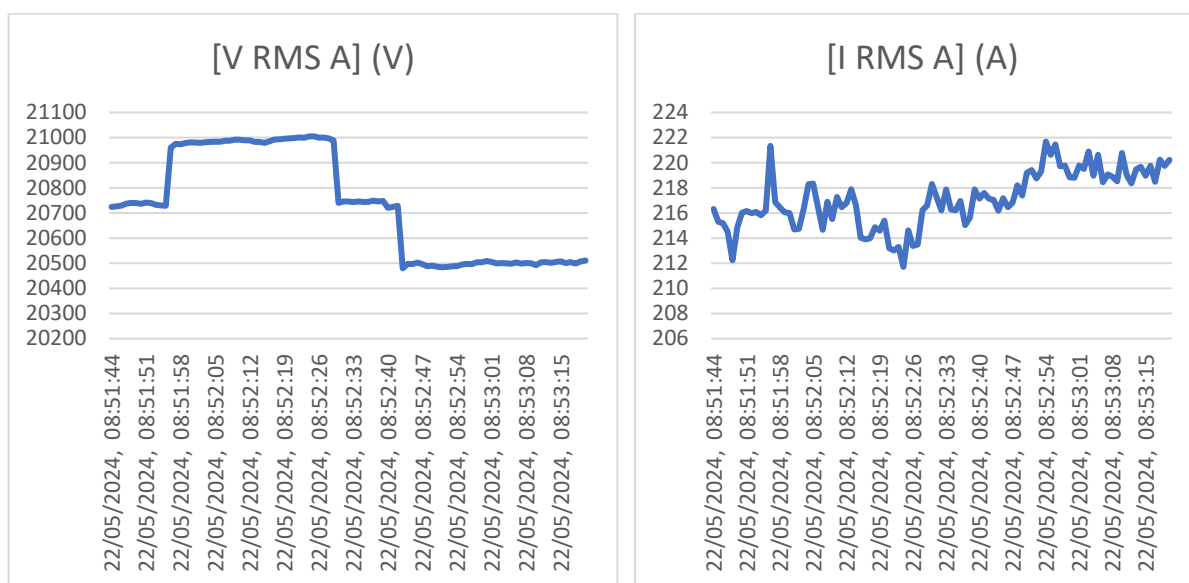


Slika 85: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 8

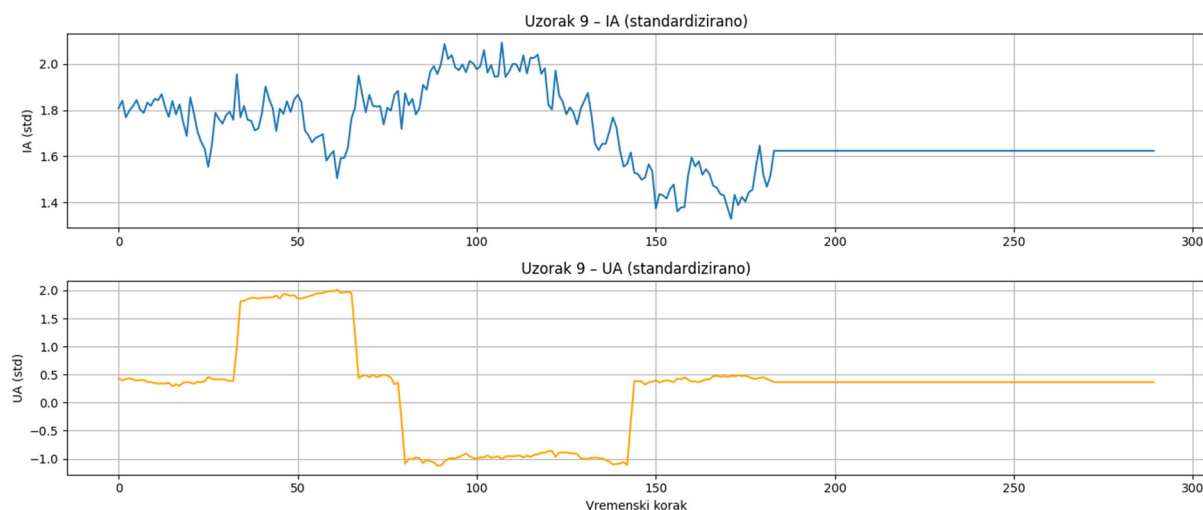
8.3.9. Uzorak br. 9

2024-05-22 08:51:44:346	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO -Naredba
2024-05-22 08:51:45:434	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	RUČNO
2024-05-22 08:51:54:113	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA	VIŠE -Naredba
2024-05-22 08:52:27:710	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-22 08:52:40:488	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA	NIŽE -Naredba
2024-05-22 08:53:18:594	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI -Naredba
2024-05-22 08:53:19:650	OŠTARI	110/35 TR2	REGULACIJA AUTOM RUČNO	AUTOMATSKI

Slika 86: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 9



Slika 87: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 9



Slika 88: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 9

8.3.10. Predikcije ciljanih vrijednosti na osnovu stvarnih manipulacija regulacijskom sklopkom

U ovom poglavlju prikazano je 8 ciljanih parametara električnog opterećenja koje je istrenirana neuronska mreža predviđela na osnovu stvarnih manipulacija regulacijskom sklopkom. Uzete su stvarne manipulacije oznaka Uzorak br. 1, br. 2, br. 3, br. 4 i br. 5 iz prethodnih poglavlja, te je na osnovu tih manipulacija izvršena predikcija parametara električnog opterećenja za stvarne manipulacije regulacijskom sklopkom oznaka Uzorak br. 6, br. 7, br. 8 i br. 9. Kao i u slučaju stvarnih kvarova, pretpostavljeni su ovi ulazni parametri:

- $ZIP_Z = 0,27$
- $ZIP_I = 0,62$
- $ZIP_P = 0,11$
- $s_{cr} = 5,2 \%$
- $s_0 = 1,2 \%$
- $t_{m1} = 2,0$
- $T_j = 0,6$
- $AM = 66 \%$

Parametri statičkog dijela opterećenja proizvoljno su odabrani, a parametri dinamičkog dijela opterećenja odabrani su iz [1]. Predikcija parametara prikazana je u Tablici 22.

Tablica 22: Vrijednosti predikcija ciljanih parametara opterećenja na osnovu stvarnih manipulacija regulacijskom sklopkom

Uzorak br.	ZIP_Z	ZIP_I	ZIP_P	AM	t_{m1}	T_j	s_{cr}	s_0
6	0,5725	-0,3951	0,6809	121,7351	-4,0290	3,9479	14,4080	5,8835
7	1,2709	0,1878	-0,5006	50,2480	1,8966	-0,8477	6,8880	-3,5511
8	0,0818	0,1245	0,7665	56,0223	-1,0888	3,9286	4,9083	3,1693
9	0,2726	-0,6583	1,2051	276,0686	-9,3735	0,1014	-5,7364	-1,7511

8.4. Analiza rezultata metode za određivanje parametara električnog opterećenja

U ovom poglavlju prikazana je usporedba vrijednosti metrika evaluacije MSE , MAE i R^2 , korištenih za procjenu performansi modela dubokog učenja, za sva tri opisana slučaja: prvi slučaj sa simulacijama koje se sastoje od trolnog kvara nakon kojeg slijedi manipulacija regulacijskom sklopkom transformatora po principu „jedan položaj gore – dva položaja dolje“, drugi slučaj sa simulacijama trolnog kvara, i treći slučaj sa simulacijama manipulacija regulacijskom sklopkom transformatora po principu „jedan položaj gore – dva položaja dolje“. Sva tri slučaja indeksirana su odgovarajućim brojevima radi usporedbe. Procjena koeficijenta determinacije R^2 izvršena je po svakom ciljanom parametru (ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P , AM , t_{m1} , T_j , S_{cr} , S_0).

U Tablici 23 prikazana je usporedba metrika evaluacije MSE i MAE za sva tri slučaja treniranja neuronske mreže. Načelno vrijedi da je model bolji što MSE i MAE metrike imaju nižu vrijednost jer se radi o metrikama koje zajedno mjere koliko su predviđanja parametara udaljena od njihovih stvarnih vrijednosti.

Tablica 23: Usporedba metrika evaluacije MSE i MAE za sva tri slučaja treniranja neuronske mreže

Metrike	Trening kvar + sklopka		Trening samo kvar		Trening samo sklopka	
MSE	MSE_1		MSE_2	$\frac{MSE_2}{MSE_1} [\%]$	MSE_3	$\frac{MSE_3}{MSE_1} [\%]$
	0,1396	/	0,2286	163,75	0,2808	201,15
MAE	MAE_1		MAE_2	$\frac{MAE_2}{MAE_1} [\%]$	MAE_3	$\frac{MAE_3}{MAE_1} [\%]$
	0,2221	/	0,2840	127,87	0,3419	153,94

Iz podataka u Tablici 23 vidljivo je da su najmanje vrijednosti metrika evaluacije MSE i MAE postignute prilikom prvog treniranja mreže. Najveće (i ujedno najlošije) vrijednosti ovih metrika dobivene su prilikom treniranja mreže samo na manipulacije regulacijskom sklopkom transformatora. Rezultati se mogu smatrati logičnima: u prvom slučaju neuronska mreža

trenirana je na najširem spektru ulaznih podataka koji uključuje raspon od minimalnih (manipulacija regulacijskom sklopkom transformatora) do maksimalnih (tropolni kvar) propada napona sa svim reperkusijama na priključeno opterećenje koje je opisano izrazima (19), (20) i (21).

U Tablici 24 prikazana je usporedba koeficijenta determinacije R^2 po svakom ciljanom parametru (ZIP_Z , ZIP_I , ZIP_P , AM , t_{m1} , T_j , s_{cr} , s_0) za sva tri slučaja treniranja neuronske mreže. Koeficijent determinacije R^2 mjeri koliko dobro model odgovara podacima, koliko dobro može predvidjeti buduće ishode, te koliko se varijacija u podacima može objasniti modelom. Vrijednost koeficijenta R^2 bliža jedinici znači da se model više podudara s promatranim podacima i pokazuje da je točniji u predviđanju budućih ishoda.

Tablica 24: Usporedba koeficijenta determinacije R^2 za sva tri slučaja treniranja neuronske mreže

Izlazni parametar	Koeficijent determinacije R^2					
	Trening kvar + sklopka		Trening samo kvar		Trening samo sklopka	
	$(R^2)_1$		$(R^2)_2$	$\frac{(R^2)_2}{(R^2)_1} [\%]$	$(R^2)_3$	$\frac{(R^2)_3}{(R^2)_1} [\%]$
ZIP_Z	0,7699	/	0,5385	69,94	0,6967	90,49
ZIP_I	0,4896	/	0,0752	15,36	0,0410	8,37
ZIP_P	0,8921	/	0,8448	94,70	0,6949	77,89
AM	0,9926	/	0,9932	100,06	0,9854	99,27
t_{m1}	0,7864	/	0,7561	96,15	0,4718	59,99
T_j	0,9749	/	0,9770	100,22	0,9302	95,41
s_{cr}	0,9843	/	0,9841	99,98	0,9614	97,67
s_0	0,9849	/	0,9855	100,06	0,9591	97,38

Iz podataka u Tablici 24 vidljivo je kako su najbolji rezultati (vrijednosti koeficijenta determinacije R^2 najbliže jedinici) postignuti prilikom prvog treniranja mreže. Jednako kao i slučaju metrika MSE i MAE , najlošije vrijednosti koeficijenta determinacije dobivene su prilikom treniranja mreže samo na manipulacije regulacijskom sklopkom transformatora.

Također je vidljivo da je neuronska mreža u najvećem broju slučajeva dobro predviđela vrijednosti parametara dinamičke komponente opterećenja koja je najznačajniji uzrok naponske nestabilnosti [18], što je prilično važno uzimajući u obzir kako asinkroni motori (koji predstavljaju ovu komponentu opterećenja) čine između 60 i 70 % ukupnog opterećenja elektroenergetskog sustava [1].

Najlošije vrijednosti koeficijenta determinacije R^2 dobiveni su za parametre statičke komponente opterećenja. Vrijednosti ZIP_I parametra za drugi i treći slučaj treniranja imaju vrijednosti koje pokazuje vrlo nisku razinu korelacije što ukazuje na neispravnost modela. Međutim, za prvi slučaj koji obuhvaća najveći spektar ulaznih podataka, ove su vrijednosti (mada nedovoljno dobre) ipak prihvatljive uz uvažavanje poznatih činjenica:

- fizikalne osobine parametara statičke komponente opterećenja mogu, kako je naglašeno u poglavlju 3.3.1, poprimiti negativne vrijednosti,
- međusobna fizikalna ovisnost parametara statičke komponente opterećenja definirana je ranije i opisana u poglavlju 7.5.7,
- glavni nedostatak metrike koeficijenta determinacije R^2 je pretpostavka da su sve varijable u modelu neovisne [90].

Kombinacija metrika evaluacije MSE , MAE i R^2 pruža sveobuhvatnu sliku performansi modela uključujući točnost predviđanja, osjetljivost na velike pogreške i sposobnost modela da objasni varijabilnost u podacima. Uvažavajući postignute vrijednosti, naročito za prvi slučaj, može se zaključiti da odabrani model jako dobro predviđa parametre električnog opterećenja.

8.5. Analiza primjene metode za određivanje parametara električnog opterećenja na stvarnim zapisima

U poglavljima 8.2.6 i 8.3.10 prikazane su predikcije parametara električnog opterećenja od strane neuronske mreže na osnovu zapisa stvarnih vrijednosti kvarova i stvarnih manipulacija regulacijskom sklopkom transformatora. Najveći problem za provedbu primjene ove metode na stvarnim zapisima je njihov mali broj. Neuronska mreža treba veliki broj podataka za treniranje i „učenje“ kako bi, na osnovu „naučenog“ mogla kvalitetno predviđati ciljane parametre.

U slučaju predviđanja parametara električnog opterećenja na osnovu raspoloživih zapisa kvarova, mreža je predviđala parametre istog reda veličine, i sa fizikalnim smislom. U slučaju predviđanja parametara električnog opterećenja na osnovu raspoloživih zapisa manipulacija regulacijskom sklopkom, predviđeni rezultati nemaju nikakav fizikalan smisao – od negativnih vrijednosti klizanja, do udjela dinamičke komponente iznad 100 % ukupnog opterećenja i sl.

Prilikom treniranja neuronske mreže primjenjivani su savršeno simetrični kvarovi koji su trajali u nasumično odabranim intervalima od 0,07 s do 0,22 s. U ovim kvarovima ne postoji istosmjerna komponenta, niti postoji bilo kakvo „zagađenje“ zapisa kvara višim harmonicima. Isto tako, ovi zapisi ne mogu vjerno prikazati stvarne kvarove. Stvarni kvarovi najvjerojatnije su posljedica udara groma što je čisto stohastička pojava i najčešće pogađa jednu ili dvije faze, pa se razvija dalje i zahvaća sve tri, kako se vidi na priloženim zapisima.

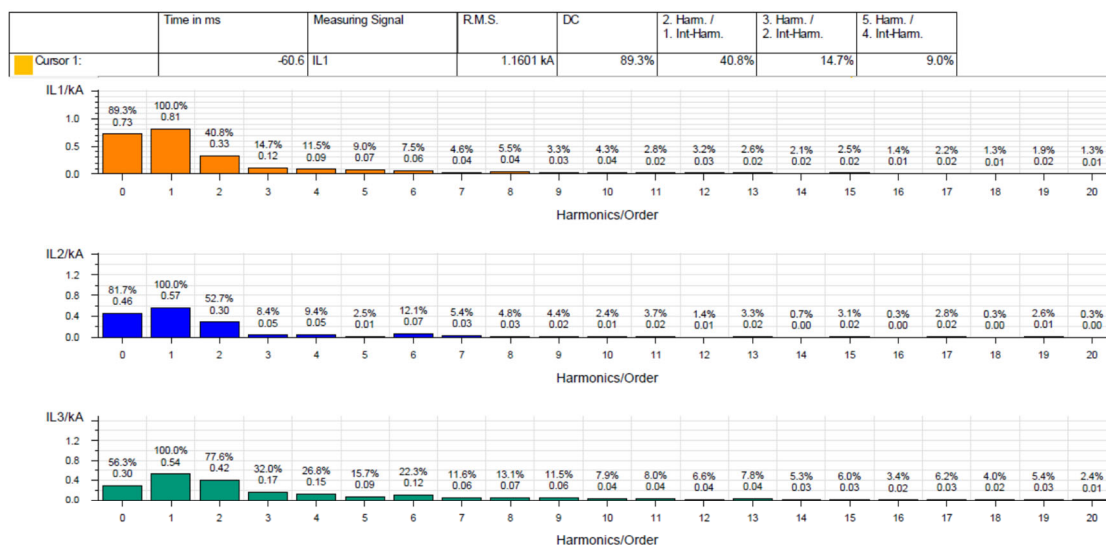
Sa prilično velikom sigurnošću može se tvrditi da analizirani kvarovi nisu posljedica pada jednog ili više stupova dalekovoda, niti pada stabla na dalekovod (ovo je malo vjerojatno uvažavajući visine i geometriju dalekovodnih stupova, kao i propisanu širinu zaštitnih koridora dalekovoda ove naponske razine). Isto tako, jasno je kako ovi kvarovi nisu posljedica pada vodiča na tlo, niti kvara spojne ili ovjesne opreme što je vidljivo po iznosima struja kvara i trolnom karakteru kvarova.

U stvarnosti kvarovi se sastoje od istosmjerne komponente, te osnovnog harmonika izmjenične komponente i čitavog spektra viših harmonika. Harmonička analiza svakog od pet odabranih trolnih kvarova, provedena u [95] prikazana je na slikama u nastavku.

