

UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Lazar Šćekić

**DIZAJN SISTEMA ZA PRIGUŠENJE
NISKO-FREKVENTNIH
MEĐU-ZONSKIH OSCILACIJA U
ELEKTROENERGETSKIM SISTEMIMA**

– Doktorska disertacija –

Podgorica, 2025. godine

UNIVERSITY OF MONTENEGRO
FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

Lazar Šćekić

WIDE-AREA DAMPING CONTROL FOR
MITIGATING LOW FREQUENCY
INTER-AREA OSCILLATIONS IN
INTERCONNECTED POWER SYSTEMS

– PhD thesis –

Podgorica, 2025

PODACI O DOKTORANDU, MENTORU I ČLANOVIMA KOMISIJE

DOKTORAND

Ime i prezime: Lazar Šćekić
Datum i mjesto rođenja: 1. februar 1998. godine, Nikšić, Crna Gora
Naziv završenog postdiplomskog studijskog programa: Elektrotehnički fakultet, odsjek *Energetika i automatika*, smjer *Elektroenergetski sistemi* – magistarske studije
Godina završetka: 2022.

MENTOR: **dr Zoran Miljanić**, konsultant

KOMISIJA ZA OCJENU
PODOBNOSTI TEZE I
KANDIDATA: **Prof. dr Saša Mujović**, redovni profesor,
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet
Prof. dr Vladan Radulović, redovni profesor,
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet
dr Zoran Miljanić, konsultant

KOMISIJA ZA OCJENU
DOKTORSKE DISERTACIJE: **Prof. dr Saša Mujović**, redovni profesor,
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet
Prof. dr Vladan Radulović, redovni profesor,
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet
Prof. dr Žarko Zečević, vanredni profesor,
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet

KOMISIJA ZA ODBRANU
DOKTORSKE DISERTACIJE: **Prof. dr Saša Mujović**, redovni profesor,
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet
Prof. dr Tomislav Šekara, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet
Prof. dr Vladan Radulović, redovni profesor,
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet
Prof. dr Žarko Zečević, vanredni profesor,
Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet
dr Zoran Miljanić, konsultant

DATUM ODBRANE: 6. novembar 2025. godine

ZAHVALNICA

Završetak ove doktorske disertacije predstavlja kraj izuzetno izazovnog i iscrpljujućeg procesa, koji je bio ispunjen brojnim preprekama. Prije svega, ovo je posljedica složenosti same istraživačke oblasti i mog vrlo ograničenog poznavanja iste na početku doktorskih studija. Uz to, u Crnoj Gori i regionu postoje vrlo ograničeni laboratorijski kapaciteti za sprovođenje istraživanja u oblasti stabilnosti elektroenergetskih sistema, zbog čega eksperimentalna verifikacija razvijenih metoda nije bila moguća. Nadalje, ove poteškoće su dodatno pojačane velikim radnim opterećenjem kojem su izloženi saradnici u nastavi na Univerzitetu Crne Gore. Tokom izrade ove disertacije postao sam uvjeren u neophodnost strateških promjena u pogledu statusa saradnika u nastavi na Univerzitetu Crne Gore, kako bi se u potpunosti njegovao potencijal mladih istraživača i spriječio *burnout* sindrom.

U kontekstu pomenutih poteškoća, prve dvije godine rada na ovoj disertaciji bile su obilježene veoma oskudnim istraživačkim rezultatima, što je često djelovalo obeshrabrujuće. U takvim trenucima, završetak ove disertacije bio bi nemoguć bez podrške ljudi koje moram posebno pomenuti.

Prije svega, želim da izrazim neizmjernu zahvalnost mojoj porodici i prijateljima, koji su mi bili glavni oslonac tokom izrade ove disertacije. Žao mi je što zbog ogromnog obima posla nijesam uvijek mogao da budem isto to vama. Iako to možda nekada ne izgleda tako, ne postoje riječi kojima bih mogao da opišem koliko mi je vaša podrška važna i dragocjena.

Posebnu zahvalnost dugujem kolegama doc. dr Vladanu Durkoviću i dr Luki Lazoviću za brojne savjete od početka radnog angažmana na Univerzitetu Crne Gore. Savjeti koje su mi dali o procesu rada na doktorskoj disertaciji, a koje je tada bilo teško razumjeti, sažeti su u stihovima Žaka Prevera:

Tražim pomilovanje za zgužvane misli.

Za one koji su se izgubili

I svoje srce stisli.

Za one koji klecaju pod teretom svog bremena

I koji ne znaju da za sve treba vremena.

Za one koji hoće da na prečac postignu mnogo.

Važnu ulogu kako u pogledu rada na ovoj disertaciji, tako i u pogledu mog ličnog razvoja, imao je studijski boravak na Fakultetu primijenjenih nauka u Bonu. Ovim putem izražavam zahvalnost Prof. dr Vesni Popović-Bugarin na omogućavanju ove posjete, kao i kolegi mr Danilu Planiniću na stvaranju prijatne ravnoteže između privatnog i poslovnog života tokom cijelog boravka u Bonu.

Na kraju, veliku zahvalnost dugujem mom mentoru Prof. dr Zoranu Miljaniću na dugogodišnjoj saradnji koja obuhvata period od izrade diplomskog rada do danas. Posebno cijenim činjenicu da sam sve korake dosadašnjeg akademskog puta prelazio uz njegovu podršku i povjerenje.

Ovu disertaciju posvećujem mojim roditeljima, Marti i Miomiru, čija безусловna ljubav, podrška i odricanje stoje iza svakog mog uspjeha.

Lazar Šćekić
Maj, 2025. godine

PODACI O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

Naziv doktorskih studija:	Doktorske studije elektrotehnike
Naziv doktorske disertacije:	Dizajn sistema za prigušenje nisko-frekventnih među-zonskih oscilacija u elektroenergetskim sistemima
Ključne riječi:	Među-zonske oscilacije, sistemi za prigušenje oscilacija, sistemi mjerenja širokog područja, metoda reziduuma, neuralne mreže
Naučna oblast:	Elektroenergetski sistemi
Uža naučna oblast:	Stabilnost elektroenergetskih sistema

REZIME:

Među-zonske oscilacije predstavljaju oscilacije između koherentnih grupa sinhronih generatora u različitim djelovima elektroenergetskog sistema. Među-zonske oscilacije do danas predstavljaju neriješen problem, koji je kroz istoriju uzrokovao veliki broj ozbiljnih incidenata, uključujući razdvajanje ili potpune raspade nacionalnih i regionalnih elektroenergetskih sistema. Jedini praktičan pristup rješavanju problema među-zonskih oscilacija je implementacija sistema za prigušenje oscilacija. U ovoj disertaciji su predloženi novi pristupi dizajnu decentralizovanih sistema za prigušenje oscilacija. Prije svega, postojeće metode za izbor upravljačke petlje proširene su tako da se maksimizuje robusnost sistema za prigušenje oscilacija i minimizuju njegove interakcije sa ostalim modovima u elektroenergetskom sistemu. Dodatno, procedura izbora upravljačke petlje je proširena tako da se omogući simultano prigušenje više među-zonskih modova jednim kontrolerom dizajniranim primjenom metode reziduuma. Kako bi se povećala njihova robusnost na komunikaciono kašnjenje, u ovoj disertaciji je predložena primjena adaptivnog kompenzatora kašnjenja u kombinaciji sa kontrolerima za prigušenje oscilacija dizajniranim primjenom metode reziduuma. Na kraju, u ovoj disertaciji je predložen adaptivni sistem za prigušenje oscilacija u kojem se parametri kontrolera ažuriraju u realnom vremenu primjenom neuralnih mreža. Predloženi pristupi primijenjeni su za dizajn sistema za prigušenje oscilacija za Kundurov dvozonski sistem i elektroenergetski sistem regije Nove Engleske i države Njujork. Performanse dizajniranih sistema za prigušenje oscilacija ispitane su na širokom spektru radnih uslova. Predstavljani rezultati ukazuju na visok potencijal predloženih pristupa za praktične primjene u realnim elektroenergetskim sistemima.

UDK: 621.31

THESIS INFORMATION

PhD study program:	PhD studies in Electrical Engineering
PhD title:	Wide-area damping control for mitigating low frequency inter-area oscillations in interconnected power systems
Keywords:	Inter-area oscillations, wide-area damping control, wide-area measurement systems, residue method, neural networks
Scientific area:	Power systems
Specific scientific area:	Power system stability

ABSTRACT:

Inter-area oscillations occur between coherent groups of synchronous generators located in different parts of a power system. To date, inter-area oscillations remain an unresolved problem that caused numerous serious incidents in the past, including separations or complete collapses of national and regional power systems. The only practical approach to solve the problem of inter-area oscillations is the implementation of wide-area damping control systems. In this dissertation, novel approaches for the design of decentralized wide-area damping control systems are proposed. First, existing methods for control loop selection were extended to maximize the robustness of wide-area damping controllers while minimizing their interactions with other modes in the power system. In addition, the control loop selection procedure has been extended to enable simultaneous damping of multiple inter-area modes with a single residue-based damping controller. To improve their robustness to communication delays, the application of an adaptive delay compensator in combination with residue-based damping controllers is proposed in this dissertation. Finally, an adaptive wide-area damping control system is proposed in which controller parameters are updated in real time using neural networks. The proposed methods have been applied to design wide-area damping control systems for Kundur's two-area system and the New England and New York power system. The performance of the designed wide-area damping control systems was tested in a wide range of operating conditions. The presented results indicate a high potential for practical applications of the proposed methods.

UDC: 621.31

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Razvoj softverskog alata za analizu elektroenergetskih sistema	5
2.1	Modelovanje elektroenergetskih sistema	6
2.1.1	Sinhroni generatori	6
2.1.2	Pobudni sistemi	14
2.1.3	Stabilizatori elektroenergetskog sistema	23
2.1.4	Turbine i turbinski regulatori	25
2.1.5	Model elektroenergetske mreže	31
2.1.6	FACTS uređaji	35
2.1.7	Ograničavači	41
2.2	Analiza tranzijentne stabilnosti	43
2.2.1	Formulacija dinamičkog modela	44
2.2.2	Pregled metoda numeričke integracije	45
2.2.3	Implicitni trapezni metod	46
2.3	Analiza statičke stabilnosti	48
2.3.1	Formulacija dinamičkog modela	49
2.3.2	Svojstvene vrijednosti i svojstveni vektori	50
2.3.3	Svojstvene vrijednosti i stabilnost	52
2.3.4	Faktori učešća	54
2.3.5	Funkcija prenosa i rezidumi	54
2.4	Osnove implementacije softverskog alata za analizu elektroenergetskih sistema	56
2.4.1	Objektno orijentisano programiranje	56
2.4.2	Kompjuterska algebra	58
2.4.3	Tehnike rijetkih matrica	62
2.5	Verifikacija razvijenog alata za analizu elektroenergetskih sistema	63
2.5.1	Opis testnog elektroenergetskog sistema	64
2.5.2	Poređenje rezultata proračuna tokova snaga	64

2.5.3	Poređenje rezultata analize tranzijentne stabilnosti	66
2.5.4	Poređenje rezultata analize statičke stabilnosti	67
3	Pregled postojećih pristupa dizajnu sistema za prigušenje oscilacija	70
3.1	Pregled arhitektura sistema za prigušenje oscilacija	70
3.2	Pregled metoda za izbor mjernih i upravljačkih signala	73
3.3	Pregled metoda za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija	75
3.3.1	Metoda reziduuma	76
3.3.2	Metode optimalnog upravljanja	77
3.3.3	Metode robusnog upravljanja	80
3.3.4	Optimizacione metode	83
3.3.5	Inteligentne metode	85
3.4	Praznine u literaturi i ciljevi istraživanja	86
4	Predlog novih metoda za dizajn sistema za prigušenje oscilacija	91
4.1	Arhitektura sistema za prigušenje oscilacija	91
4.2	Adaptivni kompenzator kašnjenja	92
4.3	Izbor mjernih i upravljačkih signala	95
4.4	Metoda reziduuma	97
4.5	Simultano prigušenje više oscilatornih modova primjenom metode reziduuma	98
4.6	Adaptivni sistem za prigušenje oscilacija na bazi metode reziduuma i neuralnih mreža	100
4.6.1	Struktura neuralnih mreža	101
4.6.2	Obučavanje neuralnih mreža	102
4.6.3	Hiperparametri neuralnih mreža	104
4.6.4	Struktura adaptivnog sistema	111
4.6.5	Priprema podataka za obučavanje	114
5	Analiza performansi predloženih metoda	116
5.1	Studija slučaja: Kundurov dvozonski sistem	116
5.1.1	Izbor upravljačke petlje	119
5.1.2	Dizajn kontrolera primjenom metode reziduuma	121
5.1.3	Analiza statičke stabilnosti sistema	124
5.1.4	Analiza tranzijentne stabilnosti sistema	127
5.1.5	Adaptivni sistem za prigušenje oscilacija	131
5.2	Studija slučaja: sistem regije Nove Engleske i države Njujork	140
5.2.1	Izbor upravljačke petlje	142