VP_PKT 35 kV

- 5 -

25/03/2012 / 17:12:30.582



10/11/2025 / 17:06:34
SIGRA 4.60 SP1

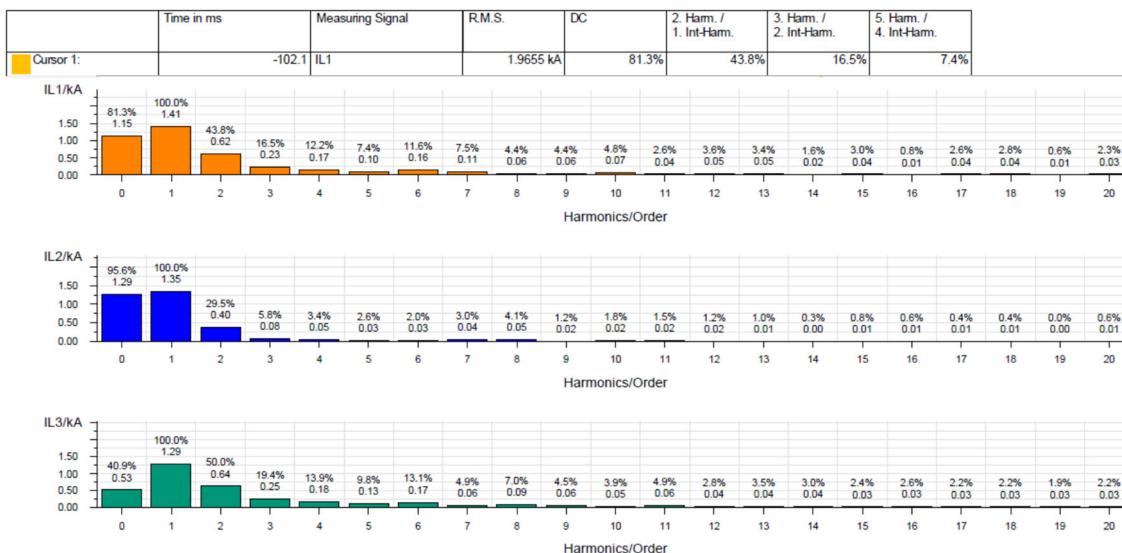
12325001_SLUNJ_1.CFG

Slika 89: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 1 (na DV 35 kV Slunj)

VP_PKT 35 kV

- 5 -

29/08/2009 / 14:11:18.381



10/11/2025 / 17:18:44
SIGRA 4.60 SP1

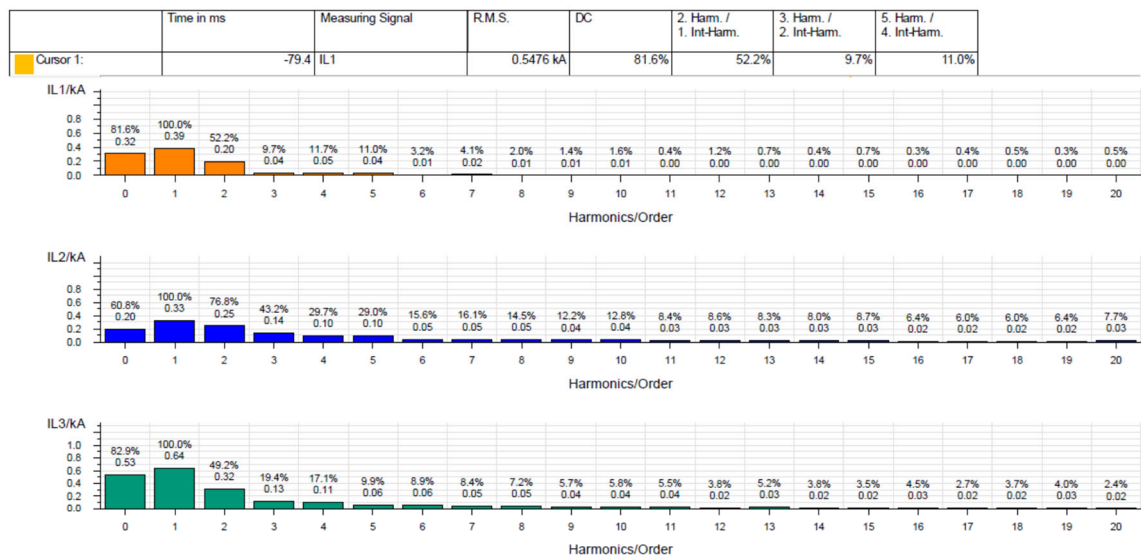
09829001_SLUNJ_3.CFG

Slika 90: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 3 (na DV 35 kV Slunj)

VP 35 kV

- 5 -

28/05/2011 / 03:31:09.232



10/11/2025 / 17:13:01
SIGRA 4.60 SP1

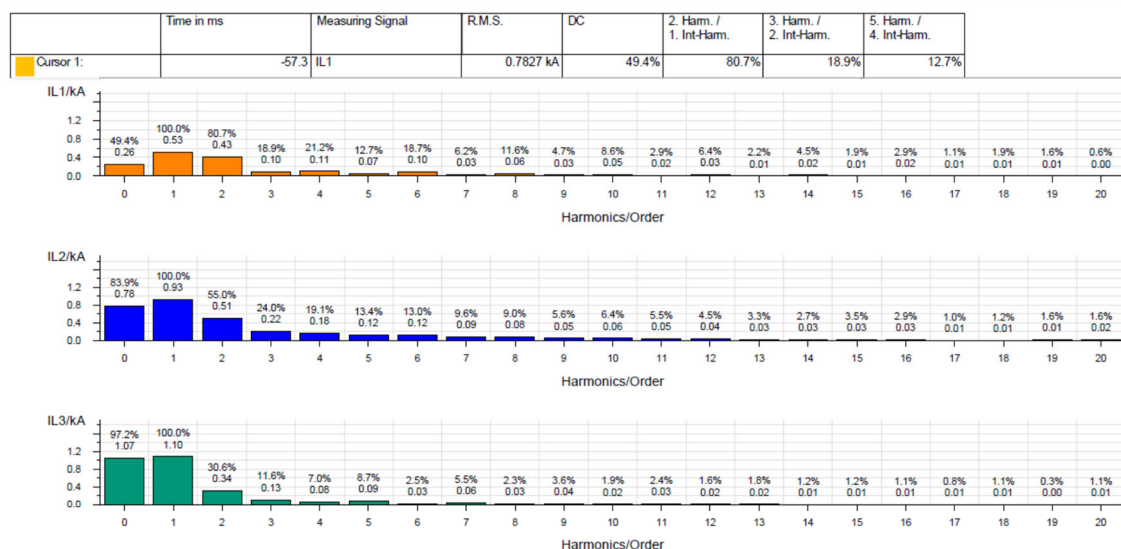
11528001_GOJAK_2_CFG

Slika 91: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 2 (na DV 35 kV Gojak)

VP 35 kV

- 5 -

22/08/2007 / 04:13:31.524



10/11/2025 / 17:23:10
SIGRA 4.60 SP1

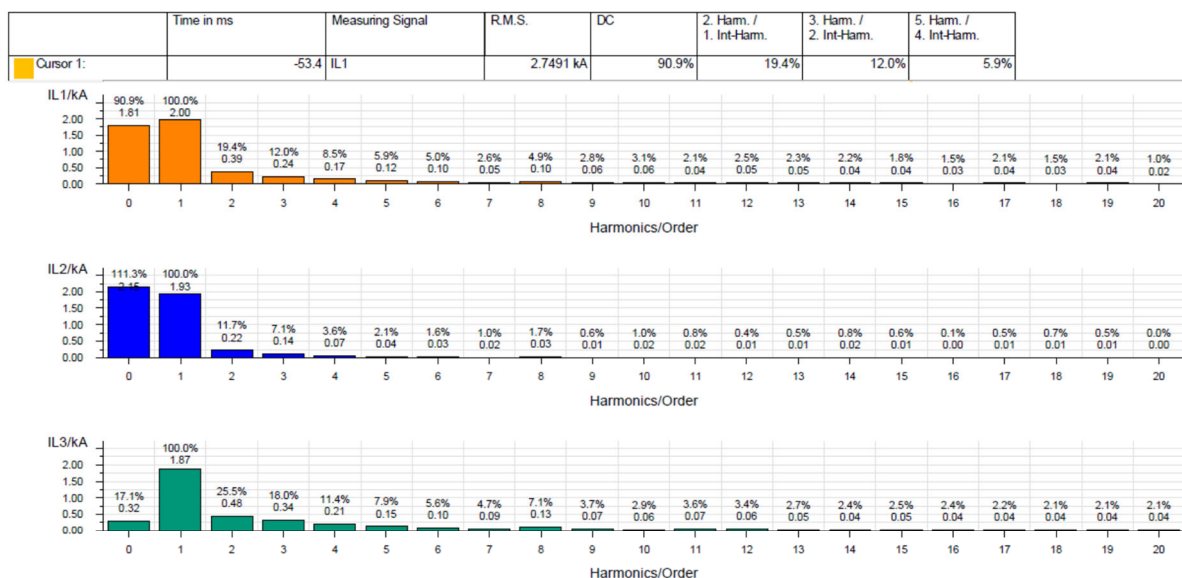
07822001_GOJAK_4_CFG

Slika 92: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 4 (na DV 35 kV Gojak)

VP 35 kV

- 5 -

11/06/2007 / 13:45:59.998



10/11/2025 / 17:33:08
SIGRA 4.60 SP1

07611001_GOJAK_5.CFG

Slika 93: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 5 (na DV 35 kV Gojak)

Harmonička analiza, sa kursorom pozicioniranim na samom početku kvara, pokazuje najrazličitije vrijednosti istosmjerne komponente i viših harmonika u strujama sve tri faze koje su zahvaćene kvarom. Na iznos istosmjerne komponente kvara svakako utječe 5 sinkronih generatora (3 na HE Gojak i 2 na HE Lešće) koji se nalaze u neposrednoj blizini TS Oštarije, a utjecaj na više harmonike nesumnjivo ima i EVP Oštarije. Podaci o uklopnom stanju ovih generatora u trenutku nastanka kvarova nisu poznati, kao ni podaci o prolasku kompozicija vlakova čija se elektrovuča osigurava iz EVP Oštarije.

Zaključno, na osnovu provedenih istraživanja, potrebno je prikupiti što veći broj stvarnih zapisa kvarova i nadograditi model neuronske mreže tako da mreža može prepoznati stvarne kvarove sa svim njihovim komponentama.

9. ZAKLJUČAK

Sve veći udio obnovljivih izvora električne energije u strukturi proizvodnje dovodi do novih izazova za planere i voditelje EES-ova zbog nestalnog karaktera i nepredvidljivosti ove vrste izvora električne energije. Kao moguće rješenje, ovaj rad prikazuje algoritam koji je razvijen radi provođenja napredne N-1 analize sigurnosti, temeljene na modalnoj analizi u uvjetima značajnije integracije distribuiranih izvora i sustava za pohranu električne energije. Algoritam sadrži prikaz i analizu korektivnih mjera koje operater sustava ima na raspolaganju radi povećanja sigurnosti elektroenergetskog sustava uvažavajući prednosti koje distribuirani izvori električne energije i postrojenja za skladištenje električne energije pružaju u smislu stabilnosti napona.

U radu je prikazan model koji je izrađen s ciljem generiranja opsežne baze sintetičkih podataka koja predstavlja različita stanja opterećenja u elektroenergetskom sustavu. Ova baza služi za treniranje neuronske mreže koja određuje parametre statičke i dinamičke komponente modela električnog opterećenja. Baza podataka izrađena je za širok spektar poremećaja napona koji značajno utječe na ponašanje priključenog električnog opterećenja: od maksimalnog pada napona izazvanog trolnim kvarovima (prijelazna stabilnost prema [33]), do minimalnih promjena napona izazvanih manipulacijama regulacijskom sklopom transformatora što se smatra malim oscilacijama prema klasifikaciji stabilnosti EES-a [33].

Razvijena je metoda za određivanje parametara statičke i dinamičke komponente modela električnog opterećenja čiji je osnov BiLSTM neuronska mreža. Kombinacija evaluacijskih metrika MSE , MAE i R^2 kojima je metoda analizirana pokazuju kako odabrani model jako dobro predviđa parametre električnog opterećenja. Razvijena metoda i odgovarajući model takvog su karaktera da nemaju utjecaj na pogon SN mreže na koji je priključeno električno opterećenje. Razvijeni model potrebno je nadograditi tako da može prepoznati sve parametre stvarnih kvarova, uključujući istosmjernu komponentu i više harmonika koji su neizostavno prisutni tijekom kvarova.

Prostor za daljnji napredak i nadogradnju modela nalazi se u 172 trafostanice HOPS-a [96] prijenosnog omjera 110/x kV (gdje „x“ predstavlja sve SN razine), točnije u zapisima kvarova i poremećaja na SN odvodima koji su izuzetno korisni za daljnji razvoj i nadogradnju postojećeg modela. U svrhu daljnjeg razvoja modela i metode određivanja parametara

električnog opterećenja treba prikupiti što veći broj zapisa kvarova sa SN odvoda trafostanica prijenosnog omjera 110/x kV, kao i sa SN trafostanica koje se nalaze u blizini. Suvremeni uređaji relejne zaštite i mjerenja koji su danas sastavni dio sekundarnih sustava elektroenergetskih objekata mogu dati ove dragocjene podatke. Daljnji razvoj, trening i učenje neuronske mreže, te konačno predviđanje parametara električnog opterećenja nije izvedivo bez većeg broja navedenih podataka.

Određivanje parametara električnog opterećenja problem je koji nigdje u svijetu nije riješen na zadovoljavajući način, tako da daljnje istraživanje i moguće rješavanje ovog problema definitivno ima svrhu. U ovom radu istraživani su parametri pomoću kojih se modelira električno opterećenje unutar programskog paketa *PowerFactory*. Isti se postupak može primijeniti i na eventualno drugačije parametre za potrebe modeliranja električnog opterećenja u nekom drugom programskom paketu. U tom je smislu metoda razvijena u ovom radu univerzalno primjenjiva.

Daljnja istraživanja će ići u smjeru prikupljanja većeg broja podataka o poremećajima i kvarovima te nadogradnje razvijene metode. Nakon zadovoljavajućeg podešavanja modela na prijelaznu stabilnost, fokus će se premjestiti na nadogradnju metode za male oscilacije.

Ovaj rad u konačnici prikazuje kako duboko učenje može dati vrijedan doprinos vođenju EES-a, i kod analize sigurnosti, i kod proračuna naponske stabilnosti na koju najveći utjecaj ima upravo električno opterećenje. Primjena dubokog učenja u elektroenergetici ima velike mogućnosti, ali isključivo i jedino kad se razvijeni modeli provjere i usklade sa stvarnim fizikalnim događajima.

Literatura

- [1] P. S. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] J. Machowski, J. W. Bialek i J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, John Wiley & Sons, Ltd, 2008..
- [3] R. Doraiswami i M. F. H. Carvalho, *Reliability Indices for a Power Network Considering Static, Transient and Dynamic Performance*, IEEE Trans. Reliab., 1979..
- [4] T. Guler i G. Gross, *Detection of Island Formation and Identification of Causal Factors Under Multiple Line Outages*, IEEE Trans. Power Syst., 2007..
- [5] H. Dong i L. Cui, *System Reliability Under Cascading Failure Models*, IEEE Trans. Reliab., 2016..
- [6] E. Zio i G. Sansavini, *Modeling Interdependent Network Systems for Identifying Cascade-Safe Operating Margins*, IEEE Trans. Reliab., 2011..
- [7] M. El-Kady, M. El-Sobki i N. Sinha, *Reliability Evaluation for Optimally Operated Large Electric Power Systems*, IEEE Trans. Reliab., 1986..
- [8] Z. Shuai, Y. Hu, Y. Peng, C. Tu i Z. Shen, *Dynamic Stability Analysis of Synchronverter-Dominated Microgrid Based on Bifurcation Theory*, IEEE Trans. Ind. Electron., 2017..
- [9] C. Rocco, J. Ramirez-Marquez, D. Salazar i C. Yajure, *Assessing the Vulnerability of a Power System Through a Multiple Objective Contingency Screening Approach*, IEEE Trans. Reliab., 2011..
- [10] T. Ding, C. Li, C. Yan, F. Li i Z. Bie, *A Bilevel Optimization Model for Risk Assessment and Contingency Ranking in Transmission System Reliability Evaluation*, IEEE Trans. Power Syst., 2017..

- [11] A. Street, F. Oliveira i J. Arroyo, *Contingency-Constrained Unit Commitment with $n-K$ Security Criterion: A Robust Optimization Approach*, IEEE Trans. Power Syst., 2011..
- [12] Q. Wang, J. Watson i Y. Guan, *Two-stage robust optimization for $N-k$ contingency-constrained unit commitment*, IEEE Trans. Power Syst., 2013..
- [13] G. Levitin, *Optimal Defense Strategy Against Intentional Attacks*, IEEE Trans. Reliab., 2007..
- [14] G. Levitin i K. Hausken, *Redundancy vs. Protection vs. False Targets for Systems Under Attack*, IEEE Trans. Reliab., 2009..
- [15] G. Ejebe i B. Wollenberg, *Automatic Contingency Selection*, IEEE Trans. Power Appar. Syst., 1979..
- [16] T. Mikolinnas i B. Wollenberg, *An Advanced Contingency Selection Algorithm*, IEEE Trans. Power Appar. Syst., 1981..
- [17] G. Irisarri i A. Sasson, *An Automatic Contingency Selection Method for On-Line Security Analysis*, IEEE Trans. Power Appar. Syst., 1981..
- [18] T. Van Cutsem i C. Vournas, *Voltage Stability of Electric Power Systems*, Power Electronics and Power Systems Series, 1998..
- [19] T. Overbye, *Effects of load modelling on analysis of power system voltage stability*, Int. J. Electr. Power Energy Syst., 16, 329–338, 1994.
- [20] M. K. Pal, *Voltage stability conditions considering load characteristics*, Transactions on Power Systems, 1992..
- [21] H. Deng, S. Wu, Q. Yue, S. Sun, Z. Zhou, T. Xu i B. Zhu, *Simulation of Influence of Load Model and Parameters on Frequency and Voltage Stability of Yunnan Power Grid*, Journal of Physics: Conference Series, 2022..
- [22] L. M. Vargas Rios, *Local voltage stability assessment for variable load characteristics*, Vancouver: The University of British Columbia, 2009..

- [23] K. Gaire, *Impact of load modeling on power system voltage stability*, Kathmandu: Tribhuvan University, 2011..
- [24] L. Maraaba, M. Almuhaini, M. Habli i M. Khalid, *Neural Networks Based Dynamic Load Modeling for Power System Reliability Assessment*, MDPI Sustainability, 2023..
- [25] H. Guo, K. Rudion, H. Abildgaard, P. Komarnicki i Z. Styczynski, *Parameter estimation of dynamic load model using field measurement data performed by OLTC operation*, San Diego: In Proceedings of the 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012..
- [26] V. Vignesh, S. Chakrabarti i S. Srivastava, *An experimental study on the load modelling using PMU measurements*, Chicago: In Proceedings of the IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014..
- [27] A. Maitra, A. Gaikwad, P. Zhang, M. Ingram, D. L. Mercado i W. D. Woitt, *Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models*, IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, PSCE, 2006.
- [28] K. Yamashita, S. M. Villanueva, S. Z. Djokic, J. Ma, A. Gaikwad i J. V. Milanović, *Overview of Existing Methodologies for Load Model Development*, Cigre SC C4 Hakodate Colloquium, 2012..
- [29] Cigre Working Group C4.605, *Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks*, Cigre, 2014.
- [30] M. Hamidovic i M. F. Khoudeir, *Load Model Identification and Parameter Estimation*, Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2019.
- [31] A. P. Tellez, *Modelling aggregate loads in power systems*, Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2017..
- [32] I. F. Visconti, *A Load Modeling Methodology for Steady State and Dynamic Simulations*, Rio de Janeiro: Pontificia Universidade Catolica do Rio De Janeiro, 2019.
- [33] Working Group C4.601, *Review of On-line Dynamic Security Assessment Tools and Techniques*, Cigre, 2007..

- [34] Guorui Zhang, *EPRI Power System Dynamics Tutorial*, Electric Power Research Institute, Inc., 2009.
- [35] W. W. Price, K. Wirgau, A. Murdoch, J. V. Mltsche, E. Vaahedi i M. A. El-Kady, *Load modeling for power flow and transient stability computer studies*, IEEE Transactions on Power Systems, 1988..
- [36] C. W. Taylor, *Power System Voltage Stability*, E. P. S. E. Series, Ur., Mc Graw Hill, 1994..
- [37] L. M. Hajagos i B. Danai, *Labaratory measurements and models od modern loads and their effect on voltage stability studies*, IEEE Transactions on Power Systems, 1997..
- [38] IEEE Task Force, *Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation*, IEEE Transaction on Power Systems, 1995..
- [39] G. Rogers, J. Di Mano i R. T. H. Alden, *An Aggregate induction motor model for industrial plants*, IEEE Transactions on Power Systems, 1984..
- [40] F. Nozari, M. D. Kankam i W. W. Price, *Aggregation of induction motors for transient stability load modelling*, IEEE Transactions on Power Systems, 1987..
- [41] A. M. Stanković i B. C. Lesieutre, *A probabilistic approach to aggregate induction machine modeling*, IEEE Transactions on POver Systems, 1996..
- [42] IEEE Task Force, *Standard load models for power flow and dynamic performance simulation*, IEEE Transactions on Power Systems, 1995..
- [43] D. C. Franklin i A. Morelato, *Improving dynamic aggregation of induction motor models*, IEEE Transactions on POver Systems, 1994..
- [44] M. S. Calović, *Modeling and analysis of under-load tap-changing transformer control systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984..
- [45] W. R. Lachs, *System reactive power limitations*, IEEE PES Winter Meeting, 1979..

- [46] S. Abe, Y. Fukunaga, A. Isono i B. Kondo, *Power Systems Voltage Stability*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982..
- [47] H. K. Clark, *Voltage control and reactive supply problems*, IEEE Tutorial on Reactive Power, 1987..
- [48] K. M. Graf, *Dynamic simulation of voltage collapse precesses in EHV systems*, Bulk Power System Voltage Phenomena I - Voltage Stability and Security, 1988..
- [49] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, *Standard load models for power flow and dynamic performance simulation*, IEEE Transactions on Power Systems, 1995..
- [50] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, *Load representation for dynamic performance analysis (of power systems)*, IEEE Transactions on Power Systems, 1993..
- [51] T. Y. J. Lem i R. T. H. Alden, *Comparision of experimental and aggregate induction motor responses*, IEEE Transactions on Power Systems, 1994..
- [52] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, *Load representation for dynamic performance analysis*, IEEE Trans. on Power Systems, 1993..
- [53] D. Han, J. Ma, R. M. He i Z. Y. Dong, *A Real Application of Measurement-based Load Modeling in Large-scale Power Grids and its Validation*, IEEE Trans. on Power Systems, 2009..
- [54] K. Yamashita, S. M. Villanueva i J. V. Milanovic, *Initial Results of International Survey on Industrial Practice on Power System Load Modelling Conducted by CIGRE WG C4.605*, Bologna: Proceedings of CIGRE Symposium 2011, 2011..
- [55] A. M. Gaikwad, R. J. Bravo, D. Kosterev, S. Yang, A. Maitra, P. Pourbeik, B. Agrawal, R. Yinger i D. Brooks, *Results of Residential Air Conditioner Testing in WECC*, Pittsburg: Peceedings of IEEE PES2008 General Meeting, 2008..

- [56] D. Kosterev, A. Meklin, J. Undrill, B. Lesieutre, W. Price, D. Chassin, R. Bravo i S. Yang., *Load Modeling in Power System Studies: WECC Progress Update*, Pittsburg: Proceedings of IEEE PES 2008 General Meeting, 2008..
- [57] H. Gentile, S. Ihara, A. Murdoch i N. Simons, *Determining Load Characteristics from System Performance*, EPRI EL-850, RP 849-1, 1981..
- [58] R. Adapa, *Advanced Load Modelling - Entergy Pilot Study*, Palo Alto: EPRI, 2004..
- [59] D. Brooks, *Comprehensive Load Modeling for System Planning Studies*, Palo Alto: EPRI, 2009..
- [60] D. Brooks, *Load Modeling Using a Measurement based Approach: Phase-2*, Palo Alto: EPRI, 2007..
- [61] C. Cresswell, S. Z. Djokic i S. Munshi, *Analytical Modelling of Adjustable Speed Drive loads for power system studies*, Lausanne: Proceedings of Power tech 2007, Paper 198, 2007..
- [62] D. Karlsson i D. J. Hill, *Modelling and Identification of Nonlinear Dynamic Loads in Power Systems*, IEEE Transactions on Power Systems, 1994..
- [63] P. C. Krause, *Analysis of Electric Machinery*, New York: McGraw-Hill Book Company, 1986..
- [64] T. Frantz, H. Gentile, S. Ihara, N. Simons i M. Waldron, *Load Behaviour Observed in LILCO and RG&E Systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984..
- [65] F. S. Chassin, E. T. Mayhorn, M. A. Elizondo i S. Lu, *Load Modelind and Calibration Techniques for Power System Studies*, Boston: Proceedings of 43rd North American Power Symposium, 2011..
- [66] H. Bulat, D. Franković i S. Vlahinić, *Enhanced Contingency Analysis—A Power System Operator Tool*, Energies 14, 923, 2021.

- [67] B. Gao, G. K. Morrison i P. Kundur, *Voltage stability evaluation using modal analysis*, IEEE Power Eng., 1992..
- [68] E. Kreyszig, H. Kreyszig i E. J. Norminton, *Advance Engineering Mathematics, 10th Edition*, John Wiley & Sons, Inc., 2011..
- [69] J. Kueck, B. Kirby, T. Rizy, F. Li i N. Fall, *Reactive Power from Distributed Energy*, Electr. J., 2006..
- [70] A. Maknouninejad, N. Kutkut, I. Batarseh i Z. Qu, *Analysis and control of PV inverters operating in VAR mode at night*, In Proceedings of the Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011..
- [71] F. Diaz-Gonzalez, A. Sumper i O. Gomis-Bellmunt, *Energy Storage in Power Systems*, 1st ed., JohnWiley & Sons Ltd., 2016..
- [72] A. Aruf, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo i D. Zhao, *Load Modeling - A Review*, IEEE Trans. Smart Grid, 2018..
- [73] S. Omran, R. Broadwater, J. Hambricj, M. Dilek, C. Thomas i F. Kreikebaum, *Power flow control and N-1 contingency analysis with DSR's in unbalanced transmission networks*, Electr. Power Syst. Res., 2016..
- [74] HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o., »<https://www.hep.hr/ods/o-nama/publikacije-229/229>,« 2023. [Mrežno].
- [75] DIgSILENT GmbH, »DIgSILENT PowerFactory User Manual, Online Edition,« DIgSILENT GmbH, 2017..
- [76] LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. and Haffner, P., *Gradient-based learning applied to document recognition*, Proceedings of the IEEE, 86(11), pp.2278-2324, 1998.
- [77] Zhou, Y., Dong, H., & El Saddik, A., *Deep learning in next-frame prediction: A benchmark review*, IEEE Access, 8, 69273-69283, 2020.
- [78] Hochreiter, Sepp, and Jürgen Schmidhuber, *Long short-term memory*, Neural computation 9, no. 8 (1997): 1735-1780, 1997.

- [79] Hinton, G.E., Srivastava, N., Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Salakhutdinov, R.R., *Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors*, arXiv preprint arXiv:1207.0580, 2012.
- [80] Christopher O., »Understanding LSTM Networks,« 2015. [Mrežno]. Available: <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2023].
- [81] Bengio, Yoshua, Patrice Simard, and Paolo Frasconi, *Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult*, IEEE transactions on neural networks 5, no. 2 (1994): 157-166, 1994.
- [82] Werbos, Paul J., *Backpropagation through time: what it does and how to do it.*, Proceedings of the IEEE 78, no. 10 (1990): 1550-1560, 1990.
- [83] @GeeksforGeeks, »<https://www.geeksforgeeks.org/nlp/bidirectional-lstm-in-nlp/>,« @GeeksforGeeks, Sanchhaya Education Private Limited. [Mrežno].
- [84] Baldi, P. and Sadowski, P.J., *Understanding dropout*, Advances in neural information processing systems, 26, 2013.
- [85] »https://colab.research.google.com/drive/1xKCHe9I6pEzXZps_TI9hNgfJahIfF2T?usp=sharing,« Google . [Mrežno].
- [86] C. Yang, A. A. Thatte i L. Xie, *Multitime-scale data-driven spatio-temporal forecast of photovoltaic generation*, IEEE Transaction on Sustainable Energy, 2014..
- [87] H. T. Pedro i C. F. Coimbra, *Assessment of forecasting techniques for solar power production with no exogenous inputs*, Solar Energy, 2012..
- [88] Rumelhart, David E., Geoffrey E. Hinton, and Ronald J. Williams, *Learning representations by back-propagating errors*, Nature 323, no. 6088 (1986): 533-536, 1986.
- [89] C. Huang, L. Wang i L. L. Lai, *Data-driven short-term solar irradiance forecasting based on information of neighboring sites*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018..

- [90] E. Onose, »R Squared: Understanding the Coefficient of Determination,« 4 August 2023. [Mrežno]. Available: <https://arize.com/blog-course/r-squared-understanding-the-coefficient-of-determination/>.
- [91] SCADA sustav HOPS-a, »Jednopolna shema 110 kV postrojenja TS Oštarije«.
- [92] SCADA sustav HEP ODS-a, »Jednopolna shema 35 kV postrojenja TS Oštarije«.
- [93] Dranetz, *PowerXplorer PX5 User's Guide*, Edison, NJ, USA: Dranetz, 2005.
- [94] D. Inc., *Dran-Set Version 7.7*.
- [95] Siemens, *SIGRA© V4.60.03.SP1 - Fault Record Evaluation*, Siemens AG.
- [96] HOPS, »HOPS Prijenosna mreža,« HOPS d.d., 2025.. [Mrežno]. Available: <https://www.hops.hr/prijenosna-mreza>.
- [97] A. Qazi, F. Hussain, N.A. Rahim, G. Hardaker, D. Alghazzawi, K. Shaban, & K. Haruna, *Towards sustainable energy: a systematic review of renewable energy sources, technologies, and public opinions*, IEEE access, 7, 63837-63851, 2019.
- [98] Murdock, Hannah E., et al., *Renewables 2021-global status report*, 2021.
- [99] *EEA greenhouse gases — data viewer: Synthesis*, European Environment Agency (EEA), DAS-270-en, 2021.
- [100] Infield, D., & Freris, L., *Renewable energy in power systems*, John Wiley & Sons, 2020.
- [101] G. e. Boyle, *Renewable electricity and the grid: The challenge of variability*, London, UK: Earthscan Publications Ltd., 2012.
- [102] Zou, Kelly H., Kemal Tuncali, and Stuart G. Silverman., *Correlation and simple linear regression*, Radiology 227.3: 617-628, 2003.
- [103] [Mrežno]. Available: <https://generic-github-user.github.io/Image-Convolution-Playground/src/>. [Pokušaj pristupa Listopad 2022].

- [104] [Mrežno]. Available: <https://computersciencewiki.org/index.php/File:MaxpoolSample2.png>. [Pokušaj pristupa Svibanj 2023].
- [105] [Mrežno]. Available: <https://www.ablebits.com/office-addins-blog/linear-regression-analysis-excel/>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2022].
- [106] [Mrežno]. Available: https://docs.opencv.org/4.5.1/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html. [Pokušaj pristupa Lipanj 2022].
- [107] [Mrežno]. Available: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2021/08/image-processing-in-python-the-computer-vision-techniques/>. [Pokušaj pristupa Lipanj 2022].
- [108] [Mrežno]. Available: https://colab.research.google.com/drive/1_JUhm8XMT3rpE6Sv7R4KDxWTV8OC-A0n?usp=sharing. [Pokušaj pristupa Listopad 2022].
- [109] Wentz, V.H., Maciel, J.N., Gimenez Ledesma, J.J. and Ando Junior, O.H., *Solar Irradiance Forecasting to Short-Term PV Power: Accuracy Comparison of ANN and LSTM Models*, *Energies*, 15(7), p.2457, 2022.
- [110] Sivaneasan, B., Yu, C.Y. and Goh, K.P., *Solar forecasting using ANN with fuzzy logic pre-processing*, *Energy procedia*, 143, pp.727-732, 2017.
- [111] Wang, F., Mi, Z., Su, S. and Zhao, H., *Short-term solar irradiance forecasting model based on artificial neural network using statistical feature parameters*, *Energies*, 5(5), pp.1355-1370, 2012.
- [112] Srivastava, N., Hinton, G., Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Salakhutdinov, R., *Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting*, *The journal of machine learning research*, 15(1), 1929-1958, 2014.
- [113] Hecht-Nielsen, R., *Theory of the backpropagation neural network*, In *Neural networks for perception* (pp. 65-93). Academic Press, 1992.
- [114] Goldsborough, P., *A tour of tensorflow*, arXiv preprint arXiv:1610.01178, 2016.

- [115] Gulli, A. and Pal, S., *Deep learning with Keras*, Packt Publishing Ltd, 2017.
- [116] Borgman, C.L., Darch, P.T., Sands, A.E., Pasquetto, I.V., Golshan, M.S., Wallis, J.C. and Traweek, S., *Knowledge infrastructures in science: data, diversity, and digital libraries*, International Journal on Digital Libraries, 16, pp.207-227, 2015.
- [117] IEEE TAsk Force on Load Representation for Dynamic Performance, *Bibliography on load models for power flow and dynamic performance simulation*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 10, no. 1, pp. 523-538, 1995.
- [118] K. Yamashita, S. M. Villanueva, S. Z. Djokic, J. Ma, A. Gaikwad, J. V. Milanović, Overview of Existing Methodologies for Load Model Development, CIGRE SC C4 2012 Hakodate Colloquium, 2012.
- [119] IEEE/CIGRE Joint Task Force on >Stability Terms and Definitions, *Definition and Classification of Power System Stability*, CIGRE, 2003.
- [120] Esmaeil Moghadam, D.; Shiri, A.; Sadr, S.; Khaburi, D.A., *A practical method for calculation of over-excited region in the synchronous generator capability curves*, Istanbul, Turkey: In Proceedings of the 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2014.
- [121] Kawabe, K.; Yokoyama, A., *Study on short-term voltage stability improvement using batteries on extra-high voltage network*, Grenoble, France: In Proceedings of the 2013 IEEE Grenoble Conference, 2013.
- [122] Cabrera-Tobar, A.; Bullich-Massaguew, E.; Aragues-Penalba, M., *Active and Reactive Power Control of a PV Generator for Grid Code Compliance*, Energies, 12, 3872. , 2019.
- [123] Williams, J.R.; Ellis, A.; Nelson, R.; Von Engeln, E.; Walling, R.; MacDowell, J.; Casey, L.; Seymour, E.; Peter, W.; Barker, C.; et al., *Review of existing reactive power requirements for variable generation*, San Diego, CA, USA: In Proceedings of the 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2012.

- [124] Kalverkamp, F.; Schowe-von der Brelie, S.; Nguyen, T.D.; Mertens, T.; Meuser, M., *Comparative analysis of European Grid Codes and compliance standards for distributed power generation plants with respect to future requirements of ENTSO-E and CENELEC*, Bonn, Germany: In Proceedings of the International ETG Congress, 2015.
- [125] Diaz-Gonzalez, F.; Sumper, A.; Gomis-Bellmunt, O., *Energy Storage in Power Systems, 1st ed.*, Chichester, UK: JohnWiley & Sons Ltd., 2016.
- [126] Wang, W.; He, W.; Cheng, J.; Huang, X.; Liu, H., *Active and reactive power coordinated control strategy of battery energy storage system in active distribution network*, Hefei, China: In Proceedings of the 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), 2017.
- [127] Liu, X.; Niu, X.; Zhu, Y.; Zhu, C., *Influence of Regulation of OLTC Transformation Ratio on Voltage Stability*, Qingdao, China: In Proceedings of the 2013 Fourth International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2013.
- [128] Duan, J.; Zhu, S., *The effect of OLTC on static voltage stability limit*, Wuhan, China: In Proceedings of the 2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2011.
- [129] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, *Load representation for dynamic performance analysis*, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No. 2, pp. 472-482, 1993.
- [130] K. Yamashita, S. M. Villanueva, S. Z. Djokic, J. Ma, A. Gaikwad, J. V. Milanović,, *Overview of Existing Methodologies for Load Model Development*, CIGRE SC C4 2012 Hakodate Colloquium, 2012.
- [131] J.V. Milanović, J. Matevosyan, A. Gaikwad, A. Borghetti, S.Ž. Djokić, Z.Y. Dong, A. Halley, L.M. Korunović, S. Martinez Villanueva, J. Ma, P. Pourbeik, F. Resende, S. Sterpu, F. Villella, K. Yamashita, , *Modelling and Aggregation of Loads in Flexible Power Networks*, CIGRE Working Group C4.605, ISBN : 978-2-85873-261-6, 2014.