5.2.2	Dizajn kontrolera primjenom metode reziduuma	144
5.2.3	Analiza statičke stabilnosti sistema	146
5.2.4	Analiza tranzijentne stabilnosti	149
5.2.5	Adaptivni sistem za prigušenje oscilacija	151
6	Zaključak	159
	Literatura	162

Spisak slika

2.1	Šematski prikaz sinhronog generatora sa istaknutim polovima	7
2.2	Funkcionalni blok dijagram sistema regulacije pobude	15
2.3	Blok dijagram DC1A modela jednosmjernih pobudnih sistema	18
2.4	Standardna i kaskadna forma <i>lead-lag</i> kompenzatora	19
2.5	Blok dijagram AC4A modela naizmjeničnih pobudnih sistema	21
2.6	Blok dijagram ST1A pobudnog sistema	22
2.7	Blok dijagram tipičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema	23
2.8	Funkcionalni blok dijagram sistema automatske regulacije proizvodnje	25
2.9	Blok dijagram TGOV1 modela parnih turbina	28
2.10	Blok dijagram IEEE3 modela hidrauličnih turbina	30
2.11	Topologija SVC uređaja	36
2.12	Blok dijagram dinamičkog modela SVC uređaja	37
2.13	Topologija TCSC uređaja	38
2.14	Ekvivalentne zamjenske šeme TCSC uređaja	39
2.15	Blok dijagram dinamičkog modela TCSC uređaja	40
2.16	<i>Windup</i> i <i>anti-windup</i> model ograničavača	41
2.17	Poređenje odziva <i>windup</i> i <i>anti-windup</i> ograničavača	42
2.18	Ilustracija trapeznog pravila	46
2.19	Primjer klasnog dijagrama	57
2.20	Jednopolna šema Kundurovog dvozonkog sistema	64
2.21	Poređenje odziva sistema u slučaju priključenja reaktora na sabirnice 8	66
2.22	Poređenje odziva sistema u slučaju promjene referentnih napona	67
2.23	Poređenje odziva nelinearnog i linearizovanog modela sistema	69
3.1	Decentralizovana arhitektura sistema za prigušenje oscilacija	71
3.2	Centralizovana arhitektura sistema za prigušenje oscilacija	72
3.3	Distribuirana arhitektura sistema za prigušenje oscilacija	72
4.1	Arhitektura sistema za prigušenje oscilacija	92
4.2	Frekventni odziv funkcije prenosa kompenzovanog kašnjenja	94

4.3	Ilustracija metode reziduuma	97
4.4	Struktura neuralne mreže sa jednim neuronom	101
4.5	Struktura potpuno povezane neuralne mreže	102
4.6	Poređenje aktivacionih funkcija	106
4.7	Struktura adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija	113
5.1	Dizajn stabilizatora elektroenergetskog sistema za generator 2	118
5.2	Histogrami ugla reziduuma upravljačkih petlji u dvozonskom sistemu	121
5.3	Geometrijsko mjesto korijena sistema za različite vrijednosti pojačanja	122
5.4	Histogramski prikaz faktora prigušenja među-zonskog moda	124
5.5	Performanse razvijenih kontrolera pri različitim nivoima kašnjenja . .	125
5.6	Poređenje uticaja komunikacionog kašnjenja na među-zonski mod . .	127
5.7	Razlika brzina obrtanja rotora generatora 2 i 4 nakon kvara	128
5.8	Varijacije snage razmjene između zona nakon kvara	128
5.9	Prilagođavanje težinskih koeficijenata adaptivnog kompenzatora ka- šnjenja	129
5.10	Poređenje upravljačkih signala različitih kontrolera u dvozonskom si- stemu	130
5.11	Poređenje napona na sabirnicama generatora 3 sa različitim kontro- lerima	130
5.12	Odziv dvozonskog sistema pri različitim nivoima kašnjenja	131
5.13	Konvergenција Bajesovske optimizacije za dvozonski sistem	134
5.14	Krive gubitka neuralne mreže za dvozonski sistem	135
5.15	Raspodjela faktora prigušenja sa klasičnim i adaptivnim kontrolerom	137
5.16	Odziv dvozonskog sistema sa klasičnim i adaptivnim kontrolerom . .	138
5.17	Uticaj kašnjenja u ažuriranju parametara na odziv dvozonskog sistema	139
5.18	Jednopolna šema sistema Nove Engleske i države Njujork	140
5.19	Svoјstvene vrijednosti sistema od 68 čvorova	141
5.20	Histogrami ugla reziduuma upravljačkih petlji u sistemu od 68 čvorova	143
5.21	Geometrijsko mjesto korijena sistema za različite vrijednosti pojačanja	145
5.22	Histogramski prikaz faktora prigušenja među-zonskih modova	146
5.23	Performanse razvijenih kontrolera pri različitim nivoima kašnjenja . .	147
5.24	Poređenje uticaja komunikacionog kašnjenja na među-zonske modove	148
5.25	Razlika brzina obrtanja rotora generatora 14 i 15 nakon kvara	149
5.26	Upravljački signali različitih kontrolera za prigušenje oscilacija	150
5.27	Odziv sistema od 68 čvorova pri različitim nivoima kašnjenja	151
5.28	Rezultati primjene analize glavnih komponenti	153
5.29	Konvergenција Bajesovske optimizacije za sistem od 68 čvorova	153

5.30	Krive gubitka neuralne mreže za sistem od 68 čvorova	154
5.31	Raspodjela faktora prigušenja sa klasičnim i adaptivnim kontrolerom	156
5.32	Odziv sistema od 68 čvorova sa klasičnim i adaptivnim sistemom . . .	158

Spisak tabela

2.1	Parametri sinhronog generatora	12
2.2	Parametri DC1A modela jednosmjernih pobudnih sistema	20
2.3	Parametri AC4A modela naizmjeničnih pobudnih sistema	21
2.4	Parametri tipičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema	24
2.5	Parametri TGOV1 modela parnih turbina	29
2.6	Parametri IEEE3 modela hidrauličnih turbina	31
2.7	Parametri dinamičkog modela SVC uređaja	38
2.8	Parametri dinamičkog modela TCSC uređaja	40
2.9	Poređenje performansi i memorijskih zahtjeva gustih i rijetkih matrica	63
2.10	Poređenje fazora napona u čvorovima sistema	65
2.11	Poređenje aktivnih i reaktivnih snaga generatora	65
2.12	Poređenje svojstvenih vrijednosti sistema	68
5.1	Modalna analiza dvozonkog sistema bez stabilizatora	117
5.2	Modalna analiza dvozonkog sistema sa stabilizatorima	118
5.3	Potencijalne upravljačke petlje u dvozonskom sistemu	120
5.4	Parametri kontrolera uz različite pristupe tretiranja kašnjenja	123
5.5	Optimizacija hiperparametara za dvozonski sistem	134
5.6	Pokazatelji performansi klasifikacije u dvozonskom sistemu	136
5.7	Pokazatelji performansi regresije u dvozonskom sistemu	136
5.8	Modalna analiza sistema od 68 čvorova sa FACTS uređajima	142
5.9	Potencijalne upravljačke petlje u sistemu od 68 čvorova	142
5.10	Parametri kontrolera uz različite pristupe tretiranja kašnjenja	145
5.11	Udio adekvatno prigušenih scenarija u sistemu od 68 čvorova	147
5.12	Poređenje performansi kontrolera za prigušenje oscilacija	150
5.13	Optimizacija hiperparametara za sistem od 68 čvorova	154
5.14	Pokazatelji performansi klasifikacije u sistemu od 68 čvorova	155
5.15	Pokazatelji performansi regresije u sistemu od 68 čvorova	155
5.16	Poređenje performansi klasičnog i adaptivnog sistema	157

Spisak isječaka koda

- 2.1 Funkcija za formiranje sistema jednačina u simboličkoj formi 60
- 2.2 Funkcija za konverziju simboličkih izraza u numeričke funkcije 61

Glava 1

Uvod

Dva osjećanja moramo jednom zauvijek iskorijeniti – strah od buduće patnje i sjećanje na prošlu patnju, jer me prošla više ne dotiče, a buduća me još uvijek ne dotiče.

Seneka, Pisma prijatelju, 78:15

Elektroenergetski sistemi predstavljaju infrastrukturnu osnovu na kojoj počivaju funkcionisanje, ekonomski i tehnološki razvoj savremenog društva. Zbog izražene zavisnosti od električne energije, čak i relativno kratki prekidi napajanja mogu imati ozbiljne socio-ekonomske posljedice. O ovome najbolje govore podaci Svjetske banke prema kojima godišnji ekonomski gubici usljed prekida napajanja samo u zemljama u razvoju prevazilaze 120 milijardi američkih dolara [1].

Kao posljedica niza međusobno povezanih procesa, elektroenergetski sistemi širom svijeta doživljavaju značajne promjene. Prije svega, usljed demografskog i ekonomskog rasta, elektrifikacije transporta i ubrzane digitalizacije, globalna potražnja za električnom energijom kontinuirano raste. Istovremeno, pod uticajem sve izraženijih zahtjeva za očuvanjem životne sredine, elektroenergetski sistemi suočeni su sa ubrzanom integracijom obnovljivih izvora energije i postepenim gašenjem konvencionalnih proizvodnih kapaciteta na fosilna goriva. Dodatno, liberalizacija i povezivanje nacionalnih berzi električne energije doveli su do značajnog povećanja prekograničnih razmjena. Zbog svega navedenog, očuvanje stabilnosti elektroenergetskih sistema predstavlja sve veći izazov, koji je dodatno otežan sve češćim ekstremnim vremenskim događajima i rastućim sajber prijetnjama.

Jedan od najvažnijih problema stabilnosti u složenim elektroenergetskim sistemima je problem slabo prigušenih oscilacija. Najčešći tip oscilacija u elektroenergetskim sistemima su elektromehaničke oscilacije, koje nastaju kao posljedica debalansa između potrošnje i proizvodnje uzrokovanog malim ili velikim poremećajima.

Elektromehaničke oscilacije uočene su s prvim stavljanjem sinhronih generatora u paralelan rad na zajedničkoj mreži. Sinhroni generatori u paralelnom radu su spontano oscilovali oko ravnotežne tačke (eng. *hunting*), a ovaj problem je riješen razvojem prigušnog namotaja, premda na uštrb povećanja struja kratkih spojeva. Dalji razvoj elektroenergetskih sistema bio je diktiran zahtjevima za očuvanjem sinhronizma nakon velikih poremećaja kao što su kratki spojevi. U ovu svrhu, sinhroni generatori opremljeni su brzim pobudnim sistemima sa mogućnošću forsiranja pobude, čije djelovanje rezultira povećanjem sinhronizacionog momenta. Iako se na ovaj način poboljšava stabilnost sistema pri velikim poremećajima, brzi pobudni sistemi sa visokom vrijednošću tranzijentnog pojačanja rezultiraju smanjenjem prigušnog momenta. Kao posljedica, mali poremećaji praćeni su elektromehaničkim oscilacijama dugog trajanja ili čak rastuće amplitude.

U zavisnosti od komponenti elektroenergetskog sistema koje učestvuju u oscilacijama, razlikuju se lokalne i među-zonske oscilacije. Lokalne oscilacije predstavljaju oscilacije jednog generatora ili grupe generatora u okviru iste elektrane u odnosu na ostatak sistema. Sa druge strane, među-zonske oscilacije predstavljaju oscilacije koherentne grupe generatora u jednom dijelu sistema u odnosu na koherentnu grupu generatora u drugom dijelu sistema. Dok se učestanost lokalnih oscilacija obično kreće u opsegu od 1 do 2 Hz, među-zonskim oscilacijama pripada frekventni opseg od 0,1 do 1 Hz. Iz tog razloga, elektromehaničke oscilacije se u dostupnoj literaturi najčešće nazivaju niskofrekventnim oscilacijama.