- [132] R.Suganya, M.Thenmozhi, *Load modeling Techniques in Voltage Stability Studies*, International Journal of Research in Electrical & Electronics, Engineering Volume 2, Issue 1, pp. 37-46, 2014.
- [133] Jundong Duan, Jiaying Huang, *The Mechanism of Voltage Instability Analysis Considering Load Characteristic*, Energy and Power Engineering, 5, 1497-1502, 2013.
- [134] H. Guo, K. Rudion, H. Abildgaard, P. Komarnicki, Z. A. Styczynski, *Parameter Estimation of Dynamic Load Model Using Field Measurement Data Performed by OLTC Operation*, IEEE, 978-1-4673-2729-9/12/\$31.00, 2012.
- [135] A. Maitra, A. Gaikwad, P. Zhang, M. Ingram, D. L. Mercado, W. D. Woitt, *Using System Disturbance Measurement Data to Develop Improved Load Models*, IEEE 1-4244-0178-X/06/\$20.00, 2006.
- [136] Vignesh V., S.Chakrabarti, S.C.Srivastava, *An experimental study on the load modelling using PMU measurements*, IEEE 978-1-4799-3656-4/14/\$31.00, 2014.
- [137] S. Hochreiter, J. Schmidhuber, *Long Short-term Memory*, Neural Computation MIT-Press., 1997.
- [138] I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville, *Deep learning*, MIT Press book, 2016..
- [139] Cho, K., *Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation*, arXiv preprint arXiv:1406.1078, 2014.
- [140] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, Ł. Kaiser, I. Polosukhin, *Attention is all you need*, Advances in Neural Information Processing Systems, 2017.
- [141] T. Van Cutsem, *Dynamic and static aspects of voltage collapse*, In Fink.
- [142] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley Jr. i C. D. Umans, *Electric Machinery*, McGraw-Hill, 4th edition, 1983..

Popis oznaka i kratica

I	struja
U	napon
V	napon
P	radna snaga
Q	jalova snaga
S	prividna snaga
E	elektromotorna sila
X	reaktancija
θ	kut između struje i napona
α	komponenta opterećenja
β	komponenta opterećenja
z	zahtjev potrošača za opterećenjem
I^2R	gubici statorskog namota generatora
i^2R	gubici rotorskog namota generatora
$\cos \varphi$	faktor snage
a_P	koeficijent konstantne impedancije radne komponente opterećenja
b_P	koeficijent konstantne struje radne komponente opterećenja
c_P	koeficijent konstantne snage radne komponente opterećenja
a_Q	koeficijent konstantne impedancije jalove komponente opterećenja
b_Q	koeficijent konstantne struje jalove komponente opterećenja
c_Q	koeficijent konstantne snage jalove komponente opterećenja

x	varijabla stanja dinamičke komponente opterećenja
R	rezistencija
s	klizanje motora
ω_0	kutna frekvencija
θ_r	brzina rotora u električnim radijanima u sekundi
T_e	električni moment asinkronog motora
H	konstanta tromosti
T_m	mehanički moment asinkronog motora
w	broj zavoja transformatorskog namota
F	funkcija
y_m	izmjerene vrijednosti
y_c	izračunate vrijednosti
t_k	vremenski korak simulacije
J	Jacobijeva matrica
$\mathbf{A}$	kvadratna matrica
λ	skalar
$\mathbf{x}$	vektor
λ_i	svojstvena vrijednost reducirane Jacobijeve matrice
η	lijevi svojstveni vektor reducirane Jacobijeve matrice
ξ	desni svojstveni vektor reducirane Jacobijeve matrice
PI_V	engl. <i>voltage-based performance index</i>
t_{m1}, m	eksponent mehaničkog momenta asinkronog motora
T_j	vremenske konstante inercije asinkronog motora

xm_t	jedinična vrijednost mehaničkog momenta asinkronog stroja
xm_e	jedinična vrijednost elektromagnetskog momenta asinkronog stroja
xm_{t_0}	inicijalni mehanički moment
p_t	konačni vektor vjerojatnosti mreže
p_{t_f}	vektor vjerojatnosti iz LSTM mreže prema naprijed
p_{t_b}	vektor vjerojatnosti iz LSTM mreže prema natrag
AM	postotak udjela dinamičke komponente opterećenja u ukupnom opterećenju
ZIP_Z	postotak udjela komponente konstantne impedancije statičkog dijela opterećenja
ZIP_I	postotak udjela komponente konstantne struje statičkog dijela opterećenja
ZIP_P	postotak udjela komponente konstantne snage statičkog dijela opterećenja
R^2	koeficijent determinacije
x	varijabla
y	varijabla
MVA	megavolt amper
MW	megavat
MVA _r	megavolt amper reaktivni
kV	kilovolt
EES	elektroenergetski sustav
EMS	engl. <i>Energy Management System</i>
VN	visokonaponski
SN	srednjenaponski
NN	niskonaponski
WECC	engl. <i>Western Electricity Coordinating Council</i>

SAD	Sjedinjene Američke Države
ZIP	opterećenje sastavljeno od konstantne impedancije Z, konstantne struje I i konstantne snage P
PMU	engl. <i>Phasor Measurement Unit</i>
IEEE	engl. <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
DP	Distribucijsko područje
HEP ODS	HEP Operator distribucijskog sustava d.o.o.
HOPS	Hrvatski operator prijenosnog sustava d.d.
PEE	Prodaja električne energije
TJ	Terenska jedinica
ANN	engl. <i>Artificial Neuron Network</i>
LSTM	engl. <i>long short-term memory</i>
RNN	engl. <i>recurrent neural network</i>
BiLSTM	engl. <i>bidirectional long short-term memory</i>
PCA	engl. <i>principal component analysis</i>
ReLU	engl. <i>rectified linear unit</i>
Adam	engl. <i>Adaptive Moment Estimation</i>
MSE	engl. <i>Mean Square Error</i>
MAE	engl. <i>Mean Absolute Error</i>
HDF	engl. <i>Hierarchical Data Format</i>
GPU	engl. <i>graphic processor unit</i>
HPC	engl. <i>high-performance computing</i>
GB	gigabajt
3D	trodimenzionalnost

Popis slika

Slika 1: Klasifikacija pogonskih stanja EES-a s gledišta sigurnosti [33]	9
Slika 2: Klasifikacija stabilnosti EES-a [33].....	11
Slika 3: Jednostavan EES [1]	15
Slika 4: $P - V$ krivulja čvora R jednostavnog EES-a sa Slika 3	17
Slika 5: Prikaz $P - V$ krivulje za slučaj porasta opterećenja u određenom čvoru sustava	18
Slika 6: Prikaz $P - V$ krivulje za slučaj porasta zahtjeva za opterećenjem opterećenja u određenom čvoru sustava	18
Slika 7: Prikaz $P-V$ krivulje određenog čvora sustava za slučaj kvara u prijenosnoj mreži koji za posljedicu ima ispad jednog ili više elemenata mreže.....	19
Slika 8: $Q-V$ krivulje jednog čvora EES-a za različite vrijednosti radne komponente snage..	19
Slika 9: $Q - V$ krivulje sa potrebnim zalihama jalove snage za održavanje normalnih naponskih prilika u određenom čvoru EES-a	20
Slika 10: Zajednički prikaz $P-V$ i $Q-V$ krivulje za određeni čvor sustava – rezerva jalove snage	21
Slika 11: Zajednički prikaz $P-V$ i $Q-V$ krivulje za određeni čvor sustava – udaljenosti do točke nestabilnosti.....	21
Slika 12: Pogonska karta sinkronog generatora	22
Slika 13: Karakteristike eksponencijalnog opterećenja u odnosu na $P - V$ krivulju	24
Slika 14: Tipične polinomne karakteristike radnog opterećenja za različite razine opterećenja s pozitivnim koeficijentom b	25
Slika 15: Tipične polinomne karakteristike radnog opterećenja za različite razine opterećenja s negativnim koeficijentom b	26
Slika 16: Ekvivalentni krug trofaznog asinkronog motora u stacionarnom stanju	28
Slika 17: Ekvivalentna impedancija trofaznog asinkronog motora sa Slike 16 gledano sa stezaljki statora AA'	30
Slika 18: Karakteristika električnog momenta asinkronog motora u ovisnosti o klizanju.....	31
Slika 19: Tipična jednopolna shema regulacije napona	33
Slika 20: Skup potrošača električne energije – električno opterećenje sustava	35
Slika 21: Proces razvoja modela opterećenja	38
Slika 22: Klasifikacija pristupa modeliranju opterećenja	38

Slika 23: Model električnog opterećenja najbliži stvarnim fizikalnom uvjetima [29].....	41
Slika 24: Modeliranje električnog opterećenja temeljeno na komponentama	42
Slika 25: Modeliranje električnog opterećenja temeljeno na mjerenju.....	45
Slika 26: dijagram toka modeliranja opterećenja na temelju mjerenja	46
Slika 27: Tipičan oblik pogonskog dijagrama obnovljivih izvora električne energije (vjetroatogorog)	55
Slika 28: Algoritam proširene analize nepredviđenih događaja.....	58
Slika 29: Simulacijski model zapadnog dijela hrvatskog 110 kV EES-a	60
Slika 30: model za stvaranje baze sintetičkih podataka različitih stanja opterećenja EES-a za treniranje neuronske mreže	73
Slika 31: prozor programskog paketa za analizu rada EES-a – parametri transformatora.....	74
Slika 32: kompleksni model opterećenja u programskom paketu za analizu rada EES-a	75
Slika 33: modeliranje postotnog udjela dinamičke komponente električnog opterećenja	76
Slika 34: modeliranje parametara statičke i dinamičke komponente električnog opterećenja	77
Slika 35: Prozor simulacije poremećaja u programskim paketu PowerFactory.....	79
Slika 36: Neuronska mreža sa ulaznim, skrivenim i izlaznim slojem.....	81
Slika 37: Arhitektura LSTM mreže [80].....	83
Slika 38: Arhitektura BiLSTM mreže	84
Slika 39: Distribucija denormaliziranih vrijednosti u Y skupu.....	96
Slika 40: Povijest metrike srednje kvadratne pogreške (MSE) kroz epohe	98
Slika 41: Povijest metrike srednje apsolutne pogreške (MAE) kroz epohe	99
Slika 42: Usporedba stvarnih vrijednosti konstantne impedancije Z sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže.....	101
Slika 43: Usporedba stvarnih vrijednosti konstantne struje I sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže.....	102
Slika 44: Usporedba stvarnih vrijednosti konstantne snage P sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže.....	102
Slika 45: Usporedba stvarnih vrijednosti postotnog udjela dinamičke komponente opterećenja AM u odnosu na ukupno opterećenje sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže.....	103
Slika 46: Usporedba stvarnih vrijednosti eksponenta $tm1$ mehaničkog momenta asinkronog motora sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže	103
Slika 47: Usporedba stvarnih vrijednosti vremenske konstante inercije Tj asinkronog motora, sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže	104

Slika 48: Usporedba stvarnih vrijednosti klizanja scr pri maksimalnom/prekretnom elektromagnetskom momentu asinkronog motora, sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže	104
Slika 49: Usporedba stvarnih vrijednosti klizanja s_0 u uvjetima ravnoteže elektromagnetskog momenta i mehaničkog momenta asinkronog motora, sa vrijednostima predviđanja neuronske mreže	105
Slika 50: Jednopolna shema 110 kV postrojenja TS Oštarije	106
Slika 51: Jednopolna shema 35 kV postrojenja TS Oštarije	107
Slika 52: Dnevni dijagram opterećenja TS Oštarije	108
Slika 53: Povijest metrike srednje kvadratne pogreške (MSE) kroz epohe za treniranje mreže na trolne kvarove	112
Slika 54: Povijest metrike srednje apsolutne pogreške (MAE) kroz epohe za treniranje mreže na trolne kvarove	113
Slika 55: Povijest metrike srednje kvadratne pogreške (MSE) kroz epohe za treniranje na manipulacije regulacijskom sklopom	115
Slika 56: Povijest metrike srednje apsolutne pogreške (MAE) kroz epohe za treniranje na manipulacije regulacijskom sklopom	116
Slika 57: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 1 (DV 35 kV Slunj)	119
Slika 58: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 2 (DV 35 kV Gojak)	120
Slika 59: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 3 (DV 35 kV Slunj)	121
Slika 60: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 4 (DV 35 kV Gojak)	122
Slika 61: Prikaz efektivnih vrijednosti struja i napona za kvar br. 5 (DV 35 kV Gojak)	123
Slika 62: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 1	126
Slika 63: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 1	126
Slika 64: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 1	126
Slika 65: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 2	127
Slika 66: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 2	127
Slika 67: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 2	127
Slika 68: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 3	128
Slika 69: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 3	128
Slika 70: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 3	128
Slika 71: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 4	129
Slika 72: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 4	129

Slika 73: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 4.....	129
Slika 74: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 5	130
Slika 75: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 5	130
Slika 76: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 5.....	130
Slika 77: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 6	131
Slika 78: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 6	131
Slika 79: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 6.....	131
Slika 80: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 7	132
Slika 81: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 7	132
Slika 82: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 7.....	132
Slika 83: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 8	133
Slika 84: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 8	133
Slika 85: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 8.....	133
Slika 86: Snimka zaslona SCADA sustava HOPS-a – uzorak br. 9	134
Slika 87: Struja i napon faze R (stvarne vrijednosti) – uzorak br. 9	134
Slika 88: Struja i napon faze R (normalizirane vrijednosti) – uzorak br. 9.....	134
Slika 89: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 1 (na DV 35 kV Slunj).....	140
Slika 90: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 3 (na DV 35 kV Slunj).....	140
Slika 91: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 2 (na DV 35 kV Gojak).....	141
Slika 92: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 4 (na DV 35 kV Gojak).....	141
Slika 93: Harmonička analiza stvarnog kvara br. 5 (na DV 35 kV Gojak).....	142

Popis tablica

Tablica 1: Klasifikacija stabilnosti elektroenergetskog sustava bazirana na kriteriju vremena	13
Tablica 2: Prikaz eksponenata određenih komponenti opterećenja	24
Tablica 3: Dinamičko stanje opterećenja i varijable potražnje	27
Tablica 4: Tipični parametri ekvivalentnog kruga asinkronih motora [18]	29
Tablica 5: Parametri modeliranog EES-a.....	61
Tablica 6: Parametri opterećenja po čvorovima.....	62
Tablica 7: Svojstvene vrijednosti koje odgovaraju najslabijem modu za svaki pojedini nepredviđeni događaj	64
Tablica 8: Indikatori stabilnosti napona za bazni slučaj i najteži nepredviđeni događaj	65
Tablica 9: Indikatori stabilnosti napona i rangiranje korektivnih radnji (obnovljivi izvori električne energije i baterijski spremnici) za nepredviđeni događaj br. 7.....	66
Tablica 10: Indikatori stabilnosti napona i rangiranje korektivnih radnji (sinkroni generator) za nepredviđeni događaj br. 7	67
Tablica 11: Indikatori stabilnosti napona i rangiranje korektivnih radnji (manipulacije regulacijskim sklopkama koje rade pod opterećenjem) za nepredviđeni događaj br. 7.....	69
Tablica 12: Indikatori naponske stabilnosti za različite vrste opterećenja priključene u čvor 6	70
Tablica 13: struktura potrošnje električne energije (DP) Elektra Karlovac	72
Tablica 14: Arhitektura razvijenog dvosmjernog LSTM modela	89
Tablica 15: Konačne metrike na testnom uzorku.....	99
Tablica 16: Koeficijent determinacije R^2 za svaki izlazni parametar.....	100
Tablica 17: Konačne metrike na testnom uzorku za treniranje mreže na trolejne kvarove ..	113
Tablica 18: Koeficijent determinacije R^2 za svaki izlazni parametar za treniranje mreže na trolejne kvarove.....	114
Tablica 19: Konačne metrike na testnom uzorku za treniranje mreže na manipulacije regulacijskom sklopom	116
Tablica 20: Koeficijent determinacije R^2 za svaki izlazni parametar za treniranje mreže na manipulacije regulacijskom sklopom.....	117
Tablica 21: Vrijednosti predikcija ciljanih parametara opterećenja na osnovu stvarnih kvarova	124

Tablica 22: Vrijednosti predikcija ciljanih parametara opterećenja na osnovu stvarnih manipulacija regulacijskom sklopkom.....	135
Tablica 23: Usporedba metrika evaluacije MSE i MAE za sva tri slučaja treniranja neuronske mreže	136
Tablica 24: Usporedba koeficijenta determinacije R^2 za sva tri slučaja treniranja neuronske mreže	137

PODACI O AUTORU

Hrvoje Bulat rođen je 29. kolovoza 1973. u Splitu. Na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu diplomirao je 1998. godine i stekao zvanje diplomiranog inženjera elektrotehnike.

Nakon odsluženja vojnog roka, kratko radi u privatnoj tvrtki, a od srpnja 1999. godine zaposlen je u Hrvatskom operatoru prijenosnog sustava.

Od 1999. do 2013. godine obavljao je poslove inženjera relejne zaštite u Odjelu za relejnu zaštitu Prijenosnog područja Zagreb, rukovoditelja Odjela za relejnu zaštitu Prijenosnog područja Zagreb, rukovoditelja Službe za sekundarne sustave Prijenosnog područja Zagreb, te pomoćnika direktora HEP – Operatora prijenosnog sustava (raniji naziv Hrvatskog operatora prijenosnog sustava) i pomoćnika direktora Hrvatskog operatora prijenosnog sustava. Od 2013. godine do danas, zaposlen je na radnom mjestu pomoćnika direktora Prijenosnog područja Zagreb.

Član je HRO Cigre od 2004. godine. Bio je tajnik Studijskog odbora B5 – Zaštita i automatizacija HRO Cigre u razdoblju od 2008. do 2012. godine.

Autor je više od 40 članaka koji obrađuju teme relejne zaštite i vođenja elektroenergetskog sustava, kao i ostalih tema koje obrađuju problematiku elektroenergetskog sustava.