Problem lokalnih oscilacija je u najvećoj mjeri riješen razvojem stabilizatora elektroenergetskog sistema. Stabilizatori elektroenergetskog sistema generišu modulišući signal koji rezultira komponentom elektromagnetnog momenta koja je u fazi sa odstupanjem brzine obrtanja rotora sinhronog generatora. Nažalost, među-zonske oscilacije najčešće nijesu opservabilne u lokalnim mjerenjima brzine obrtanja rotora ili snage na sabirnicama generatora. Sa druge strane, kontrolabilnost među-zonskih oscilacija putem pobudnih sistema sinhronih generatora zavisi od veličine generatora, njegove lokacije u sistemu, kao i vrste pobudnog sistema. Dodatno, analiza među-zonskih oscilacija zahtijeva detaljno modelovanje cijelog elektroenergetskog sistema, što je do razvoja savremenih industrijskih softvera predstavljalo značajnu prepreku. Zbog svega navedenog, među-zonske oscilacije do danas predstavljaju neriješen problem, koji je kroz istoriju predstavljao uzrok velikog broja incidenata. Neki od najpoznatijih su razdvajanje sistema Italije, Jugoslavije i Austrije, razdvajanje sistema Turske od ostatka Evrope, kao i potpuni raspadi sistema Australije, Kine i Sjedinjenih Američkih Država [2]. Dva incidenta sa oscilacijama rastuće amplitude desila su se i u sistemu kontinentalne Evrope 2016. i 2017. godine [3, 4].

Rješenje problema među-zonskih oscilacija postalo je moguće razvojem sistema mjerenja širokog područja (eng. *Wide-Area Measurement System*, WAMS). WAMS se zasniva na uređajima za sinhronizovano mjerenje fazora (eng. *Phasor Measurement Unit*, PMU), koji su postavljeni na strateškim lokacijama u elektroenergetskom sistemu. Za razliku od tradicionalnih mjerenja sa brzinom ažuriranja od jednog uzorka na svake 2 do 4 sekunde, fazorska mjerenja karakteriše brzina ažuriranja od 30 do 240 uzoraka u sekundi [5]. Uz to, fazorska mjerenja su vremenski sinhronizovana, što ih čini izuzetno efikasnim u praćenju prelaznih procesa. Koristeći mogućnosti WAMS-a, moguće je razviti specijalizovane sisteme za prigušenje oscilacija (eng. *Wide-Area Damping Control*, WADC), čija je efikasnost dokazana kako teorijski, tako i kroz pilot projekte u Kini i Sjedinjenim Američkim Državama [6, 7].

Problem dizajna sistema za prigušenje oscilacija predstavlja izuzetno složen zadatak čije rješavanje zahtijeva izbor arhitekture sistema, određivanje mjernih i upravljačkih signala, tretiranje komunikacionog kašnjenja u prenosu mjernih i upravljačkih signala, kao i dizajn samog kontrolera za prigušenje oscilacija. Optimalna arhitektura mora osigurati kompromis između performansi i kompleksnosti sistema za prigušenje oscilacija. Mjerni i upravljački signali moraju obezbijediti zadovoljavajuću kontrolabilnost i opservabilnost kritičnih oscilatornih modova. Pristup za tretiranje komunikacionog kašnjenja mora uzeti u obzir njegovu stohastičku prirodu. Na kraju, kontroler za prigušenje oscilacija mora obezbijediti adekvatno prigušenje kritičnih oscilatornih modova na što širem spektru radnih uslova uz minimalnu kompleksnost. U tom kontekstu, cilj ove disertacije je predlog novih metoda za dizajn sistema za prigušenje oscilacija koje sveobuhvatno tretiraju ključne aspekte ovog problema.

Ostatak ove disertacije je strukturiran na sljedeći način:

- Dizajn sistema za prigušenje oscilacija je nemoguć bez softverskog rješenja koje omogućava sprovođenje analiza statičke i tranzijentne stabilnosti elektroenergetskog sistema. Umjesto korišćenja komercijalnih industrijskih softvera, za potrebe ove disertacije razvijen je softverski alat za analizu elektroenergetskih sistema u programskim jezicima MATLAB i Python. U drugom poglavlju predstavljeni su najvažniji aspekti razvoja ovog alata, uključujući modelovanje elektroenergetskih sistema, metode za analizu statičke i tranzijentne stabilnosti, najbolje prakse u implementaciji, kao i verifikaciju razvijenog alata kroz poređenje sa referentnim industrijskim softverom.
- U trećem poglavlju predstavljen je pregled postojećih metoda za dizajn sistema za prigušenje oscilacija sa komparativnom analizom njihovih prednosti i mana. Na bazi izloženog pregleda, identifikovane su praznine u literaturi koje su obrađene u ovoj disertaciji.

- U četvrtom poglavlju predstavljene su novi pristupi dizajnu sistema za prigušenje oscilacija. Zbog brojnih praktičnih prednosti, poseban fokus stavljen je na decentralizovane sisteme. Predloženi kontroleri za prigušenje oscilacija, koji imaju strukturu klasičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema, dizajniraju se primjenom metode reziduuma. Robusnost kontrolera postiže se adekvatnim izborom upravljačke petlje i adaptivnim podešavanjem parametara kontrolera primjenom neuralnih mreža. Na kraju, kontroleri za prigušenje oscilacija prošireni su adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, koji omogućava kompenzaciju varijabilnog komunikacionog kašnjenja u realnom vremenu.
- U petom poglavlju je predstavljena analiza performansi predloženih pristupa kroz dvije studije slučaja na testnim elektroenergetskim sistemima različitih dimenzija. U obje studije predstavljena je procedura izbora upravljačke petlje i dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija, kao i analiza uticaja sistema za prigušenje oscilacija na statičku i tranzijentnu stabilnost elektroenergetskog sistema. Performanse predloženih pristupa upoređene su sa performansama postojećih pristupa na širokom spektru radnih uslova.
- U šestom poglavlju izvedeni su glavni zaključci, ograničenja, kao i pravci za dalje istraživanje u oblasti stabilnosti elektroenergetskih sistema.

Glava 2

Razvoj softverskog alata za analizu elektroenergetskih sistema

Sve ono što joj smeta, duša mijenja i okreće nabolje, tako da baš ono što je njen rad kočilo, postaje za njega korisno i podstiče ga, a ono što mu je zatvaralo put, sada ga otvara.

Marko Aurelije, Meditacije, 5:20

Komercijalni softveri za analizu elektroenergetskih sistema opremljeni su intuitivnim korisničkim interfejsima, metodama za automatsku validaciju ulaznih podataka, kao i robusnim metodama za simulaciju i optimizaciju elektroenergetskih sistema. Iz tog razloga, primjena komercijalnih softvera je neizostavna u industriji, a sve veći broj istraživača, posebno onih u oblasti stabilnosti elektroenergetskih sistema, oslanja se na iste u svojim istraživanjima.

Uprkos svim prednostima, korišćenje komercijalnih softvera nosi određene izazove. Prije svega, cijene godišnjih licenci su neopravdano visoke i najčešće predstavljaju ograničavajući faktor za manje univerzitete kakav je Univerzitet Crne Gore. Kao alternativa, istraživači mogu koristiti studentske verzije ovih softvera sa manjim brojem dostupnih funkcionalnosti, što ozbiljno ograničava mogućnosti istraživanja, posebno kada je riječ o analizama realnih elektroenergetskih sistema velikih dimenzija i razvoju novih metoda.

Pored finansijskih ograničenja, najvažniji problem u primjeni industrijskih softvera leži u činjenici da su oni u suštini crne kutije, sa veoma ograničenim informacijama o modelima i metodama koje koriste. Oslanjanje na softver čiji su modeli i metode nepoznati predstavlja ozbiljan metodološki nedostatak i kosi se sa potrebom za kritičkim preispitivanjem rezultata, koja je u osnovi svih naučnih istraživanja.

Iz ovih razloga, na početku rada na ovoj disertaciji, donesena je odluka o razvoju sopstvenog softverskog alata za analizu elektroenergetskih sistema, sa posebnim fokusom na analize ugaone stabilnosti. Iako je razvoj softverskog alata oduzeo značajno vrijeme i energiju, ovakvim holističkim pristupom je postavljena jaka osnova za dalja istraživanja u oblasti ugaone stabilnosti. Uz to, metode za analizu ugaone stabilnosti razvijene u okviru ove disertacije trenutno se integrišu u komercijalni alat WebPower, čiji je razvoj podržan od strane Fonda za inovacije Crne Gore [8].

U ovom poglavlju predstavljani su dinamički modeli elemenata elektroenergetskih sistema, kao i metode za analizu statičke i tranzijentne stabilnosti. Uz to, predstavljene su i najbolje prakse u razvoju softvera za analizu elektroenergetskih sistema u programskim jezicima MATLAB i Python. Na kraju, predstavljani su rezultati verifikacije razvijenog softvera u odnosu na referentni industrijski softver, kako bi se potvrdila mogućnost njegove primjene u daljem istraživanju.

2.1 Modelovanje elektroenergetskih sistema

U ovom potpoglavlju predstavljani su dinamički modeli sinhronih generatora, pobudnih sistema, turbina i turbinskih regulatora, stabilizatora elektroenergetskog sistema, FACTS uređaja, kao i model elektroenergetske mreže za analize stabilnosti. Svi dinamički modeli preuzeti su iz relevantnih standarda i tehničkih preporuka za modelovanje u analizama stabilnosti.

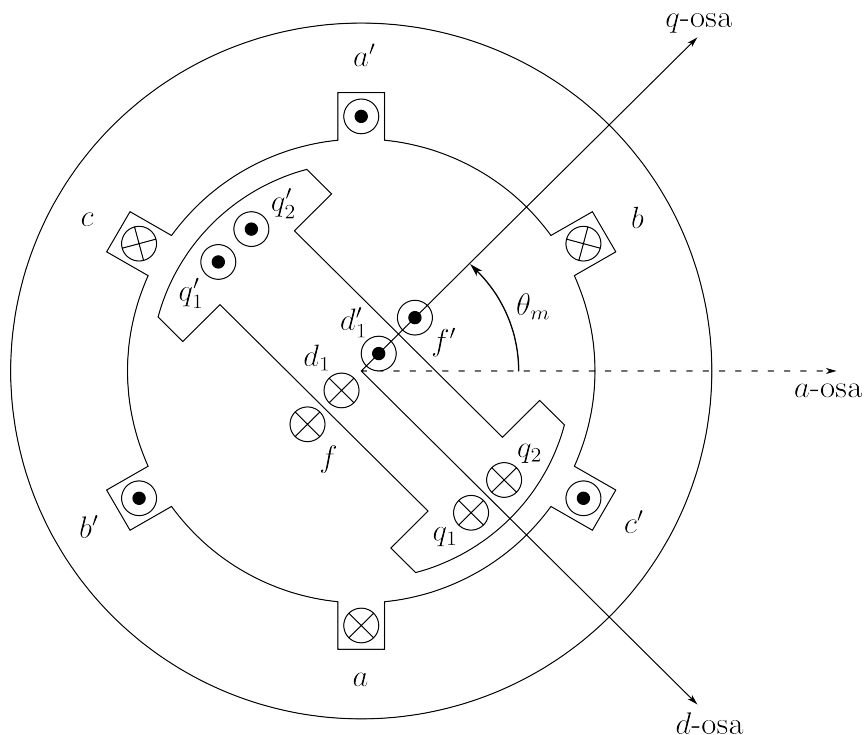
2.1.1 Sinhroni generatori

Uprkos sve većoj zastupljenosti proizvodnih kapaciteta povezanih na mrežu posredstvom uređaja energetske elektronike, sinhroni generatori i dalje predstavljaju glavni izvor električne energije u elektroenergetskim sistemima. Problem očuvanja stabilnosti elektroenergetskih sistema se u najvećoj mjeri svodi na problem očuvanja sinhronizma sinhronih generatora u paralelnom radu. Prema tome, razumijevanje karakteristika i precizno dinamičko modelovanje sinhronih generatora je od presudnog značaja za analize stabilnosti elektroenergetskih sistema.