POPIS OBJAVLJENIH RADOVA AUTORA

1. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Branislav Ananijev: „Sustav relejne zaštite regulacijske prigušnice“, 17. savjetovanje, BH Komiteta Cigre Neum, Bosna i Hercegovina, 12. – 15. oktobra/listopada 2025., R.B5.03.
2. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Branislav Ananijev: „Variable shunt reactor relay protection system“, 13. Conference MAKO Cigre, Ohrid, Makedonija, October 05. – 07., 2025., SC B5-136R-EN
3. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Dalibor Šamec, Tihomir Dedić, Zoran Zbunjak, Marijan Marković: „Rekonstrukcija rasklopišta 220 KV TS Mraclin – sustav relejne zaštite provizornog napajanja“, 16. simpozij HRO CIGRE o vođenju EES-a, Cavtat, 4. – 7. studenoga 2024., T1-08
4. Alen Jakoplić, Dubravko Franković, Hrvoje Bulat, Michele Rojnić: „Location-Specific Optimization of Photovoltaic Forecasting Models Using Fine-Tuning Techniques“, IEEE Access, 17 July 2024., <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3429644>
5. Alen Jakoplić, Dubravko Franković, Juraj Havelka, Hrvoje Bulat: „Short-Term Photovoltaic Power Plant Output Forecasting Using Sky Images and Deep Learning“, Energies 2023, 16, 5428. <https://doi.org/10.3390/en16145428>
6. Michele Rojnić, Rene Prenc, Hrvoje Bulat, Dubravko Franković: „A Comprehensive Assessment of Fundamental Overcurrent Relay Operation Optimization Function and Its Constraints“, Energies 2022, 15, 1271. <https://doi.org/10.3390/en15041271>
7. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Dalibor Šamec, Marijan Marković: „Konceptija šticeenja regulacijske prigušnice snage 100 MVar“ (iz 2020.); 15. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 07. – 10. studenoga 2021., SO B5-01
8. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Dalibor Šamec, Marijan Marković: „Odabir načina regulacije visokonaponske prigušnice snage 100 MVar“ (iz 2020.); 15. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 07. – 10. studenoga 2021., SO B5-02
9. Davorin Burgund, Hrvoje Bulat: „Koordinacija zaštita 49R i 46I2 na releju REG670“, 15. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 07. – 10. studenoga 2021., SO B5-07

10. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić: „Sustav relejne zaštite provizornog napajanja RP/TS EL-TO tijekom rekonstrukcije 110 kV postrojenja“; 15. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 07. – 10. studenoga 2021., SO B5-12
11. Katarina Musulin, Hrvoje Bulat, Mario Jurić, Robert Teči, Domagoj Rubić, Dubravko Rumiha: „Zamjena i proširenje 110 kV metalom oklopljenog, plinom SF₆ izoliranog postrojenja EL-TO Zagreb“; 15. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 07. – 10. studenoga 2021., SO B3-10
12. Katarina Musulin, Hrvoje Bulat, Viktor Milardić, Božidar Filipović-Grčić, Mario Jurić, Mislav Ivanek: „Utjecaj uzemljivačkih vodiča na razine vrlo brzih prenapona na točkama diskontinuiteta za 110 kV SF₆ postrojenje EL-TO Zagreb“; 15. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 07. – 10. studenoga 2021., SO A3-14
13. Zoran Bunčec, Ana Kekelj, Zlatko Visković, Igor Ivanković, Hrvoje Bulat: „Pilot projekt tehničkog nadzora elemenata prijenosne mreže u TS Botinec 110/20 kV“; 15. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 07. – 10. studenoga 2021., SO C2-17
14. Hrvoje Bulat, Dubravko Franković, Saša Vlahinić: „Enhanced Contingency Analysis—A Power System Operator Tool“; *Energies* 2021, 14, 923. <https://doi.org/10.3390/en14040923>
15. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Dalibor Šamec, Marijan Marković: „Konceptija šticeenja regulacijske prigušnice snage 100 MVar“; 14. (online) simpozij HRO CIGRE o vođenju EES-a 9. – 13. studenoga 2020., T2-37
16. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Dalibor Šamec, Marijan Marković: „Odabir načina regulacije visokonaponske prigušnice snage 100 MVar“; 14. (online) simpozij HRO CIGRE o vođenju EES-a 9. – 13. studenoga 2020., T2-43
17. Ivan Goran Kuliš, Miljenko Boras, Filip Vidović, Hrvoje Bulat: „Zaštita od otočnog pogona distribuirane proizvodnje sa sinkronim generatorima“; 14. savjetovanje, BH Komiteta Cigre Neum, Bosna i Hercegovina, 20. – 23. oktobra/listopada 2019., R.B5.02.
18. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Tihomir Dedić: „Sustav relejne zaštite provizornog napajanja TS Koprivnica tijekom rekonstrukcije 110 kV postrojenja“; 14. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 10. – 13. studenoga 2019., SO B5-11

19. Dragan Ljubičić Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić: „Rekonstrukcija TS 110/35 kV Koprivnica uspostavom provizornog napajanja“; 14. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 10. – 13. studenoga 2019., SO B3-04
20. Katarina Musulin, Hrvoje Bulat, Mario Jurić, Ivan Petrić: „Primjena koncepta neprekinutosti pogona postrojenja 110 kV u EL-TO Zagreb za vrijeme održavanja, popravka i proširenja postrojenja te dielektričnih ispitivanja na terenu“; 14. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 10. – 13. studenoga 2019., SO B3-15
21. Ervin Černetić, Hrvoje Bulat, Ratko Ivković: „Saniranje lijeve obale stare Drave radi osiguranja dalekovodnog stupa br. 45 na DV 110 kV Koprivnica – HE Dubrava“; 14. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 10. – 13. studenoga 2019., SO B2-09
22. Hrvoje Bulat, Branislav Ananijev, Filip Vidović, Ivan Goran Kulis: „Power Transformers Sympathetic Inrush Phenomena and Possible Consequences with Emphasis on Protection Functions within Numerical Relays“; 10. Conference MAKO Cigre, Ohrid, Makedonija, September 24 – 26, 2017., SC B5-054R-EN
23. Hrvoje Bulat, Filip Vidović, Ivan Goran Kuliš: „Problematika šticećenja nehomogenih vodova i odabir optimalnog rješenja“; 13. savjetovanje, BH Komiteta Cigre, Neum, Bosna i Hercegovina, 17. – 21. septembra/rujna 2017., R.B5.01.
24. Dalibor Šamec, Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Viktor Bodiš: „Analiza djelovanja distantnog releja upotrebom programskog alata Omicron Advance Transplay“; 13. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 05. – 08. studenoga 2017., SO B5-13
25. Katarina Musulin, Hrvoje Bulat, Mario Jurić, Dragan Ljubičić: „Rekonstrukcija zrakom izoliranog postrojenja 110 kV u plinom SF₆ izolirano postrojenje 110 kV u TS 110/10(20) kV Kutina“; 13. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 05. – 08. studenoga 2017., SO B3-14
26. Katarina Musulin, Hrvoje Bulat, Mario Jurić, Ivan Petrić: „ Analiza opravdanosti ugradnje SF₆ postrojenja 110 kV s obzirom na trošak investicije, održavanje i pouzdanost“; 13. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 05. – 08. studenoga 2017., SO A3-02

27. Hrvoje Bulat, Miljenko Boras, Bogdan Grahovac: „Odabir optimalnog rješenja štice nje nehomogenih vodova u prijenosnoj mreži“; 12. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 08. – 11. studenoga 2015., SO B5-09
28. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić, Tin Bobetko: „Rekonstrukcija sabirničkih sustava 110 kV TS Međurić 220/110/35 kV“; 12. savjetovanje HRO CIGRE Šibenik, 08. – 11. studenoga 2015., SO B5-12
29. Srđan Skok, Vedran Kirinčić, Dalibor Brnobić, Zdeslav Čerina, Hrvoje Bulat: „System integrity protection and control based on synchronized measurements“; 4th International conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Istanbul, Turska, 2013. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635606>
30. Hrvoje Bulat, Srđan Skok, Vedran Kirinčić: „Synchronized phasor measurements in a dual layer hybrid state estimator“; Tehnički vjesnik: znanstveno-stručni časopis tehničkih fakulteta Sveučilišta u Osijeku, 2013. <https://hrcak.srce.hr/112324>
31. Srđan Skok, Dalibor Brnobić, Vedran Kirinčić, Zdeslav Čerina, Hrvoje Bulat: „Modeliranje elektroenergetskog sustava na osnovu sinkroniziranih mjerenja fazora“; 10. simpozij HRO CIGRE Opatija, 11. – 14. studenoga 2012., 1-07
32. Hrvoje Bulat, Tomislav Stjepandić: „Problematika štice nje nehomogenih dalekovoda“; 10. savjetovanje HRO CIGRE, Cavtat, Hrvatska, 06. – 10. studenoga 2011., SO B5-20
33. Srđan Skok, Igor Ivanković, Tomislav Plavšić, Hrvoje Bulat: „Automatsko vođenje dijela prijenosnog sustava Prijenosnog područja Zagreb“; 9. simpozij HRO CIGRE Zadar, 08. – 10. studenoga 2010., 1-05
34. Hrvoje Bulat, Viktor Bodiš, Zdeslav Čerina: „Simpatetično uključenje transformatora i moguće posljedice s naglaskom na nove funkcije unutar procesorskog releja“; 9. savjetovanje HRO CIGRE Cavtat, 08. – 12. studenoga 2009., SO B5-10
35. Hrvoje Bulat, Krunoslav Turk, Tomislav Stjepandić: „Napredne metode ispitivanja zaštite dalekovoda sa tri kraka“; 9. savjetovanje HRO CIGRE Cavtat, 08. – 12. studenoga 2009., SO B5-19

36. Igor Đurić, Hrvoje Bulat, Miljenko Antolić: „Rekonstrukcija sustava relejne zaštite, upravljanja i nadzora u TS 110/10(20) kV Petrinja“; 8. savjetovanje HRO CIGRE Cavtat, 04. – 08. studenoga 2007., SO B5-07
37. Ana Šaškor, Domagoj Ožanić, Hrvoje Bulat, Goran Leci, Davor Šesnić: „Prvi ugrađeni sustav daljinskog upravljanja, zaštite i mjerenja temeljen na IEC 61850 na području HEP OPS-a“; 8. savjetovanje HRO CIGRE Cavtat, 04. – 08. studenoga 2007., SO B5-18
38. Igor Ivanković, Hrvoje Bulat, Božidar Filipović-Grčić, Tomislav Stjepandić: „Udešenje relejne zaštite prijenosne mreže korištenjem napredne programske podrške“; 7. simpozij HRO CIGRE Cavtat, 05. – 08. studenoga 2006., 4-09
39. Hrvoje Bulat, Igor Ivanković, Zdeslav Čerina: „Efekt okretanja smjera struje kod jednopolnih kvarova na paralelnim dalekovodima u prijenosnoj mreži“; 7. savjetovanje HRO CIGRE Cavtat, 04. – 08. studenoga 2005., SO B5-07
40. Hrvoje Bulat, Igor Ivanković, Viktor Bodiš: „Ispitivanje sustava relejne zaštite paralelnih dalekovoda“; 6. simpozij HRO CIGRE Cavtat, 07. – 10. studenoga 2004., 4-17
41. Darko Nemec, Milan Stojšavljević, Hrvoje Bulat, Čelio Klapčić: „Ispitivanje zaštite od nestanka uzbude injekcijom signala iz EMTP simulacije“; 6. simpozij HRO CIGRE Cavtat, 07. – 10. studenoga 2004., 4-18
42. Darko Nemec, Hrvoje Bulat, Milan Stojšavljević, Čelio Klapčić: „Loss of Excitation Protection Testing by Transient Playback of EMTP Simulation Results“; 14th International Conference On Power System Protection; Bled, Slovenija, 2004.
43. Hrvoje Bulat, Krunoslav Turk, Igor Ivanković: „Iskustva u primjeni programskih paketa za proračun struja kratkih spojeva i tokova snaga u mreži Prijenosnog područja Zagreb“; 6. savjetovanje HRO CIGRE Cavtat, 09. – 13. studenoga 2003., B5-11
44. Robert Vlajčević, Hrvoje Bulat, Viktor Bodiš: „Realizacija uzdužne diferencijalne zaštite sa digitalnom telekomunikacijskom mrežom“; 6. savjetovanje HRO CIGRE Cavtat, 09. – 13. studenoga 2003., B5-22

45. Igor Ivanković, Robert Vlajčević, Hrvoje Bulat: „Funkcije relejne zaštite za sprječavanje naponskog sloma“; 5. simpozij HRO CIGRE Cavtat, 20. – 23. listopada 2002., 4-02
46. Zdeslav Čerina, Hrvoje Bulat: „Specifičnosti jednopolnih kvarova na paralelnim dalekovodima u prijenosnoj mreži“; 5. simpozij HRO CIGRE Cavtat, 20. – 23. listopada 2002., 4-03
47. Božidar Filipović-Grčić, Igor Ivanković, Hrvoje Bulat, Zdeslav Čerina: „Zaštita od ispada iz koraka generatora“; 5. savjetovanje HRO CIGRE Cavtat, 04. – 08. studenoga 2001., R 34-05

PRILOZI

Stvarni kvar br. 1: efektivne vrijednosti struja i napona

VP_PKT 35 kV

- 1 -

25/03/2012 / 17:12:30.582

VP_PKT 35 kV

File path: F:\PRILOG_ZAPISI\KVAROVA\12325001_SLUNJ_1.CFG

Start time: 25/03/2012 17:12:29.782

Sample rate: 2000 Hz

Value representation: secondary

Record type: COMTRADE

26/10/2025 / 15:26:44
SIGRA 4.60 SP1

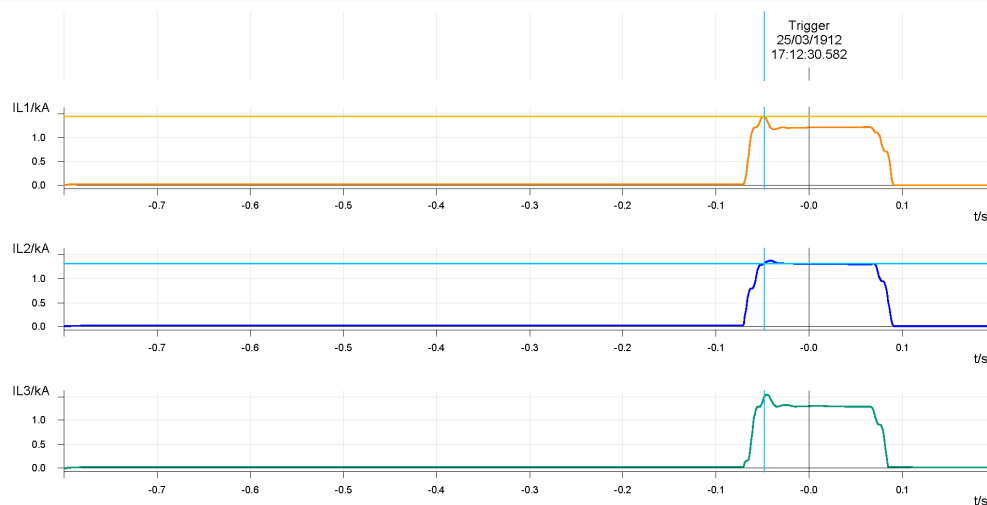
12325001_SLUNJ_1.CFG

VP_PKT 35 kV

- 2 -

25/03/2012 / 17:12:30.582

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-48.2	IL1	0.2824 kA	1.4480 kA
Cursor 2:	-48.2	IL2	1.4576 kA	1.3183 kA
C2 - C1	0.0	IL2 - IL1	1.1753 kA	-0.1297 kA



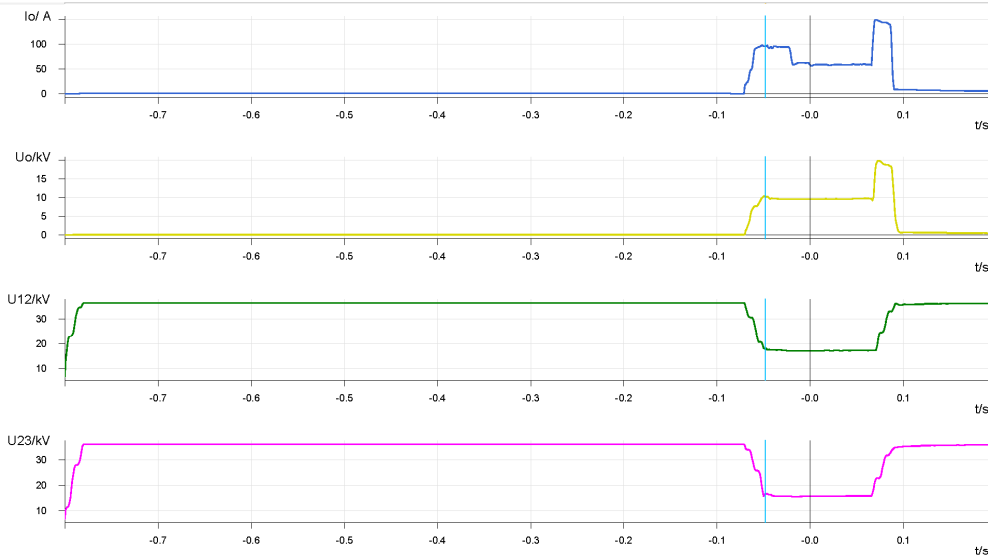
26/10/2025 / 15:26:44
SIGRA 4.60 SP1

12325001_SLUNJ_1.CFG

VP_PKT 35 kV

- 3 -

25/03/2012 / 17:12:30.582



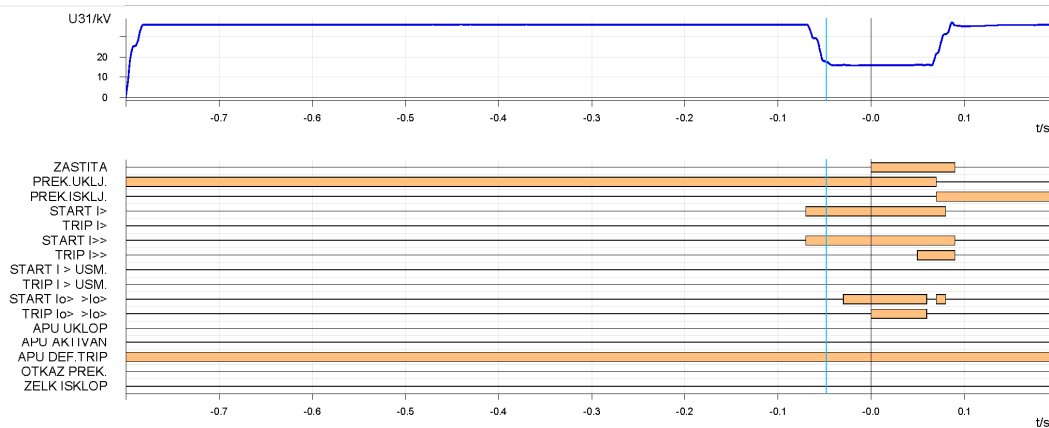
26/10/2025 / 15:26:44
SIGRA 4.60 SP1

12325001_SLUNJ_1.CFG

VP_PKT 35 kV

- 4 -

25/03/2012 / 17:12:30.582



26/10/2025 / 15:26:44
SIGRA 4.60 SP1

12325001_SLUNJ_1.CFG

Stvarni kvar br. 2: efektivne vrijednosti struja i napona

VP 35 kV

- 1 -

28/05/2011 / 03:31:09.232

VP 35 kV

File path: F:\PRILOG_ZAPISI\KVAROVA\11528001_GOJAK_2.CFG

Start time: 28/05/2011 03:31:08.432

Sample rate: 2000 Hz

Value representation: secondary

Record type: COMTRADE

26/10/2025 / 15:30:20
SIGRA 4.60 SP1

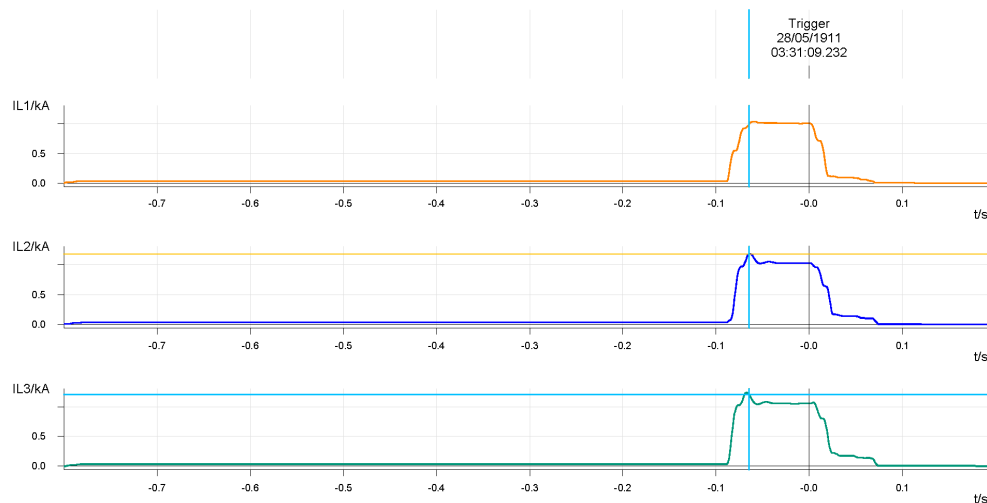
11528001_GOJAK_2.CFG

VP 35 kV

- 2 -

28/05/2011 / 03:31:09.232

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-64.82	IL2	0.9504 kA	1.1745 kA
Cursor 2:	-64.25	IL3	0.6999 kA	1.2081 kA
C2 - C1	0.57	IL3 - IL2	-0.2505 kA	0.0336 kA