Dinamičko modelovanje sinhronih generatora predstavlja aktuelan istraživački problem još od dvadesetih godina prošlog vijeka. Nažalost, dostupnost literature ne čini modelovanje manje složenim i zbunjujućim - naprotiv. Razlog za ovo je činjenica da različiti autori razvijaju modele različite složenosti, usvajaju različite konvencije, koriste različitu notaciju i sisteme jediničnih vrijednosti. S tim u vezi, tokom izrade ove disertacije je značajno vrijeme utrošeno na izbor odgovarajućeg dinamičkog modela sinhronih generatora.

Model sinhronog generatora koji je najbliži fizičkim fenomenima unutar samog generatora razvio je jedan od doajena u oblasti stabilnosti elektroenergetskih sistema, indijski inženjer Prabha Shankar Kundur [9]. Mana Kundurovog modela je korišćenje parametara koji nijesu direktno dostupni u tehničkim specifikacijama sinhronih generatora. Uz to, izbor sistema jediničnih vrijednosti usložnjava integraciju modela sinhronog generatora sa modelima sistema regulacije pobude i učestanosti. Nedostatke Kundurovog modela rješava Sauer-Pai model koji je, zbog svoje preciznosti i jednostavnije implementacije, našao primjenu u većini softverskih alata za analizu elektroenergetskih sistema. Izvođenje Sauer-Pai modela je izuzetno obimno, pa su u nastavku izloženi samo osnovni koncepti. Za detaljno izvođenje, zainteresovani čitalac se upućuje na [10].

Šematski prikaz trofaznog sinhronog generatora sa istaknutim polovima predstavljen je na Slici 2.1. Fazni namotaji statora, čije su ose prostorno pomjerene za 120° , označeni su sa $a - a'$, $b - b'$ i $c - c'$. Pobudni namotaj je označen sa $f - f'$. Pored pobudnog namotaja, na rotoru su predstavljena još tri namotaja, označena sa $d_1 - d'_1$, $q_1 - q'_1$ i $q_2 - q'_2$. Dok namotaj $q_1 - q'_1$ predstavlja efekte indukovanih struja u magnetnom jezgri rotora, namotaji $d_1 - d'_1$ i $q_2 - q'_2$ predstavljaju stvarne ili fiktivne prigušne namotaje po d i q -osi, respektivno. Prema usvojenoj konvenciji, q -osa prednjači d -osi za 90° , dok mehanički ugao rotora θ_m predstavlja ugao između q -ose i ose faze a .



Slika 2.1: Šematski prikaz sinhronog generatora sa istaknutim polovima

Po svojoj prirodi, sinhroni generator predstavlja sistem koji se može razložiti na električni i mehanički podsistem, koji su međusobno spregnuti posredstvom magnetnog polja. Jednačine električnog podsistema određuju se primjenom drugog Kirhofovog i Faradejevog zakona na pojedinačne namotaje:

$$v_a = -r_s i_a - \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (2.1)$$

$$v_b = -r_s i_b - \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (2.2)$$

$$v_c = -r_s i_c - \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (2.3)$$

$$v_f = r_f i_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \quad (2.4)$$

$$0 = r_{d1} i_{d1} + \frac{d\lambda_{d1}}{dt} \quad (2.5)$$

$$0 = r_{q1} i_{q1} + \frac{d\lambda_{q1}}{dt} \quad (2.6)$$

$$0 = r_{q2} i_{q2} + \frac{d\lambda_{q2}}{dt} \quad (2.7)$$

gdje v predstavlja napon, i struju, λ magnetni fluks i r otpornost konkretnog namotaja. Sa druge strane, jednačine mehaničkog podsistema određuju se primjenom drugog Njutnovog zakona za rotaciono kretanje:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \frac{2\omega}{p} \quad (2.8)$$

$$J \frac{2d\omega}{p dt} = T_m - T_e - T_{fw} \quad (2.9)$$

gdje ω predstavlja električnu brzinu obrtanja rotora, T_m mehanički moment na osovini rotora, T_e elektromagnetni moment na osovini rotora, T_{fw} prigušni moment trenja, p broj polova sinhronog generatora, a J moment inercije svih obrtnih masa na osovini rotora.

Najveći izazov u primjeni prethodnog modela je činjenica da većina induktivnosti koje figurišu u jednačinama magnetnih flukseva zavisi od ugla položaja rotora θ_m koji je vremenski promjenljiv. Rješenje za ovaj problem je Parkova transformacija, koja predstavlja *de facto* u analizi ugaone stabilnosti elektroenergetskih sistema.

Parkova¹ transformacija je, nakon Forteskjuovog metoda simetričnih komponenti, proglašena najvažnijim doprinosom analizi elektroenergetskih sistema u dvadesetom vijeku. Parkova transformacija je matematička transformacija faznih veličina statora u $dq0$ rotirajući koordinatni sistem [11]. Generalna forma transformacije, koja važi i za struje i za flukseve namotaja statora, je:

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

gdje v_d , v_q i v_0 predstavljaju komponente napona po direktnoj, poprečnoj i nultoj osi, respektivno, a P predstavlja matricu Parkove transformacije koja se definiše kao:

$$P = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{p\theta_m}{2}\right) & \sin\left(\frac{p\theta_m}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\frac{p\theta_m}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\frac{p\theta_m}{2}\right) & \cos\left(\frac{p\theta_m}{2} - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\frac{p\theta_m}{2} + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Primjenom Parkove transformacije, naponske jednačine namotaja statora (2.1)-(2.3) dobijaju oblik:

$$v_d = r_s i_d - \omega \lambda_q + \frac{d\lambda_d}{dt} \quad (2.12)$$

$$v_q = r_s i_q + \omega \lambda_d + \frac{d\lambda_q}{dt} \quad (2.13)$$

$$v_o = r_s i_o + \frac{d\lambda_o}{dt} \quad (2.14)$$

dok naponske jednačine namotaja rotora ostaju nepromijenjene. Uz pretpostavku konzervativnog magnetnog polja, elektromagnetni moment na osovini rotora je moguće izraziti koristeći struje i flukseve fiktivnih namotaja statora po d i q -osi kao:

$$T_e = -\frac{3p}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (2.15)$$

nakon čega jednačina kretanja rotora (2.9) dobija oblik:

$$J \frac{2d\omega}{p dt} = T_m + \frac{3p}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) - T_{fw} \quad (2.16)$$

¹U ruskoj literaturi, Parkova transformacija naziva se Park-Gorevljevom transformacijom.

Na kraju, poželjno je iz dinamičkog modela eliminisati ugao θ_m i zamijeniti ga uglom koji je konstantan pri konstantnoj brzini obrtanja rotora. Ovaj ugao se može definisati kao:

$$\delta = \frac{p\theta_m}{2} - \omega_s t \quad (2.17)$$

gdje ω_s predstavlja sinhronu brzinu. Zamjenom ovog izraza u jednačinu (2.8) slijedi:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.18)$$

Naponske jednačine namotaja statora (2.12)-(2.14), zajedno sa naponskim jednačinama namotaja rotora (2.4)-(2.7) i jednačinama kretanja rotora (2.16) i (2.18) čine osnovni neskaliрани model sinhronog generatora u $dq0$ domenu.

Nakon zamjene izraza za flukseve pojedinačnih namotaja u osnovni model i prelaska na X_{ad} sistem jediničnih vrijednosti [12], brojnim matematičkim manipulacijama dolazi se do konačnog oblika diferencijalnih jednačina sinhronog generatora:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.19)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = T_m - (\psi_d I_q - \psi_q I_d) - D(\omega - \omega_s) \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = & E_{fd} - E'_q - \frac{S_G(|\psi''|)}{|\psi''|} \psi''_d - (X_d - X'_d) I_d \\ & - \frac{(X_d - X'_d)(X'_d - X''_d)}{(X'_d - X_l)^2} [E'_q - \psi_{d1} - (X'_d - X_l) I_d] \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\begin{aligned} T'_{q0} \frac{dE'_d}{dt} = & -E'_d + \frac{X_q - X_l}{X_d - X_l} \frac{S_G(|\psi''|)}{|\psi''|} \psi''_q + (X_q - X'_q) I_q \\ & - \frac{(X_q - X'_q)(X'_q - X''_q)}{(X'_q - X_l)^2} [E'_d - \psi_{q2} + (X'_q - X_l) I_q] \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$T''_{d0} \frac{d\psi_{d1}}{dt} = E'_q - \psi_{d1} - (X'_d - X_l) I_d \quad (2.23)$$

$$T''_{q0} \frac{d\psi_{q2}}{dt} = E'_d - \psi_{q2} + (X'_q - X_l) I_q \quad (2.24)$$

gdje je značenje pojedinačnih promjenljivih u prethodnim jednačinama:

δ – električni ugao rotora,

ω – električna brzina obrtanja rotora,

E'_q – skalirani magnetni fluks koji se obuhvata sa pobudnim namotajem,
 E'_d – skalirani magnetni fluks koji se obuhvata sa prigušnim namotajem po q -osi,
 ψ_{d_1} – magnetni fluks koji se obuhvata sa prigušnim namotajem po d -osi,
 ψ_{q_2} – magnetni fluks koji se obuhvata sa prigušnim namotajem po q -osi,
 ψ''_d – subtranzijentni magnetni fluks po d -osi,
 ψ''_q – subtranzijentni magnetni fluks po q -osi,
 ψ_d – ukupni magnetni fluks po d -osi,
 ψ_q – ukupni magnetni fluks po q -osi,
 I_d – komponenta struje statora po d -osi,
 I_q – komponenta struje statora po q -osi,
 E_{fd} – napon pobudnog namotaja, a
 T_m – mehanička snaga na osovini rotora.

Subtranzijentni fluksevi po d i q -osi dati su izrazima:

$$\psi''_d = \frac{X''_d - X_l}{X'_d - X_l} E'_q + \frac{X'_d - X''_d}{X'_d - X_l} \psi_{d_1} \quad (2.25)$$

$$\psi''_q = -\frac{X''_q - X_l}{X'_q - X_l} E'_d - \frac{X'_q - X''_q}{X'_q - X_l} \psi_{q_2} \quad (2.26)$$

i povezani su sa ukupnim fluksevima po d i q -osi:

$$\psi_d = \psi''_d - X''_d I_d \quad (2.27)$$

$$\psi_q = \psi''_q - X''_q I_q \quad (2.28)$$

Moduo subtranzijentnog fluksa $|\psi''|$, koji se određuje kao:

$$|\psi''| = \sqrt{(\psi''_d)^2 + (\psi''_q)^2} \quad (2.29)$$

koristi se za kvantifikovanje zasićenja magnetnog jezgra sinhronog generatora. U diferencijalnim jednačinama sinhronog generatora, zasićenje je predstavljeno funkcijom zasićenja $S_G(|\psi''|)$, koja je najčešće ili kvadratna, ili eksponencijalna funkcija, a određuje se na osnovu eksperimenta praznog hoda sinhronog generatora.

Pored diferencijalnih jednačina, promjenljive stanja povezane su sa uslovima na sabirnicama generatora algebarskim jednačinama:

$$V \sin(\delta - \theta) - \frac{X_q'' - X_l}{X_q' - X_l} E_d' - \frac{X_q' - X_q''}{X_q' - X_l} \psi_{q2} - X_q'' I_q + R_s I_d = 0 \quad (2.30)$$

$$V \cos(\delta - \theta) - \frac{X_d'' - X_l}{X_d' - X_l} E_q' - \frac{X_d' - X_d''}{X_d' - X_l} \psi_{d1} + X_d'' I_d + R_s I_q = 0 \quad (2.31)$$

iz kojih je moguće izraziti I_d i I_q kao algebarske promjenljive sinhronog generatora.

Osim električnog ugla i brzine obrtanja rotora, sve promjenljive u prethodnom modelu figurišu u jediničnim vrijednostima. Sa druge strane, značenje pojedinačnih parametara sinhronog generatora i njihove jedinice date su u Tabeli 2.1.

Dinamički modeli sinhronih generatora zanemaruju se prilikom sprovođenja proračuna tokova snaga. Zbog toga je, nakon sprovođenja proračuna tokova snaga, potrebno odrediti vrijednosti svih promjenljivih stanja i algebarskih promjenljivih koje figurišu u dinamičkom modelu sinhronog generatora. Inicijalizacija dinamičkog modela sinhronog generatora sa zanemarenim zasićenjem izložena je u [10]. Inicijalizacija dinamičkog modela sinhronog generatora sa zasićenjem je značajno složenija i opis procedure inicijalizacije nije pronađen u dostupnoj literaturi. Iz tog razloga su osnovni koraci inicijalizacije opisani u nastavku.

Tabela 2.1: Parametri sinhronog generatora

Parametar	Opis	Jedinica
D	faktor prigušenja	r.j.
H	konstanta inercije	MWs/MVA
R_s	otpornost namotaja statora	r.j.
X_l	rasipna reaktansa namotaja statora	r.j.
X_d	sinhrona reaktansa po d -osi	r.j.
X_d'	tranzijentna reaktansa po d -osi	r.j.
X_d''	subtranzijentna reaktansa po d -osi	r.j.
X_q	sinhrona reaktansa po q -osi	r.j.
X_q'	tranzijentna reaktansa po q -osi	r.j.
X_q''	subtranzijentna reaktansa po q -osi	r.j.
T_{d0}'	tranzijentna konstanta praznog hoda po d -osi	s
T_{d0}''	subtranzijentna konstanta praznog hoda po d -osi	s
T_{q0}'	tranzijentna konstanta praznog hoda po q -osi	s
T_{q0}''	subtranzijentna konstanta praznog hoda po q -osi	s

Početne vrijednosti promjenljivih stanja i algebarskih promjenljivih sinhronog generatora određuju se kroz nekoliko koraka:

1. Koristeći rezultate proračuna tokova snaga, određuje se struja generatora \underline{I} primjenom relacije:

$$\underline{I} = \frac{P - jQ}{\underline{V}^*} = I e^{j\varphi} \quad (2.32)$$

gdje su P i Q aktivna i reaktivna snaga, a $\underline{V} = V e^{j\theta}$ fazor napona na sabirnicama generatora.

2. Koristeći podatke o naponu i struji generatora, određuje se vrijednost modula subtranzijentnog fluksa:

$$|\psi''| = |-\psi_q'' + j\psi_d''| = |\underline{V} + (R_s + jX_d'') \underline{I}| \quad (2.33)$$

3. Uz poznat moduo subtranzijentnog fluksa, određuje se vrijednost faktora zasićenja K_S primjenom relacije:

$$K_S = 1 + \frac{X_q - X_l S_G(|\psi''|)}{X_d - X_l |\psi''|} \quad (2.34)$$

4. Uz poznate vrijednosti napona i struje na sabirnicama generatora, kao i poznatu vrijednost faktora zasićenja, električni ugao snage δ određuje se kao:

$$\delta = \arctg \left(\frac{K_s V \sin \theta + (K_s X_q'' + X_q - X_q'') I \cos \varphi + K_s R_s I \cos \varphi}{K_s V \cos \theta - (K_s X_q'' + X_q - X_q'') I \sin \varphi + K_s R_s I \sin \varphi} \right) \quad (2.35)$$

5. Uz poznat ugao δ , komponente napona i struje generatora po d i q -osi određuju se primjenom jednačina:

$$V_d = V \sin(\delta - \theta) \quad (2.36)$$

$$V_q = V \cos(\delta - \theta) \quad (2.37)$$

$$I_d = I \sin(\delta - \varphi) \quad (2.38)$$

$$I_q = I \cos(\delta - \varphi) \quad (2.39)$$

6. Subtranzijentni fluksevi se tada određuju primjenom jednačina:

$$\psi_d'' = V_q + X_d'' I_d + R_s I_q \quad (2.40)$$

$$\psi_q'' = -V_d + X_q'' I_q - R_s I_d \quad (2.41)$$

7. Uz poznate subtranzijentne flukseve, magnetni fluksevi prigušnih namotaja određuju se primjenom jednačina:

$$\psi_{d_1} = \psi_d'' + (X_d' - X_d'')I_d \quad (2.42)$$

$$\psi_{q_2} = \frac{X_q - X_l}{X_d - X_l} \frac{S_G(|\psi''|)}{|\psi''|} \psi_q'' + (X_q - X_l)I_q \quad (2.43)$$

8. Skalirani magnetni fluksevi E_d' i E_q' određuju se primjenom jednačina:

$$E_d' = \psi_{q_2} - (X_q' - X_l)I_q \quad (2.44)$$

$$E_q' = \psi_{d_1} + (X_d' - X_l)I_d \quad (2.45)$$

9. Napon pobudnog namotaja je tada:

$$E_{fd} = E_q' + (X_d - X_d')I_d + \frac{S_G(|\psi''|)}{|\psi''|} \psi_d'' \quad (2.46)$$

10. Na kraju, mehanički moment na osovini rotora određuje se iz uslova da je u stacionarnom stanju jednak elektromagnetnom momentu:

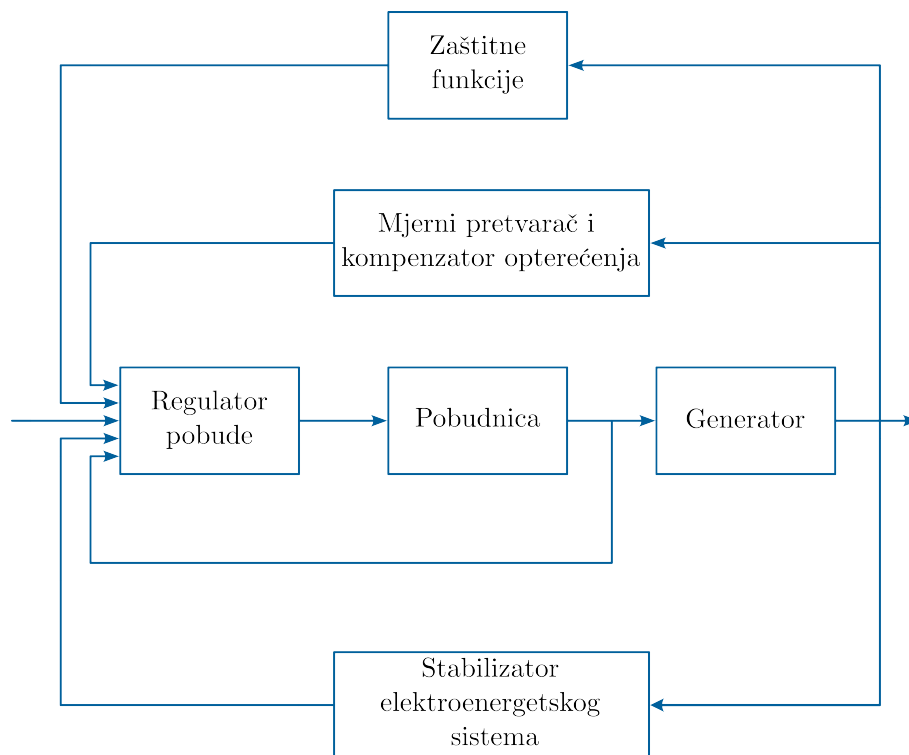
$$T_m = \psi_d I_q - \psi_q I_d \quad (2.47)$$

gdje su fluksevi ψ_d i ψ_q dati jednačinama (2.27) i (2.28).

Prethodnu proceduru je neophodno sprovesti prije svih analiza statičke ili tranzijentne stabilnosti.

2.1.2 Pobudni sistemi

Prema definiciji Instituta inženjera elektrotehnike i elektronike (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE), pobudni sistem predstavlja izvor pobudne struje potrebne za održavanje napona na sabirnicama generatora na željenoj vrijednosti pri različitim radnim režimima generatora [13]. Pored svoje osnovne funkcije, pobudni sistemi pružaju mogućnost modulišućeg djelovanja na prigušenje oscilacija i mogućnost forsiranja pobude, čime doprinose očuvanju ugaone stabilnosti pri malim i velikim poremećajima, respektivno. Iz tog razloga, analize statičke i tranzijentne stabilnosti zahtijevaju detaljno modelovanje pobudnih sistema sinhronih generatora.



Slika 2.2: Funkcionalni blok dijagram sistema regulacije pobude

Funkcionalni blok dijagram sistema regulacije pobude² sinhronog generatora predstavljen je na Slici 2.2. Uloge pojedinačnih komponenti pobudnog sistema su:

- *Pobudnica* predstavlja izvor struje pobudnog namotaja sinhronog generatora.
- *Regulator pobude* obrađuje i pojačava ulazne signale, čime generiše upravljački signal za pobudnicu.
- *Mjerni pretvarač* mjeri, ispravlja i filtrira napon na sabirnicama generatora, kako bi se omogućilo njegovo poređenje sa referentnom vrijednošću i formiranje signala greške za regulator pobude. Dodatno, primjenom *kompenzatora opterećenja* omogućeno je održavanje referentne vrijednosti napona na lokaciji koja je električno udaljena od sabirnica generatora.
- *Stabilizator elektroenergetskog sistema* obezbjeđuje dodatni modulišući signal na ulazu regulatora pobude s ciljem prigušenja lokalnih oscilacija.
- *Zaštitne funkcije* obezbjeđuju sigurno funkcionisanje pobudnice i sinhronog generatora u skladu sa njihovim pogonskim dijagramima.

²Sistem regulacije pobude uključuje pobudni sistem i sinhroni generator kao objekat regulacije.

Prema vrsti pobudnice, pobudni sistemi se mogu podijeliti na jednosmjerne (DC), naizmjenične (AC) i statičke (ST). Kod DC pobudnih sistema, izvor pobudne struje je generator jednosmjerne struje koji je sa pobudnim namotajem povezan pomoću kliznih prstenova. Generator jednosmjerne struje, bilo sa otočnom, bilo sa nezavisnom pobudom, pokreće se preko zajedničke osovine sa sinhronim generatorom ili pomoću nezavisnog motora koji se napaja iz mreže sopstvene potrošnje elektrane. DC pobudni sistemi predstavljaju najraniju vrstu pobudnih sistema koja je, zbog kompleksne regulacije napona, relativno sporog odziva i visokih troškova održavanja zamijenjena naizmjeničnim ili statičkim pobudnim sistemima. Ipak, veliki broj DC pobudnih sistema je i dalje u upotrebi, zbog čega su njihovi modeli zastupljeni u svim softverima za analizu stabilnosti elektroenergetskih sistema.

U AC pobudnim sistemima, izvor pobudne struje je pobudni sinhroni generator koji se najčešće nalazi na zajedničkoj osovini sa glavnim generatorom i turbinom. Naizmjenična struja na izlazu pobudnog generatora ispravlja se posredstvom kontrolisanih ili nekontrolisanih ispravljača. Kod AC pobudnih sistema sa nekontrolisanim ispravljačima, regulacija pobude glavnog generatora se realizuje posredno, regulacijom pobude pobudnog generatora, pa je odziv ovakvih sistema veoma spor. AC pobudni sistemi sa kontrolisanim ispravljačima rješavaju ovaj problem, jer se regulacija pobude ostvaruje direktnim djelovanjem na tiristore. Kod oba tipa AC pobudnih sistema, ispravljači mogu biti stacionarni ili obrtni. Dok se kod stacionarnih ispravljača pobudni namotaj napaja jednosmjernom strujom posredstvom kliznih prstenova na rotoru, kod obrtnih ispravljača je pobudni namotaj direktno povezan na izlaz mosnog ispravljača. Pobudni sistemi sa obrtnim ispravljačima ili beskontaktni (eng. *brushless*) pobudni sistemi razvijeni su kako bi se izbjegli potencijalni problemi sa primjenom četkica i kliznih prstenova. Ipak, AC pobudni sistemi sa i bez četkica su pokazali jednako dobre performanse u praksi [9].