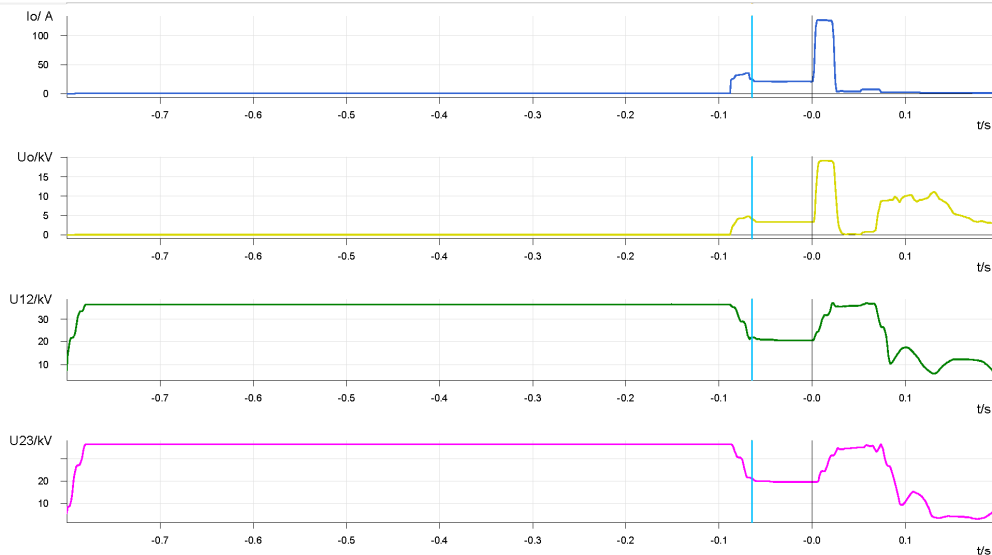
26/10/2025 / 15:30:20
SIGRA 4.60 SP1

11528001_GOJAK_2.CFG

VP 35 kV

- 3 -

28/05/2011 / 03:31:09.232



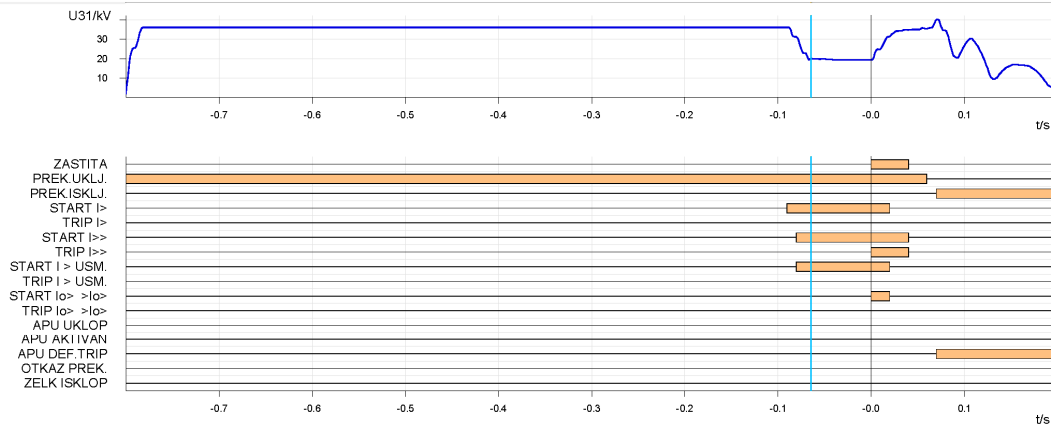
26/10/2025 / 15:30:20
SIGRA 4.60 SP1

11528001_GOJAK_2.CFG

VP 35 kV

- 4 -

28/05/2011 / 03:31:09.232



26/10/2025 / 15:30:20
SIGRA 4.60 SP1

11528001_GOJAK_2.CFG

Stvarni kvar br. 3: efektivne vrijednosti struja i napona

VP_PKT 35 kV

- 1 -

29/08/2009 / 14:11:18.381

VP_PKT 35 kV

File path: F:\PRILOG_ZAPISI\KVAROVA\09829001_SLUNJ_3.CFG

Start time: 29/08/2009 14:11:17.581

Sample rate: 2000 Hz

Value representation: secondary

Record type: COMTRADE

26/10/2025 / 15:43:21
SIGRA 4.60 SP1

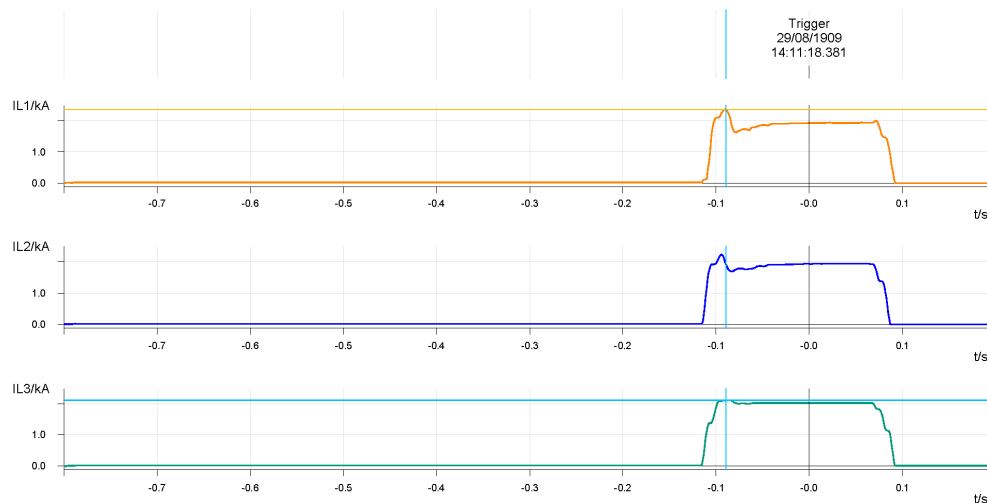
09829001_SLUNJ_3.CFG

VP_PKT 35 kV

- 2 -

29/08/2009 / 14:11:18.381

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-89.4	IL1	0.1520 kA	2.3434 kA
Cursor 2:	-89.4	IL3	-2.6731 kA	2.1049 kA
C2 - C1	0.0	IL3 - IL1	-2.8252 kA	-0.2385 kA



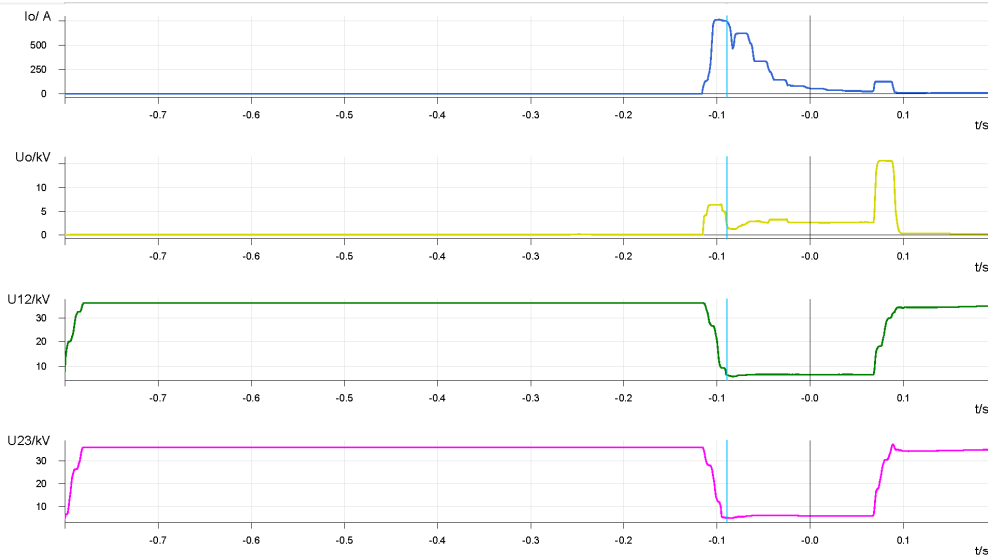
26/10/2025 / 15:43:21
SIGRA 4.60 SP1

09829001_SLUNJ_3.CFG

VP_PKT 35 kV

- 3 -

29/08/2009 / 14:11:18.381



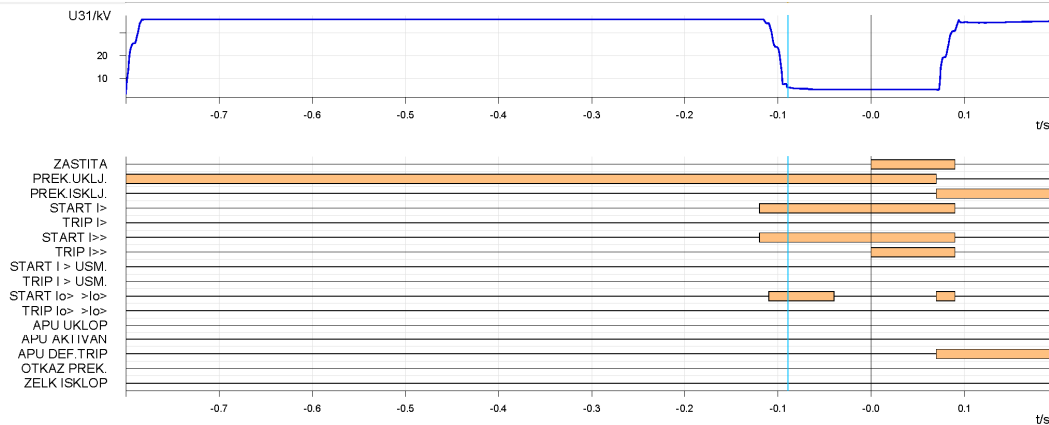
26/10/2025 / 15:43:21
SIGRA 4.60 SP1

09829001_SLUNJ_3.CFG

VP_PKT 35 kV

- 4 -

29/08/2009 / 14:11:18.381



26/10/2025 / 15:43:21
SIGRA 4.60 SP1

09829001_SLUNJ_3.CFG

Stvarni kvar br. 4: efektivne vrijednosti struja i napona

VP 35 kV

- 1 -

22/08/2007 / 04:13:31.524

VP 35 kV

File path: F:\PRILOG_ZAPISI\KVAROVA\07822001_GOJAK_4.CFG

Start time: 22/08/2007 04:13:30.724

Sample rate: 2000 Hz

Value representation:secondary

Record type: COMTRADE

26/10/2025 / 17:43:35

07822001_GOJAK_4.CFG

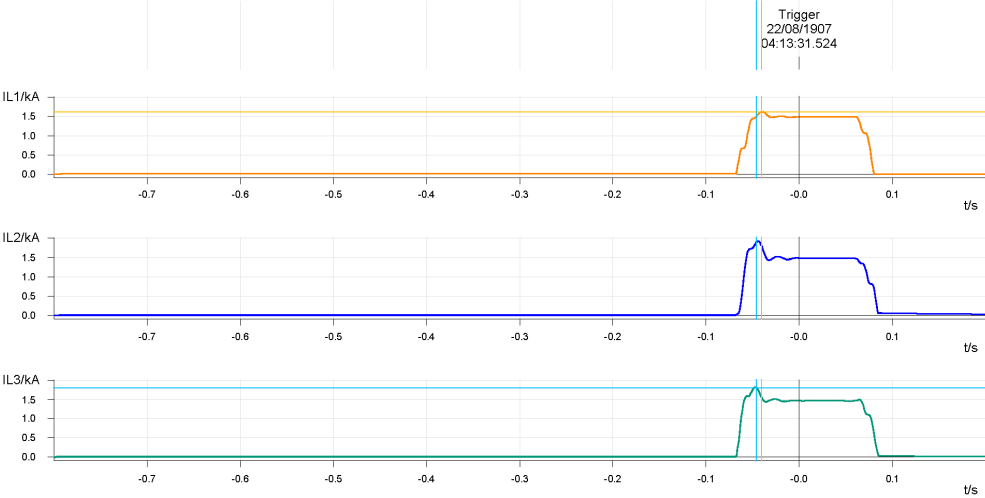
SIGRA 4.60 SP1

VP 35 kV

- 2 -

22/08/2007 / 04:13:31.524

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-40.2	IL1	-0.6566 kA	1.6263 kA
Cursor 2:	-45.9	IL3	0.07525 kA	1.8165 kA
C2 - C1	-5.7	IL3 - IL1	0.73189 kA	0.1902 kA



26/10/2025 / 17:43:35

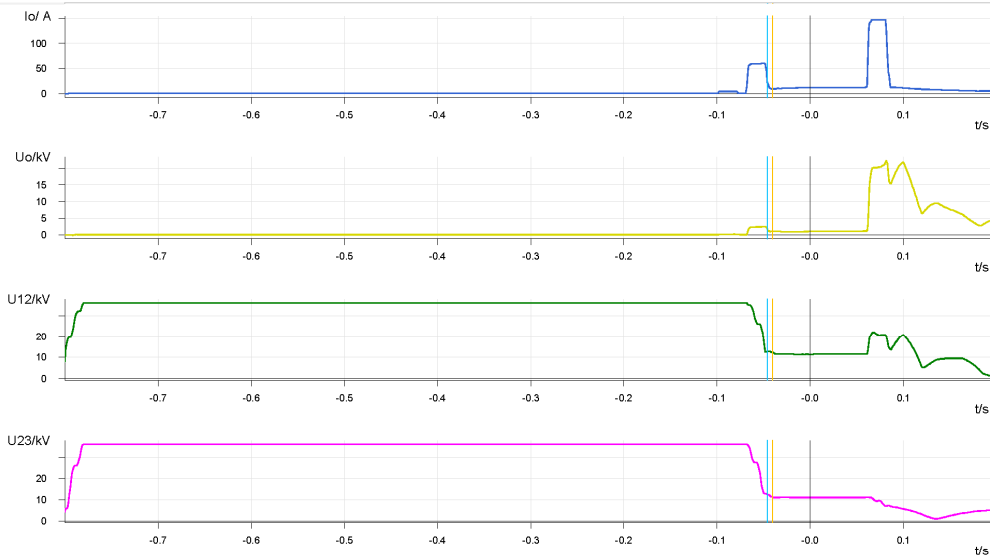
07822001_GOJAK_4.CFG

SIGRA 4.60 SP1

VP 35 kV

- 3 -

22/08/2007 / 04:13:31.524



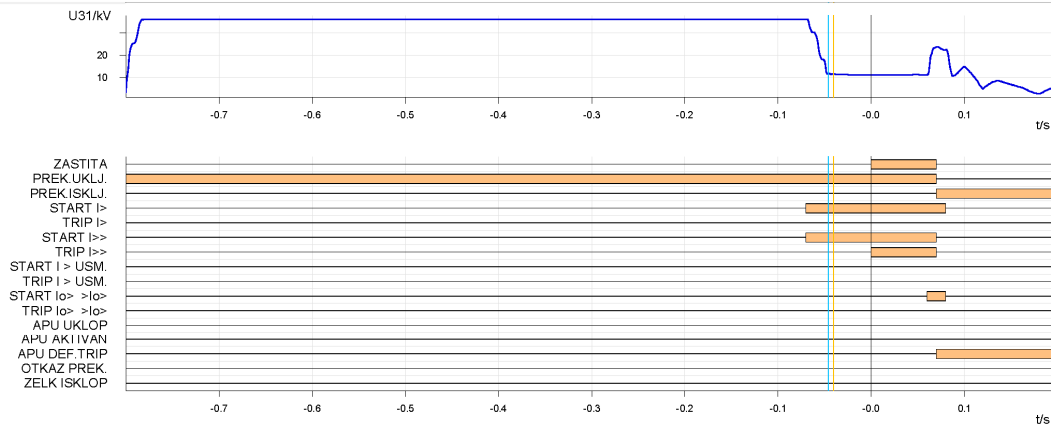
26/10/2025 / 17:43:35
SIGRA 4.60 SP1

07822001_GOJAK_4.CFG

VP 35 kV

- 4 -

22/08/2007 / 04:13:31.524



26/10/2025 / 17:43:35
SIGRA 4.60 SP1

07822001_GOJAK_4.CFG

Stvarni kvar br. 5: efektivne vrijednosti struja i napona

VP 35 kV

- 1 -

11/06/2007 / 13:45:59.998

VP 35 kV

File path: F:\PRILOG_ZAPISI KVAROVA\07611001_GOJAK_5.CFG

Start time: 11/06/2007 13:45:59.198

Sample rate: 2000 Hz

Value representation:secondary

Record type: COMTRADE

26/10/2025 / 17:45:2007611001_GOJAK_5.CFG

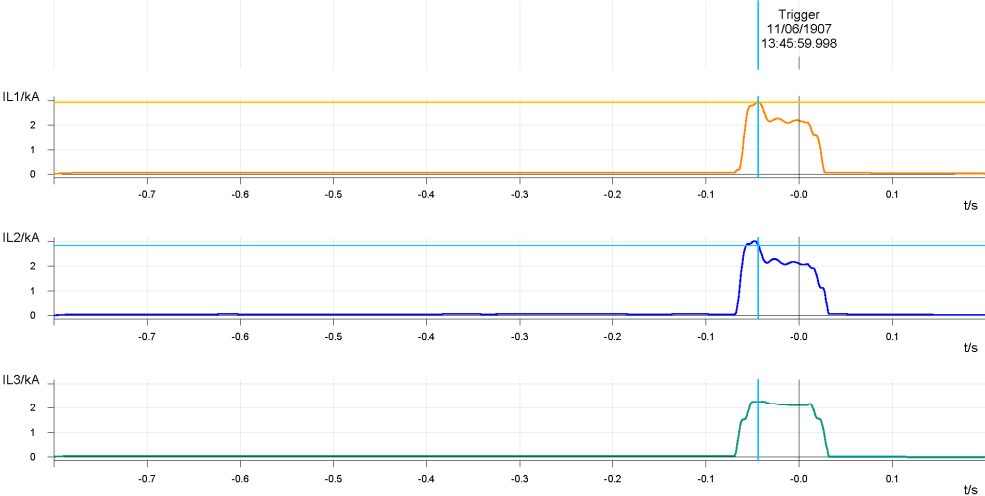
SIGRA 4.60 SP1

VP 35 kV

- 2 -

11/06/2007 / 13:45:59.998

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-43.7	IL1	-0.6330 kA	2.9411 kA
Cursor 2:	-43.7	IL2	-2.4374 kA	2.8393 kA
C2 - C1	0.0	IL2 - IL1	-1.8044 kA	-0.1019 kA