Statički pobudni sistemi predstavljaju najsavremeniji tip pobudnih sistema. Kod statičkih pobudnih sistema se energija potrebna za napajanje pobudnog namotaja dobija direktno sa sabirnica sinhronog generatora ili sa sabirnica sopstvene potrošnje elektrane. Iz tog razloga, statički pobudni sistemi se često nazivaju statičkim pobudnim sistemima samopobude. Pobudni namotaj sinhronog generatora se napaja jednosmjernom strujom posredstvom kliznih prstenova na rotoru, pa kod statičkih pobudnih sistema nema pokretnih elemenata. Najčešća realizacija statičkih pobudnih sistema je statički pobudni sistem bez kompaundacije kod kojeg se kontrolisani ispravljač napaja sa sabirnica generatora ili sabirnica sopstvene potrošnje putem pobudnog transformatora. Mana statičkih pobudnih sistema bez kompaundacije je što maksimalni pobudni napon zavisi od napona na napojnim sabirnicama. Iz tog

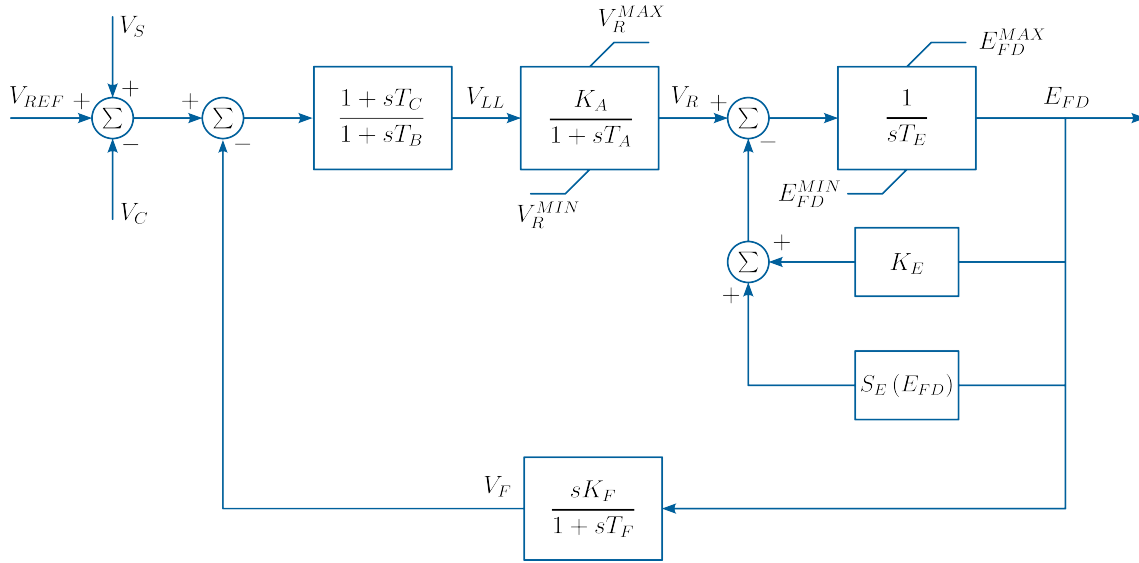
razloga, statički pobudni sistemi bez kompaundacije gube mogućnost forsiranja pobude u slučaju kratkih spojeva u blizini generatora. Ovaj problem rješavaju statički pobudni sistemi sa kompaundacijom kod kojih se napajanje ispravljača realizuje korišćenjem kako napona, tako i struje glavnog generatora. I pored prednosti statičkih pobudnih sistema sa kompaundacijom, iskustva iz prakse ukazuju da njihov pandan bez kompaundacije rezultira adekvatnim performansama kod sinhronih generatora povezanih na prenosnu mrežu, zbog gotovo trenutnog odziva i mogućnosti forsiranja pobude nakon otklanjanja kvara [14]. Iz tog razloga, primjena statičkih pobudnih sistema sa kompaundacijom je dominantna u manjim industrijskim mrežama sa dužim trajanjem kvarova.

U zavisnosti od njihove realizacije, u literaturi je dostupan ogroman broj različitih modela jednosmjernih, naizmjeničnih i statičkih pobudnih sistema. Nabrajanje svih dostupnih modela je nemoguće zbog prostornih ograničenja, a uzimajući u obzir činjenicu da se široko prihvaćeni modeli često pokazuju neadekvatnim u praksi [15], svrsishodnost ovakvog poduhvata je upitna. Iz tog razloga, u nastavku su predstavljeni najčešće zastupljeni modeli jednosmjernih, naizmjeničnih i statičkih pobudnih sistema. Predstavljeni modeli su preuzeti iz IEEE preporučene prakse za modelovanje pobudnih sistema u analizama ugaone stabilnosti elektroenergetskih sistema [16]. Modeli su validni za odstupanja učestanosti do $\pm 5\%$ nominalne učestanosti i nisko-frekventne oscilacije učestanosti do 3 Hz.

DC1A model jednosmjernih pobudnih sistema

Model DC1A, čiji je blok dijagram predstavljen na Slici 2.3, jedan je od najčešće korišćenih modela jednosmjernih pobudnih sistema u analizama stabilnosti. Karakteristike DC1A modela najbolje odgovaraju jednosmjernim pobudnim sistemima sa obrtnim ili magnetnim pojačavačem i elektromehaničkim regulatorom sa reostatom. Ipak, u praksi je DC1A model često korišćen i za predstavljanje složenijih jednosmjernih pobudnih sistema i pobudnih sistema čiji su podaci nepoznati. Pored DC1A modela, veliku primjenu je našao i DC4B model kod kojeg je *lead-lag* kompenzator zamijenjen PID regulatorom.

Glavni ulazni signal modela je izlaz mjernog pretvarača i kompenzatora opterećenja V_C . Mjereni napon se oduzima od njegove referentne vrijednosti V_{REF} . Dodavanjem izlaznog signala stabilizatora elektroenergetskog sistema V_S i oduzimanjem stabilizacione povratne sprege V_F , formira se signal greške koji obrađuje regulator napona. Izlazni signal regulatora V_R koristi se za upravljanje pobudnicom čiji je izlaz pobudni napon E_{FD} . Zbog izabranog sistema jediničnih vrijednosti, pobudni napon E_{FD} je isti pobudni napon koji figuriše u dinamičkom modelu sinhronog generatora.



Slika 2.3: Blok dijagram DC1A modela jednosmjernih pobudnih sistema

U skladu sa predstavljanim blok dijagramom i usvojenom notacijom, DC1A model se može opisati jednačinama:

$$T_B \frac{dV'_{LL}}{dt} = V_{REF} + V_S - V_C - V_F - V'_{LL} \quad (2.48)$$

$$T_A \frac{dV_R}{dt} = K_A V_{LL} - V_R \quad (2.49)$$

$$T_E \frac{dE_{FD}}{dt} = V_R - (K_E + S_E(E_{FD})) E_{FD} \quad (2.50)$$

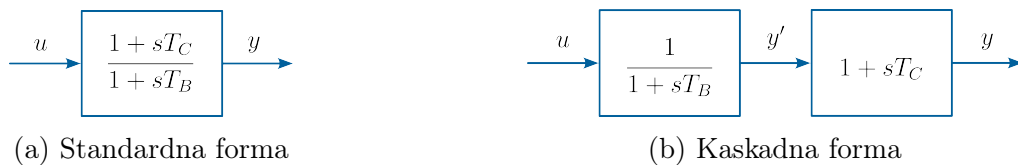
$$T_F \frac{dV_F}{dt} = \frac{K_F}{T_E} [V_R - (K_E + S_E(E_{FD})) E_{FD}] - V_F \quad (2.51)$$

gdje je V'_{LL} interna promjenljiva stanja *lead-lag* kompenzatora, na osnovu koje se izlazni signal kompenzatora V_{LL} određuje kao:

$$V_{LL} = \frac{T_C}{T_B} (V_{REF} + V_S - V_C - V_F) + \frac{T_B - T_C}{T_B} V'_{LL} \quad (2.52)$$

Postojanje interne promjenljive stanja je posljedica usvojenog načina transformacije funkcije prenosa *lead-lag* kompenzatora u prostor stanja. Naime, polazeći od standardne forme prikazane na Slici 2.4a, *lead-lag* kompenzator se u Laplasovom domenu može opisati jednačinom:

$$(1 + sT_B) Y(s) = (1 + sT_C) U(s) \quad (2.53)$$



Slika 2.4: Standardna i kaskadna forma *lead-lag* kompenzatora

čiji je oblik vremenskom domenu:

$$y(t) + T_B \frac{dy(t)}{dt} = u(t) + T_C \frac{du(t)}{dt} \quad (2.54)$$

Kao što se uočava, primjena standardne forme *lead-lag* kompenzatora zahtijeva određivanje prvog izvoda ulaznog signala, što značajno usložnjava implementaciju modela na računaru. Iako je ovakav pristup izvodljiv kada je ulaz *lead-lag* kompenzatora promjenljiva stanja modela, komplikacije nastaju kada je ulaz algebarska promjenljiva za čiji izvod ne postoji analitički izraz. Tipičan primjer su moduli i fazni stavovi napona koji u modelu elektroenergetskog sistema predstavljaju algebarske promjenljive. Ovaj problem se može riješiti korišćenjem kaskadne forme prikazane na Slici 2.4b, koja se u Laplasovom domenu može opisati jednačinama:

$$Y'(s) + sT_B Y'(s) = U(s) \quad (2.55)$$

$$Y(s) = Y'(s) + sT_C Y'(s) \quad (2.56)$$

čiji je oblik u vremenskom domenu:

$$T_B \frac{dy'(t)}{dt} = u(t) - y'(t) \quad (2.57)$$

$$y(t) = \frac{T_C}{T_B} u(t) + \frac{T_B - T_C}{T_B} y'(t) \quad (2.58)$$

Očigledno, primjenom kaskadne forme se izbjegava određivanje izvoda ulaznog signala $u(t)$, čime se u značajnoj mjeri olakšava implementacija *lead-lag* kompenzatora na računaru.

Parametri DC1A modela sa njihovim jedinicama predstavljeni su u Tabeli 2.2. Pored navedenih parametara, u modelu figuriše i funkcija $S_E(E_{FD})$ koja predstavlja funkciju zasićenja magnetnog jezgra pobudnice. Iako su u literaturi dostupni različiti oblici, funkcija zasićenja je najčešće data u eksponencijalnom obliku:

$$S_E(E_{FD}) = Ae^{BE_{FD}} \quad (2.59)$$

Tabela 2.2: Parametri DC1A modela jednosmjernih pobudnih sistema

Parametar	Opis	Jedinica
T_C	diferencijalna vremenska konstanta regulatora	s
T_B	integralna vremenska konstanta regulatora	s
K_A	pojačanje regulatora	r.j.
T_A	vremenska konstanta regulatora	s
V_R^{MAX}	maksimalna vrijednost upravljačkog signala regulatora	r.j.
V_R^{MIN}	minimalna vrijednost upravljačkog signala regulatora	r.j.
K_E	koeficijent pobudnog namotaja pobudnice	-
T_E	vremenska konstanta pobudnice	s
K_F	pojačanje stabilizacione povratne sprege	r.j.
T_F	vremenska konstanta stabilizacione povratne sprege	s
E_{FD}^{MAX}	maksimalna vrijednost pobudnog napona	r.j.
E_{FD}^{MIN}	minimalna vrijednost pobudnog napona	r.j.

gdje se parametri A i B određuju na osnovu vrijednosti funkcije zasićenja u dvijema diskretnim tačkama (E_{FD1}, S_{E1}) i (E_{FD2}, S_{E2}) .

Za DC1A pobudni sistem u stacionarnom stanju, gdje važi $V_S = V_F = 0$, inicijalizacija modela se sprovodi na osnovu napona na sabirnicama generatora V_C i pobudnog napona E_{FD} koji su prethodno određeni sprovođenjem proračuna tokova snaga i inicijalizacijom dinamičkog modela sinhronog generatora, respektivno. Početne vrijednosti preostalih promjenljivih stanja i ulaznih veličina određuju se primjenom jednačina:

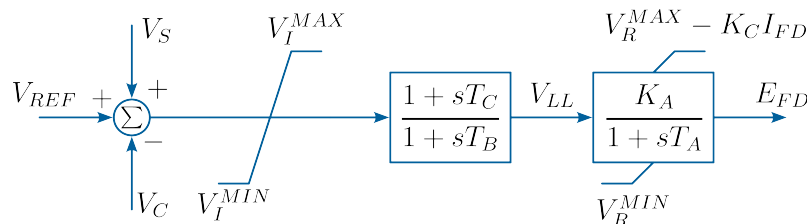
$$V_R = (K_E + S_E(E_{FD})) E_{FD} \quad (2.60)$$

$$V'_{LL} = \frac{V_R}{K_A} \quad (2.61)$$

$$V_{REF} = V_C + V'_{LL} \quad (2.62)$$

AC4A model naizmjeničnih pobudnih sistema

AC4A model, čiji je blok dijagram predstavljen na Slici 2.5, koristi se za predstavljanje naizmjeničnih pobudnih sistema sa kontrolisanim ispravljačima. Kao i u prethodnom slučaju, mjereni napon V_C oduzima se od referentnog napona V_{REF} čime se, nakon dodavanja izlaznog signala stabilizatora elektroenergetskog sistema, formira signal greške. Za razliku od jednosmjernih pobudnih sistema, za stabilizaciju pobudnog sistema koristi se *lead-lag* kompenzator. Na osnovu izlaza *lead-lag* kompenzatora, regulator generiše okidne signale za tiristorski ispravljački most, čiji je



Slika 2.5: Blok dijagram AC4A modela naizmjeničnih pobudnih sistema

izlazni napon jednak pobudnom naponu E_{FD} . Rad ispravljačkog mosta se ograničava na zonu 1 u kojoj ugao komutacije ne prelazi 60° [17]. Dodatno, uticaj komutacije na smanjenje srednje vrijednosti napona na izlazu ispravljačkog mosta je uzet u obzir kroz granične vrijednosti pobudnog napona pomoću faktora opterećenja K_C i pobudne struje I_{FD} .