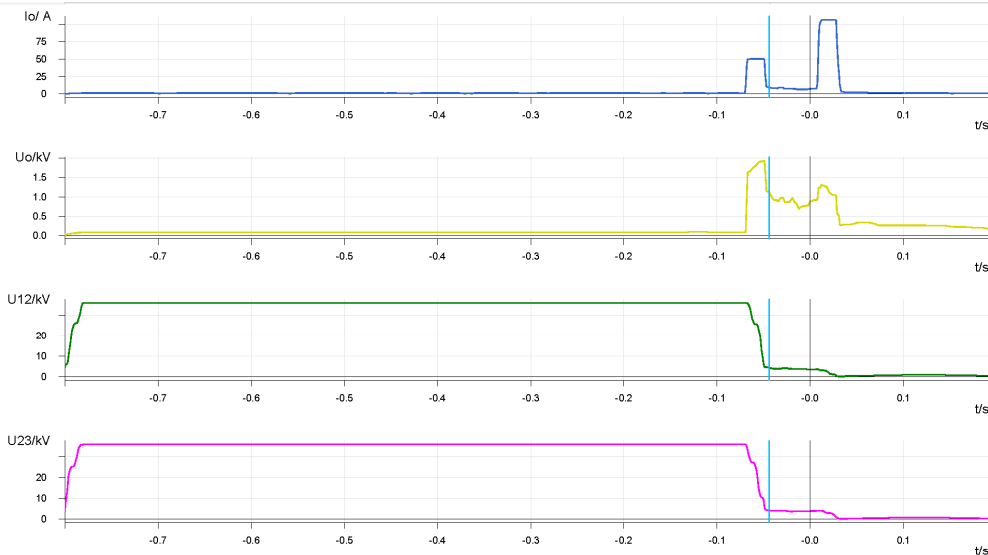
26/10/2025 / 17:45:2007611001_GOJAK_5.CFG

SIGRA 4.60 SP1

VP 35 kV

- 3 -

11/06/2007 / 13:45:59.998



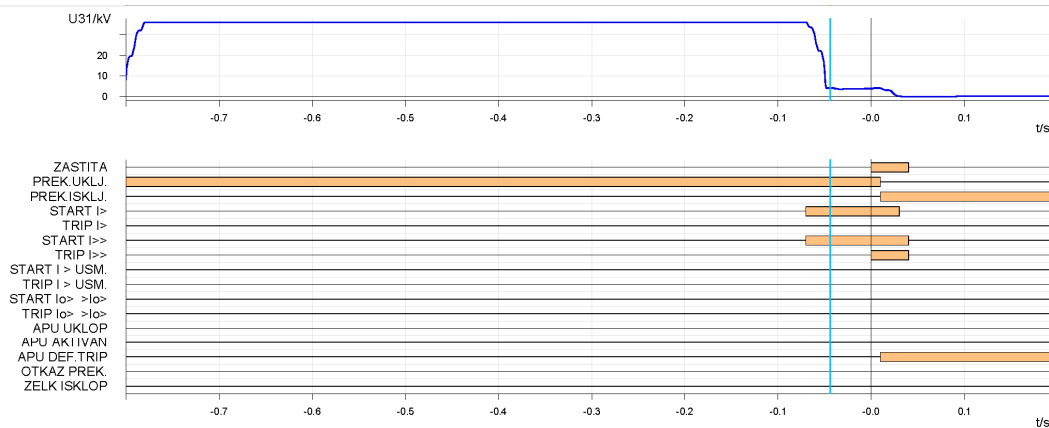
26/10/2025 / 17:45:20
SIGRA 4.60 SP1

07611001_GOJAK_5.CFG

VP 35 kV

- 4 -

11/06/2007 / 13:45:59.998



26/10/2025 / 17:45:20
SIGRA 4.60 SP1

07611001_GOJAK_5.CFG

Stvarni kvar br. 1: trenutne vrijednosti struja i napona

VP_PKT 35 kV

- 1 -

25/03/2012 / 17:12:30.582

VP_PKT 35 kV

File path: F:\PRILOG_ZAPISI KVAROVA\TRENUTNE VRIJEDNOSTI\12325001_SLUNJ_1.CFG

Start time: 25/03/2012 17:12:29.782

Sample rate: 2000 Hz

Value representation: secondary

Record type: COMTRADE

20/11/2025 / 11:57:03

12325001_SLUNJ_1.CFG

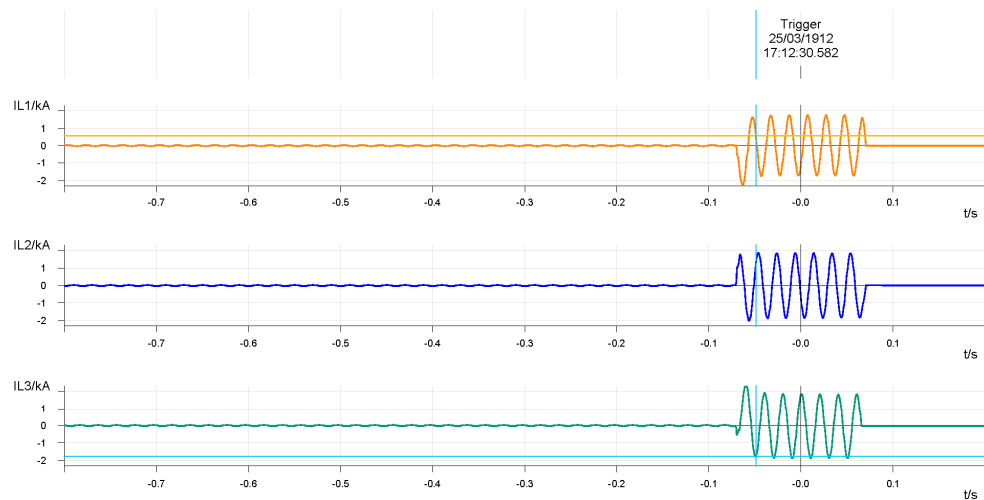
SIGRA 4.60 SP1

VP_PKT 35 kV

- 2 -

25/03/2012 / 17:12:30.582

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-48.8	IL1	0.5701 kA	1.4521 kA
Cursor 2:	-48.8	IL3	-1.7638 kA	1.4702 kA
C2 - C1	0.0	IL3 - IL1	-2.3338 kA	0.0181 kA



20/11/2025 / 11:57:04

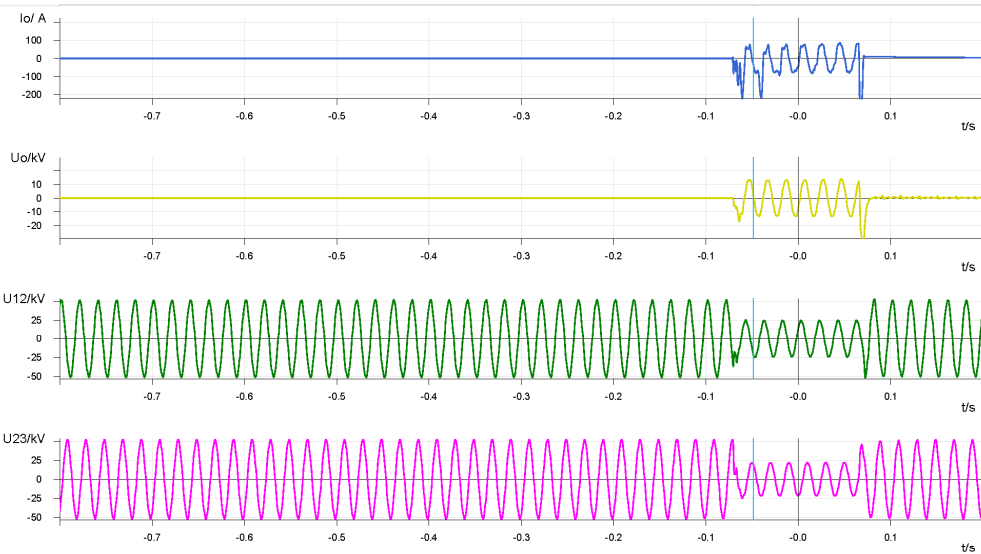
12325001_SLUNJ_1.CFG

SIGRA 4.60 SP1

VP_PKT 35 kV

- 3 -

25/03/2012 / 17:12:30.582



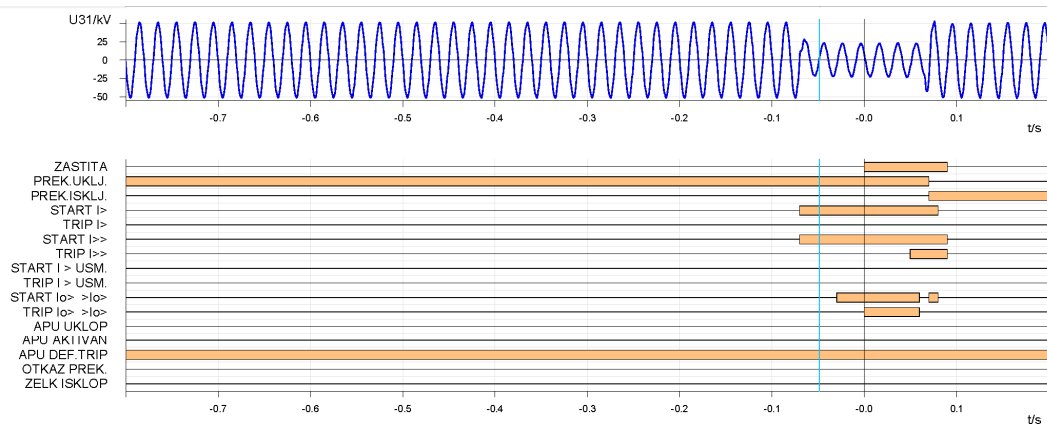
20/11/2025 / 11:57:04
SIGRA 4.60 SP1

12325001_SLUNJ_1.CFG

VP_PKT 35 kV

- 4 -

25/03/2012 / 17:12:30.582



20/11/2025 / 11:57:04
SIGRA 4.60 SP1

12325001_SLUNJ_1.CFG

Stvarni kvar br. 2: trenutne vrijednosti struja i napona

VP 35 kV

- 1 -

28/05/2011 / 03:31:09.232

VP 35 kV

File path: F:\PRILOG_ZAPISI KVAROVA\TRENUTNE VRIJEDNOSTI\11528001_GOJAK_2.CFG

Start time: 28/05/2011 03:31:08.432

Sample rate: 2000 Hz

Value representation: secondary

Record type: COMTRADE

20/11/2025 / 12:03:35

SIGRA 4.60 SP1

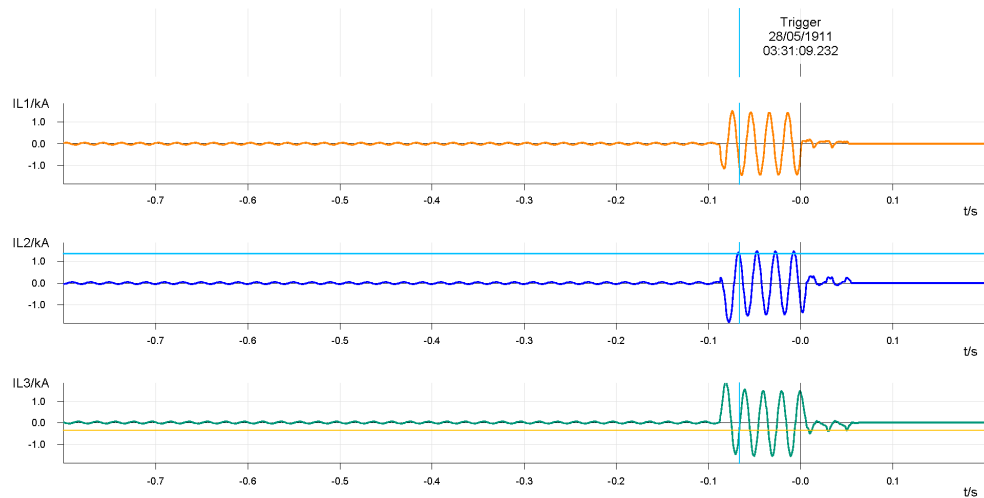
11528001_GOJAK_2.CFG

VP 35 kV

- 2 -

28/05/2011 / 03:31:09.232

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-66.5	IL3	-0.3437 kA	1.2401 kA
Cursor 2:	-66.5	IL2	1.3443 kA	1.1278 kA
C2 - C1	0.0	IL2 - IL3	1.6880 kA	-0.1124 kA



20/11/2025 / 12:03:35

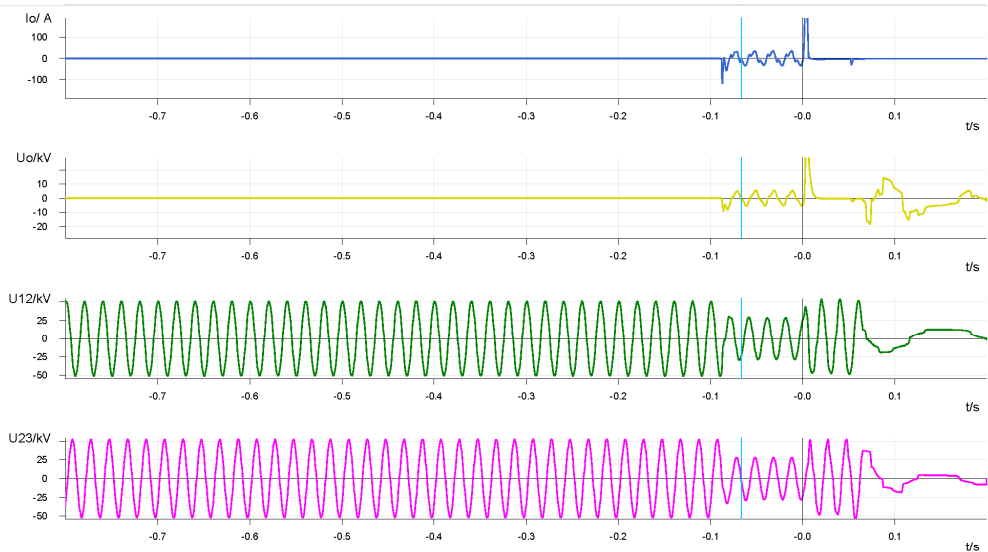
SIGRA 4.60 SP1

11528001_GOJAK_2.CFG

VP 35 kV

- 3 -

28/05/2011 / 03:31:09.232



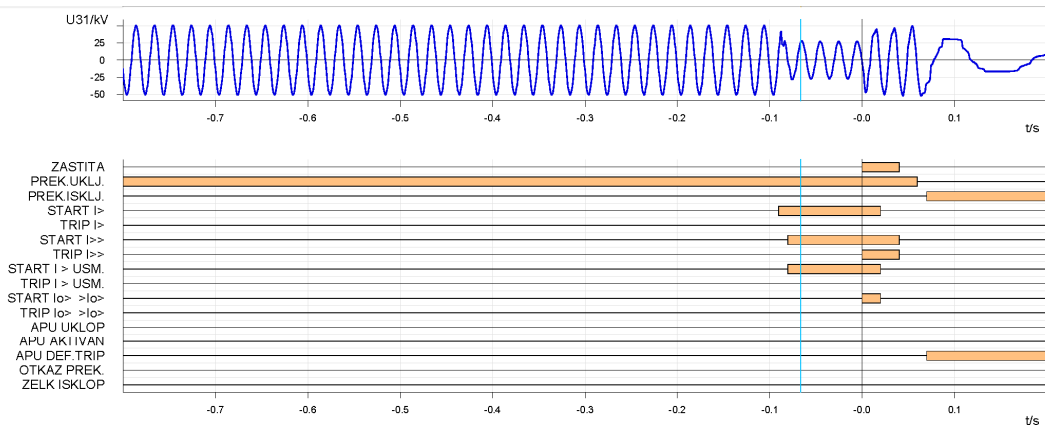
20/11/2025 / 12:03:35
SIGRA 4.60 SP1

11528001_GOJAK_2.CFG

VP 35 kV

- 4 -

28/05/2011 / 03:31:09.232



20/11/2025 / 12:03:35
SIGRA 4.60 SP1

11528001_GOJAK_2.CFG

Stvarni kvar br. 3: trenutne vrijednosti struja i napona

VP_PKT 35 kV

- 1 -

29/08/2009 / 14:11:18.381

VP_PKT 35 kV

File path: F:\PRILOG_ZAPISI KVAROVA\TRENUTNE VRIJEDNOSTI\09829001_SLUNJ_3.CFG

Start time: 29/08/2009 14:11:17.581

Sample rate: 2000 Hz

Value representation:secondary

Record type: COMTRADE

20/11/2025 / 12:05:38
SIGRA 4.60 SP1

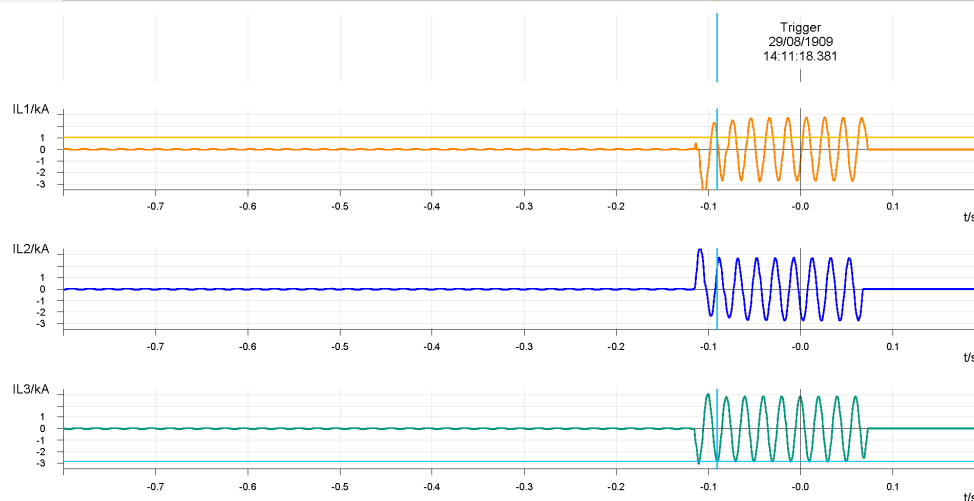
09829001_SLUNJ_3.CFG

VP_PKT 35 kV

- 2 -

29/08/2009 / 14:11:18.381

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-90.6	IL1	1.0367 kA	2.3522 kA
Cursor 2:	-90.6	IL3	-2.8381 kA	2.1059 kA
C2 - C1	0.0	IL3 - IL1	-3.8749 kA	-0.2463 kA