U skladu sa izloženom notacijom, AC4A model naizmjeničnih pobudnih sistema se može opisati jednačinama:

$$T_B \frac{dV'_{LL}}{dt} = V_{REF} + V_S - V_C - V'_{LL} \quad (2.63)$$

$$T_A \frac{dE_{FD}}{dt} = K_A V_{LL} - E_{FD} \quad (2.64)$$

gdje je izlaz *lead-lag* kompenzatora V_{LL} dat izrazom:

$$V_{LL} = \frac{T_C}{T_B} (V_{REF} + V_S - V_C) + \frac{T_B - T_C}{T_B} V'_{LL} \quad (2.65)$$

Parametri modela koji figurišu u prethodnim jednačinama dati su u Tabeli 2.3.

Tabela 2.3: Parametri AC4A modela naizmjeničnih pobudnih sistema

Parametar	Opis	Jedinica
V_I^{MAX}	maksimalna vrijednost signala greške	r.j.
V_I^{MIN}	minimalna vrijednost signala greške	r.j.
T_C	diferencijalna vremenska konstanta stabilizatora	s
T_B	integralna vremenska konstanta stabilizatora	s
K_A	pojačanje regulatora	r.j.
T_A	vremenska konstanta regulatora	s
V_R^{MAX}	maksimalna vrijednost upravljačkog signala regulatora	r.j.
V_R^{MIN}	minimalna vrijednost upravljačkog signala regulatora	r.j.
K_C	faktor opterećenja ispravljača	-

Za AC4A model u stacionarnom stanju, uz prethodno određen mjereni napon V_C i pobudni napon E_{FD} , početne vrijednosti preostalih promjenljivih stanja i ulaznih veličina određuju se primjenom jednačina:

$$V'_{LL} = \frac{E_{FD}}{K_A} \quad (2.66)$$

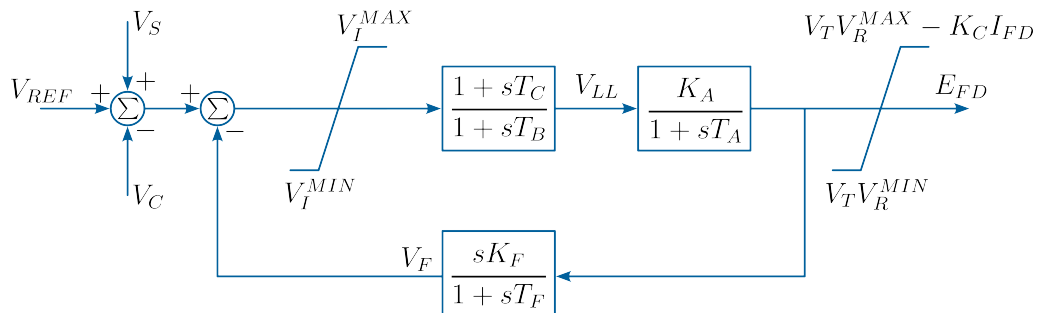
$$V_{REF} = V_C + V'_{LL} \quad (2.67)$$

ST1A model statičkih pobudnih sistema

ST1A model, čiji je blok dijagram predstavljen na Slici 2.6, najčešće se koristi za predstavljanje statičkih pobudnih sistema bez kompaundacije. Kao i kod prethodno razmatranih pobudnih sistema, regulator obrađuje stabilisani signal greške i na izlazu daje pobudni napon E_{FD} . Minimalna i maksimalna vrijednost pobudnog napona zavise od napona V_T , koji predstavlja napon na sabirnicama generatora ili sabirnicama sopstvene potrošnje sa kojih se pobudni sistem napaja.

Ograničavači signala greške se u praksi najčešće zanemaruju. Slično važi i za stabilizacionu povratnu spregu koja nije potrebna kod pobudnih sistema sa visokom vrijednošću tranzijentnog pojačanja. Iako pobudni sistemi sa visokom vrijednošću tranzijentnog pojačanja doprinose unapređenju tranzijentne stabilnosti, često amplifikuju nisko-frekventne oscilacije, pa njihova primjena obično zahtijeva ugradnju stabilizatora elektroenergetskog sistema. Primjena stabilizatora elektroenergetskog sistema se može izbjeći tako što se konstante stabilizacione povratne sprege ili *lead-lag* kompenzatora podese tako da rezultiraju smanjenjem pojačanja pobudnog sistema tokom prelaznih procesa (eng. *transient gain reduction*).

Uz dodatak stabilizacione povratne sprege, jednačine ST1A modela su identične jednačinama AC4A modela, te neće biti detaljno razmatrane. Isto važi i za parametre modela koji su sadržani u Tabelama 2.2 i 2.3.



Slika 2.6: Blok dijagram ST1A pobudnog sistema

2.1.3 Stabilizatori elektroenergetskog sistema

Kao što je ranije objašnjeno, stabilizatori elektroenergetskog sistema obezbjeđuju modulišući signal na ulazu regulatora pobude s ciljem prigušenja oscilacija. Modulišući signal rezultira komponentom elektromagnetnog momenta koja je u fazi sa odstupanjem brzine obrtanja rotora. Drugim riječima, ako rotor ubrzava, modulišući signal stabilizatora dovodi do povećanja elektromagnetnog momenta na osovini rotora, što rezultira usporavanjem rotora.

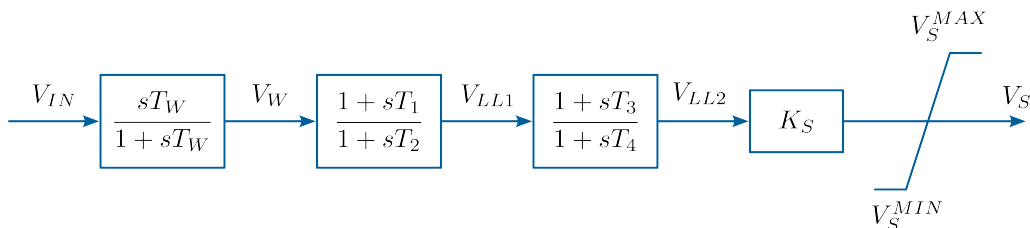
Kako bi stabilizatori elektroenergetskog sistema obezbijedili komponentu elektromagnetnog momenta koja je u fazi sa odstupanjem brzine, njihova karakteristika mora biti podešena tako da kompenzuje fazno kašnjenje funkcije prenosa [18]:

$$GEP(s) = \frac{T_e(s)}{V_{REF}(s)} \quad (2.68)$$

gdje $T_e(s)$ predstavlja elektromagnetni moment na osovini rotora, a $V_{REF}(s)$ predstavlja referentnu vrijednost napona pobudnog sistema. U frekventnom opsegu od 0,1 do 2 Hz, koji je od interesa za dizajn stabilizatora, fazna karakteristika funkcije $GEP(s)$ je identična faznoj karakteristici funkcije prenosa između napona na sabirnicama generatora $V(s)$ i referentne vrijednosti napona $V_{REF}(s)$ [19]. Kako je funkciju prenosa između napona na sabirnicama generatora i referentne vrijednosti napona jednostavno odrediti mjernim putem, to je metod na bazi funkcije prenosa $GEP(s)$ našao najveću primjenu u dizajnu stabilizatora u praksi.

Mada su u literaturi dostupni modeli stabilizatora različite složenosti, svi su zasnovani na osnovnom modelu čiji je blok dijagram predstavljen na Slici 2.7. Predstavljani blok dijagram u suštini predstavlja IEEEEST model stabilizatora bez uskopiasnog filtra.

Kao ulazni signal stabilizatora V_{IN} obično se koristi odstupanje brzine obrtanja rotora, aktivna snaga ili frekvencija napona na sabirnicama generatora, kao i njihove kombinacije. Ulazni signal se prvo filtrira pomoću visokopropusnog (eng. *washout*) filtra, koji eliminiše vrijednost ulaznog signala u stacionarnom stanju. Nakon toga,



Slika 2.7: Blok dijagram tipičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema

filtrirani signal prolazi kroz dva *lead-lag* bloka, koji obezbjeđuju adekvatnu faznu karakteristiku stabilizatora. Zatim, izlazni signal se pojačava tako da se obezbijedi adekvatno prigušenje oscilacija. Na kraju, izlazni signal stabilizatora V_S se ograničava na opseg od V_S^{MIN} do V_S^{MAX} , kako bi se spriječio prekomjeran uticaj stabilizatora na napon na sabirnicama generatora.

U skladu sa izloženom notacijom, stabilizator elektroenergetskog sistema može se opisati jednačinama:

$$T_W \frac{dV'_W}{dt} = V_{IN} - V'_W \quad (2.69)$$

$$T_2 \frac{dV'_{LL1}}{dt} = V_{IN} - V'_W - V'_{LL1} \quad (2.70)$$

$$T_4 \frac{dV'_{LL2}}{dt} = V'_{LL1} - V'_{LL2} + \frac{T_1}{T_2} (V_{IN} - V'_W - V'_{LL1}) \quad (2.71)$$

$$V_S = K_S V'_{LL2} + \frac{K_S T_3}{T_4} \left[V'_{LL1} - V'_{LL2} + \frac{T_1}{T_2} (V_{IN} - V'_W - V'_{LL1}) \right] \quad (2.72)$$

pri čemu su parametri stabilizatora koji figurišu u prethodnim jednačinama definirani u Tabeli 2.4 zajedno sa njihovim jedinicama.

Za sistem u stacionarnom stanju, početne vrijednosti promjenljivih stanja stabilizatora određuju se na osnovu početne vrijednosti ulaznog signala V_{IN} kao:

$$V'_W = V'_{IN} \quad (2.73)$$

$$V'_{LL1} = V'_{LL2} = V_S = 0 \quad (2.74)$$

Tabela 2.4: Parametri tipičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema

Parametar	Opis	Jedinica
T_W	vremenska konstanta visokopropusnog filtra	s
T_1	diferencijalna vremenska konstanta stabilizatora	s
T_2	integralna vremenska konstanta stabilizatora	s
T_3	diferencijalna vremenska konstanta stabilizatora	s
T_4	integralna vremenska konstanta stabilizatora	s
K_S	pojačanje stabilizatora	r.j.
V_S^{MAX}	maksimalna vrijednost izlaznog signala stabilizatora	r.j.
V_S^{MIN}	minimalna vrijednost izlaznog signala stabilizatora	r.j.

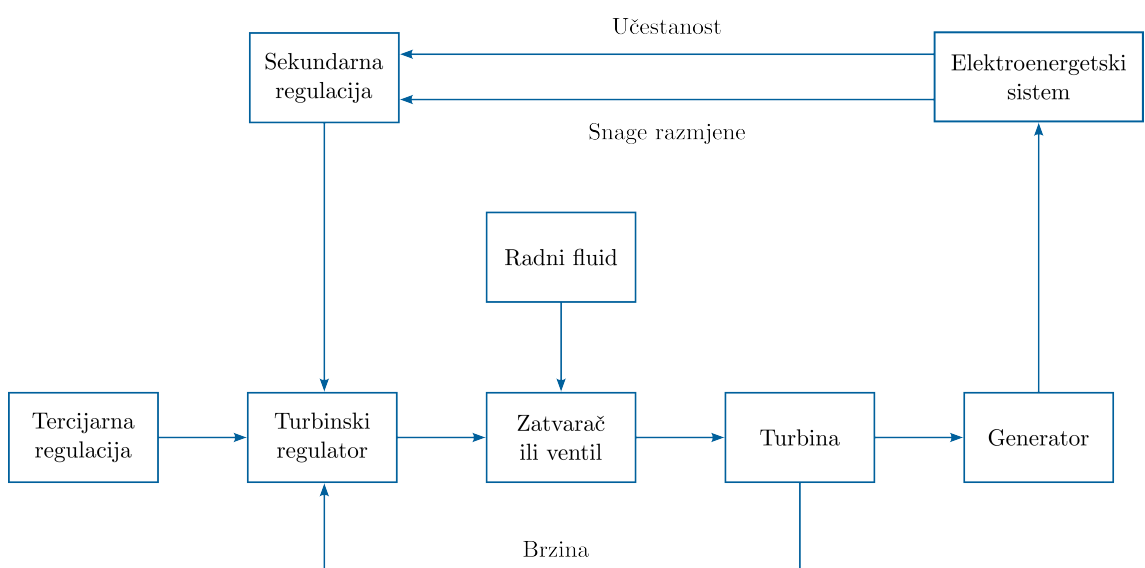
2.1.4 Turbine i turbinski regulatori

Sinhroni generatori su električne mašine koje vrše konverziju mehaničke energije u električnu. Mehaničku energiju potrebnu za ovaj proces obezbjeđuju turbine, pretvaranjem potencijalne ili kinetičke energije radnog fluida. U zavisnosti od vrste radnog fluida, pogonske mašine sinhronih generatora se mogu podijeliti na parne, gasne i hidraulične.