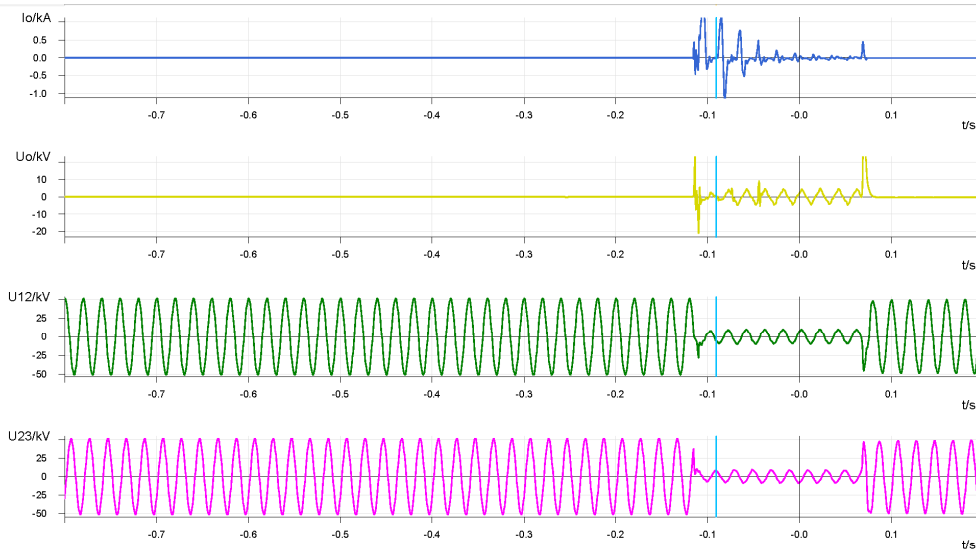
20/11/2025 / 12:05:38
SIGRA 4.60 SP1

09829001_SLUNJ_3.CFG

VP_PKT 35 kV

- 3 -

29/08/2009 / 14:11:18.381



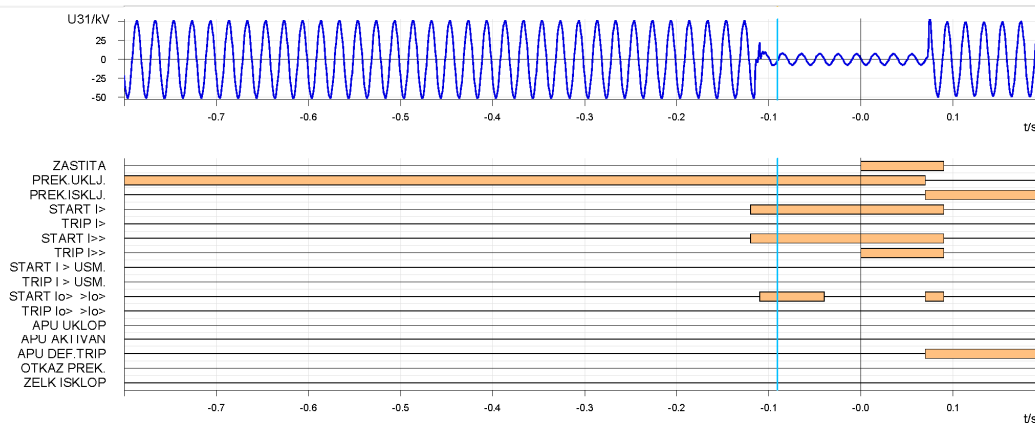
20/11/2025 / 12:05:38
SIGRA 4.60 SP1

09829001_SLUNJ_3.CFG

VP_PKT 35 kV

- 4 -

29/08/2009 / 14:11:18.381



20/11/2025 / 12:05:38
SIGRA 4.60 SP1

09829001_SLUNJ_3.CFG

Stvarni kvar br. 4: trenutne vrijednosti struja i napona

VP 35 kV	- 1 -	22/08/2007 / 04:13:31.524
VP 35 kV		
File path:	F:\PRILOG_ZAPISI KVAROVA\TRENUTNE VRIJEDNOSTI\07822001_GOJAK_4.CFG	
Start time:	22/08/2007 04:13:30.724	
Sample rate:	2000 Hz	
Value representation:	secondary	
Record type:	COMTRADE	

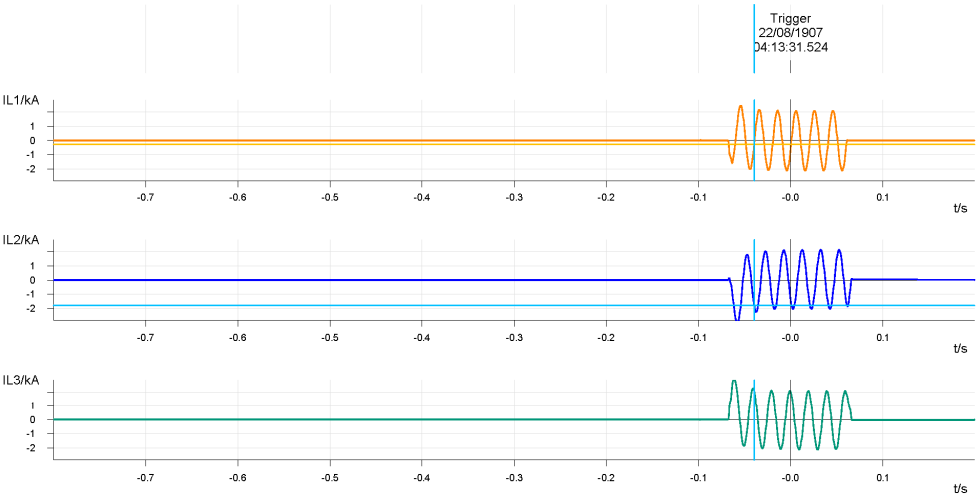
20/11/2025 / 12:07:42

07822001_GOJAK_4.CFG

SIGRA 4.60 SP1

VP 35 kV	- 2 -	22/08/2007 / 04:13:31.524
----------	-------	---------------------------

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-39.6	IL1	-0.2891 kA	1.6272 kA
Cursor 2:	-39.6	IL2	-1.7912 kA	1.7636 kA
C2 - C1	0.0	IL2 - IL1	-1.5022 kA	0.1363 kA



20/11/2025 / 12:07:42

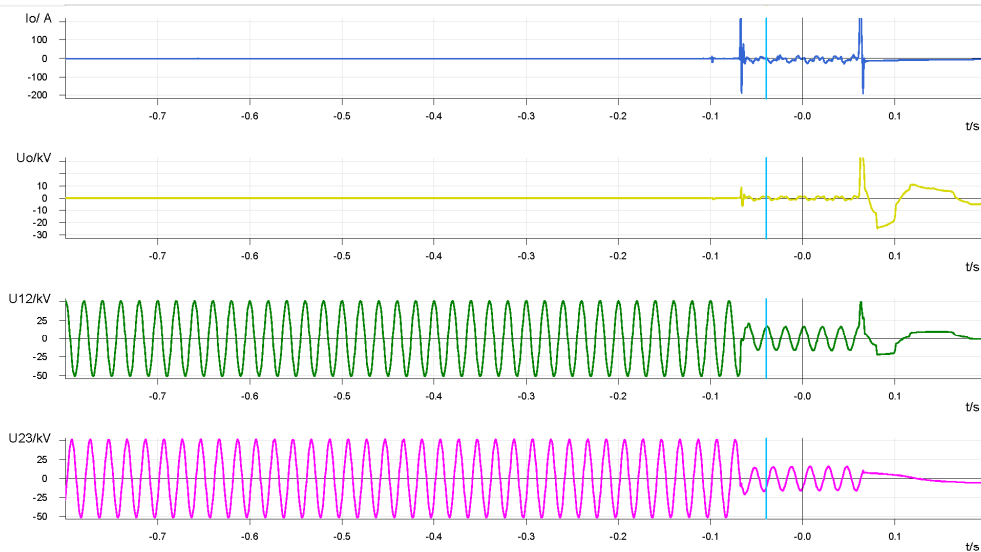
07822001_GOJAK_4.CFG

SIGRA 4.60 SP1

VP 35 kV

- 3 -

22/08/2007 / 04:13:31.524



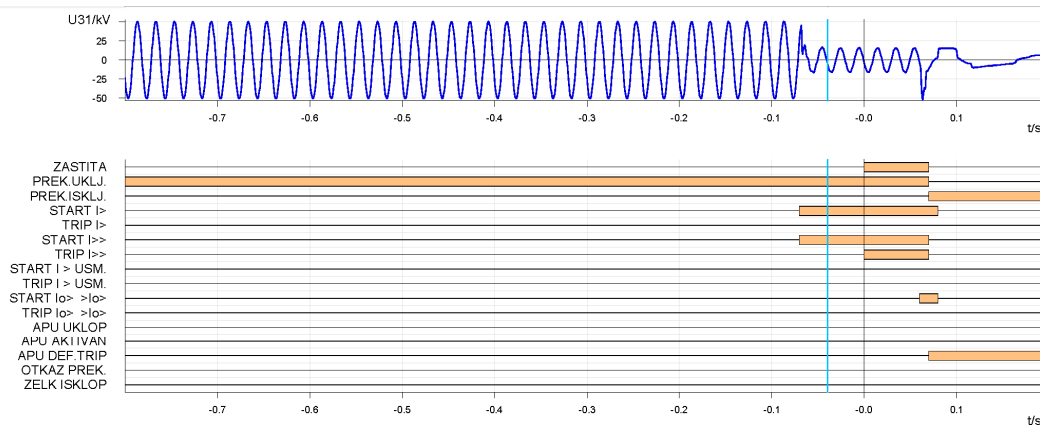
20/11/2025 / 12:07:42
SIGRA 4.60 SP1

07822001_GOJAK_4.CFG

VP 35 kV

- 4 -

22/08/2007 / 04:13:31.524



20/11/2025 / 12:07:42
SIGRA 4.60 SP1

07822001_GOJAK_4.CFG

Stvarni kvar br. 5: trenutne vrijednosti struja i napona

VP 35 kV

- 1 -

11/06/2007 / 13:45:59.998

VP 35 kVFile path: F:\PRILOG_ZAPISI KVAROVA\TRENUTNE VRIJEDNOSTI\07611001_GOJAK_5.CFGStart time: 11/06/2007 13:45:59.198Sample rate: 2000 HzValue representation:secondaryRecord type: COMTRADE

20/11/2025 / 12:08:4807611001_GOJAK_5.CFG

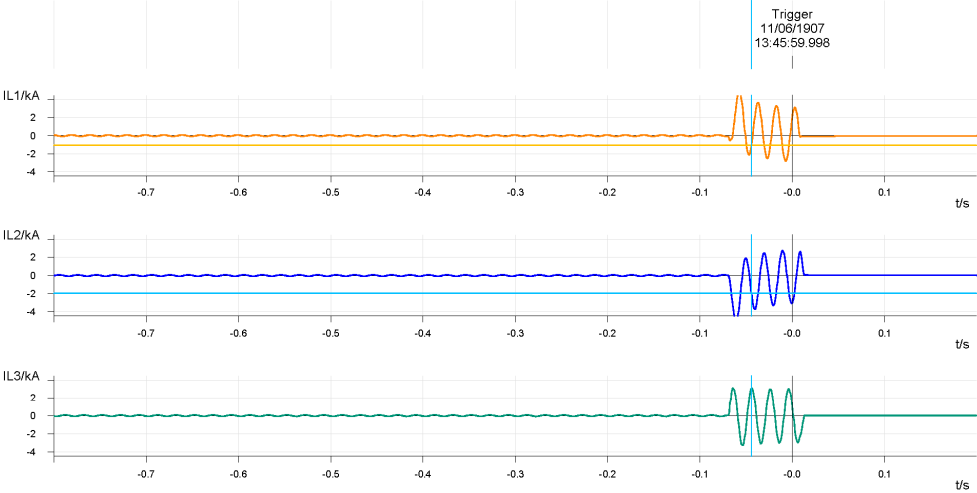
SIGRA 4.60 SP1

VP 35 kV

- 2 -

11/06/2007 / 13:45:59.998

	Time in ms	Measuring Signal	Instantaneous	R.M.S.
Cursor 1:	-44.2	IL1	-1.0667 kA	2.9430 kA
Cursor 2:	-44.2	IL2	-1.9816 kA	2.8862 kA
C2 - C1	0.0	IL2 - IL1	-0.9149 kA	-0.0569 kA



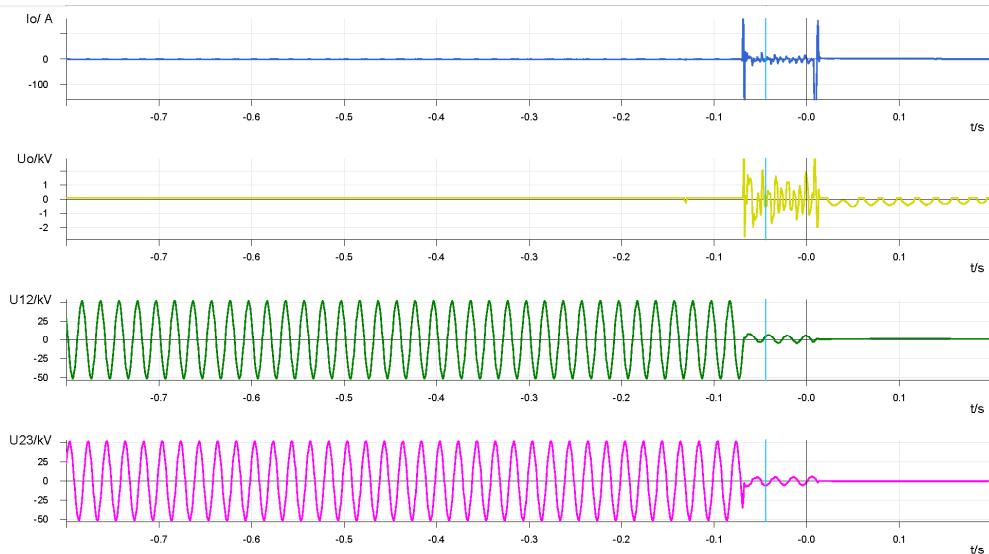
20/11/2025 / 12:08:4807611001_GOJAK_5.CFG

SIGRA 4.60 SP1

VP 35 kV

- 3 -

11/06/2007 / 13:45:59.998



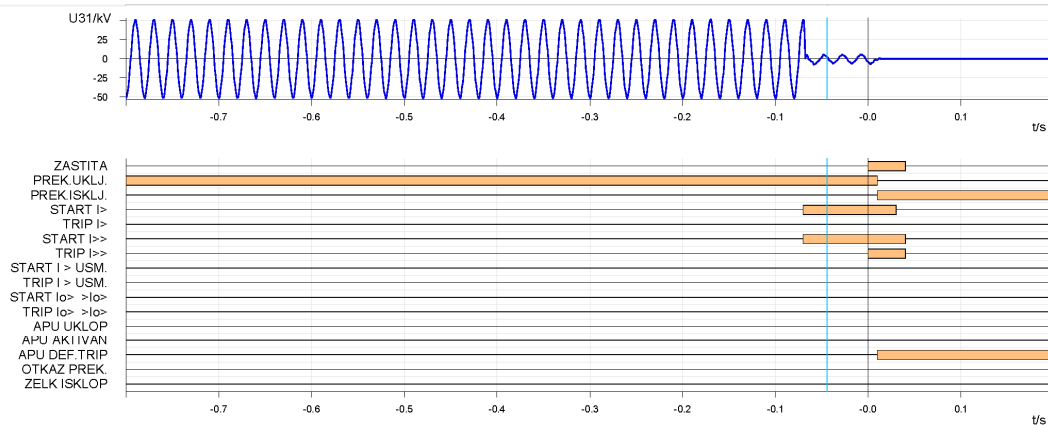
20/11/2025 / 12:08:48
SIGRA 4.60 SP1

07611001_GOJAK_5.CFG

VP 35 kV

- 4 -

11/06/2007 / 13:45:59.998



20/11/2025 / 12:08:49
SIGRA 4.60 SP1

07611001_GOJAK_5.CFG