Bez obzira na vrstu radnog fluida, pogonske mašine svih sinhronih generatora opremljene su turbinskim regulatorima. Turbinski regulatori su regulatori koji, na osnovu odstupanja brzine obrtanja rotora ili učestanosti, kontrolišu protok radnog fluida kroz pogonsku mašinu. Kao takvi, turbinski regulatori predstavljaju prvi nivo sistema automatske regulacije proizvodnje (eng. *Automatic Generation Control*, AGC) prikazanog na Slici 2.8, čiji je cilj trajno očuvanje bilansa snaga u elektroenergetskom sistemu.

Kako turbinski regulatori predstavljaju regulatore proporcionalnog tipa, njihovim djelovanjem nakon poremećaja bilansa snaga se učestanost ne može vratiti na prvobitnu vrijednost. Statičku grešku primarne regulacije otklanja sekundarna regulacija, koja predstavlja superponirano dejstvo na primarne turbinske regulatore [20]. Pored njene osnovne namjene, u povezanom radu elektroenergetskih sistema, sekundarna regulacija ima za cilj i održavanje snaga razmjene na planiranim vrijednostima.

Uz primarnu i sekundarnu regulaciju, automatska regulacija proizvodnje uključuje i treći nivo regulacije. Tercijarna regulacija predstavlja preraspodjelu opterećenja na aggregate u pogonu s ciljem ispunjavanja ekonomskih ili sigurnosnih kriterijuma.



Slika 2.8: Funkcionalni blok dijagram sistema automatske regulacije proizvodnje

Za razliku od primarne i sekundarne regulacije, tercijarna regulacija najčešće nije automatskog karaktera, već se sprovodi ručno, na zahtjev operatora sistema.

Modelovanje cijelog sistema automatske regulacije proizvodnje nije neophodno u analizama ugaone stabilnosti. Dok se analize statičke stabilnosti ograničavaju na period od 10 do 20 sekundi nakon poremećaja, analize tranzijentne stabilnosti se obično ograničavaju na period od 3 do 5 sekundi nakon poremećaja³ [21]. Sa druge strane, vremenske konstante sekundarne i tercijarne regulacije imaju vrijednosti od nekoliko minuta i nekoliko desetina minuta, respektivno. Prema tome, u analizama statičke i tranzijentne stabilnosti se efekti sekundarne i tercijarne regulacije zanemaruju i isti predstavljaju predmet proučavanja frekventne stabilnosti. Za razliku od sekundarne i tercijarne regulacije, tretiranje primarne regulacije je nešto složenije.

Zbog značajnog uticaja početnog odgovora turbine i turbinskog regulatora na tok prelaznog procesa, njihovo modelovanje je neophodno u analizama tranzijentne stabilnosti. Ovo je posebno izraženo u slučaju parnih turbina koje imaju mogućnost brzog otvaranja i zatvaranja regulacionih ventila (eng. *fast valving*). Sa druge strane, dugi niz godina su analize statičke stabilnosti sprovedene uz zanemarivanje efekata turbine i turbinskog regulatora. Promjena paradigme dogodila se šezdesetih godina prošlog vijeka, kada je ustanovljeno da turbinski regulatori hidrauličnih turbina amplifikuju jedan od oscilatornih modova učestanosti 0,1 Hz u istočnoj interkonekciji Sjeverne Amerike [22]. Od tada se turbine i turbinski regulatori modeluju u analizama statičke stabilnosti ako analizirani sistem karakterišu slabo prigušeni oscilatorni modovi u frekventnom opsegu od 0,1 do 0,5 Hz. U suprotnom, dinamika turbine i turbinskog regulatora smatra se previše sporom da bi imala značajan uticaj na oscilatorne modove.

Iako postoje jasne smjernice o tome kada je neophodno predstaviti turbine i turbinske regulatore u analizama ugaone stabilnosti, još uvijek ne postoji jedinstven stav po pitanju njihovih modela. Neki od najuglednijih istraživača u ovoj oblasti, poput Federica Milana, zagovaraju stav da su pojednostavljeni modeli turbina i turbinskih regulatora više nego adekvatni za analize ugaone stabilnosti [23]. Sa druge strane, IEEE preporuka iz 2013. godine naglašava da su pojednostavljeni modeli zastarjeli i da se turbine i turbinski regulatori u analizama stabilnosti moraju predstavljati detaljnijim i složenijim modelima [24].

Iako detaljno modelovanje svih uticajnih faktora predstavlja ideal u analizi svih fizičkih pojava, u praksi postoje brojni izazovi. Kod analize elektroenergetskih sistema, ističu se tri ključna problema. Prvo, veliki broj kompanija u elektroenergetskom

³U velikim elektroenergetskim sistemima sa izraženim oscilacijama između oblasti, ovaj period može biti proširen na 10 do 20 sekundi.

sektoru raspolaže oskudnim ili nepouzdanim podacima o elektroenergetskim objektima u njihovom vlasništvu. Sa druge strane, čak i uz dostupnost svih potrebnih podataka, formiranje detaljnih dinamičkih modela elektroenergetskih sistema u interkonekciji predstavlja izuzetno vremenski zahtjevan zadatak. Na kraju, preciznost modela je obično u direktnoj korelaciji sa njegovim redom, pa primjena detaljnih modela značajno povećava proračunsku složenost simulacija realnih elektroenergetskih sistema⁴. Ove probleme najbolje ilustruju dva primjera iz prakse:

- Dinamički model istočne interkonekcije Sjeverne Amerike sadrži oko 7.000 sinhronih generatora. Turbine i turbinski regulatori nijesu modelovani za oko 50% generatora, dok su kod preostalih većinom usvojeni jednostavni modeli [24].
- Dinamički model kontinentalne Evrope obuhvata oko 6.000 sinhronih generatora. Manje od 20% generatora uključuje turbinu i turbinski regulator, pri čemu su svi predstavljeni pojednostavljenim modelom [25].

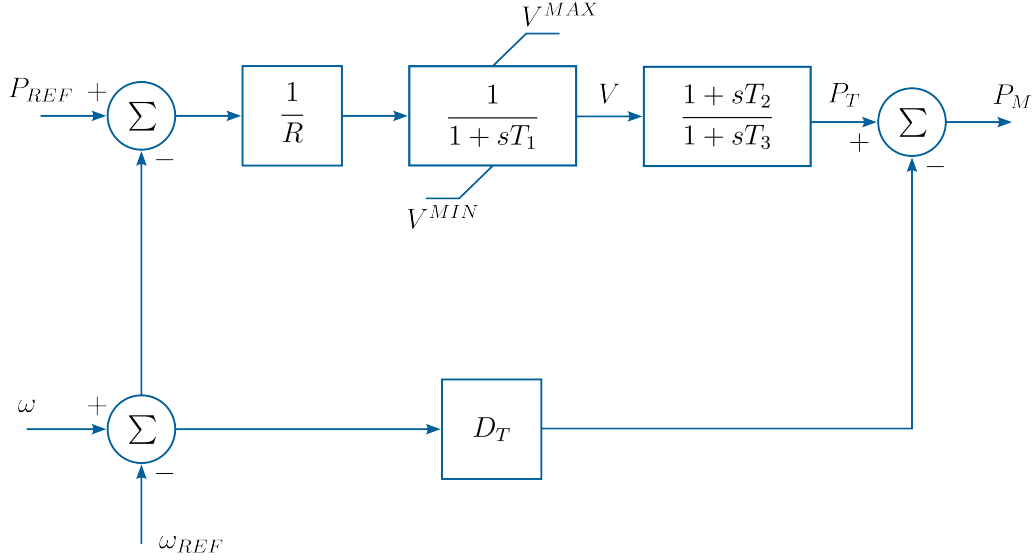
Ipak, važno je napomenuti da se u Sjevernoj Americi povećava udio detaljno modelovanih turbina i turbinskih regulatora. Ovo se može pripisati usvajanju MOD-033-1 standarda od strane Sjevernoameričke korporacije za pouzdanost elektroenergetskih sistema (eng. *North American Electric Reliability Corporation*, NERC), koji propisuje obaveznu dvogodišnju validaciju i kalibraciju dinamičkog modela elektroenergetskog sistema [26]. Ekvivalent ovakvom standardu u Evropi nije pronađen.

Imajući prethodno u vidu, jasno je da pojednostavljeni modeli turbina i turbinskih regulatora i dalje imaju veliku primjenu u praksi. Iz tog razloga, u nastavku će biti predstavljeni najčešće korišćeni pojednostavljeni modeli hidrauličnih i parnih turbina sa njihovim regulatorima. Za složenije modele i modele gasnih turbina, zainteresovani čitalac se upućuje na [24].

TGOV1 model parnih turbina

Jedan od najjednostavnijih i najčešće korišćenih modela parnih turbina je TGOV1 model, čiji je blok dijagram predstavljen na Slici 2.9. Model uključuje statizam turbinskog regulatora R , dinamiku parnog kotla i glavnog regulacionog ventila čija se pozicija ograničava na opseg od V^{MIN} do V^{MAX} , kao i dinamiku turbine visokog pritiska i pregrijača pare. Odnos vremenskih konstanti T_2 i T_3 predstavlja dio snage koji razvija turbina visokog pritiska. Snaga koja se razvija na svim stepenima turbine P_T , umanjena za gubitke usljed trenja kvantifikovane koeficijentom prigušenja D_T , daje mehaničku snagu na osovini rotora P_M .

⁴Imajući u vidu Murov zakon i tehnološke inovacije na polju kvantnih računara, ovaj izazov će u budućnosti vjerovatno biti prevaziđen.



Slika 2.9: Blok dijagram TGOV1 modela parnih turbina

U skladu sa usvojenom notacijom, jednačine TGOV1 modela su:

$$T_1 \frac{dV}{dt} = \frac{P_{REF}}{R} + \frac{\omega - \omega_{REF}}{R} - V \quad (2.75)$$

$$T_3 \frac{dP_T}{dt} = V - P_T + \frac{T_2}{T_1} \left(\frac{P_{REF}}{R} + \frac{\omega - \omega_{REF}}{R} - V \right) \quad (2.76)$$

$$P_M = P_T - D_T (\omega - \omega_{REF}) \quad (2.77)$$

gdje su parametri modela dati u Tabeli 2.5. Važno je istaći da su podaci o turbini i turbinskom regulatoru najčešće dostupni u jediničnim vrijednostima, pri čemu se za baznu vrijednost snage usvaja naznačena aktivna ili prividna snaga sinhronog generatora S_n . Ako je ovo slučaj, podatke je neophodno svesti na sistemsku baznu snagu S_B . Na primjer, svedena vrijednost statizma turbinskog regulatora se određuje primjenom jednačine:

$$R^{SV} = R \frac{S_B}{S_n} \quad (2.78)$$

Za TGOV1 model parnih turbina u stacionarnom stanju, gdje važi $\omega = \omega_{REF}$, inicijalizacija modela se sprovodi na osnovu mehaničke snage na osovini rotora P_M , koja je prethodno određena inicijalizacijom dinamičkog modela sinhronog generatora. Početne vrijednosti promjenljivih stanja i ulaznih promjenljivih modela se određuju primjenom jednačina:

$$P_T = V = P_M \quad (2.79)$$

$$P_{REF} = RV \quad (2.80)$$

Tabela 2.5: Parametri TGOV1 modela parnih turbina

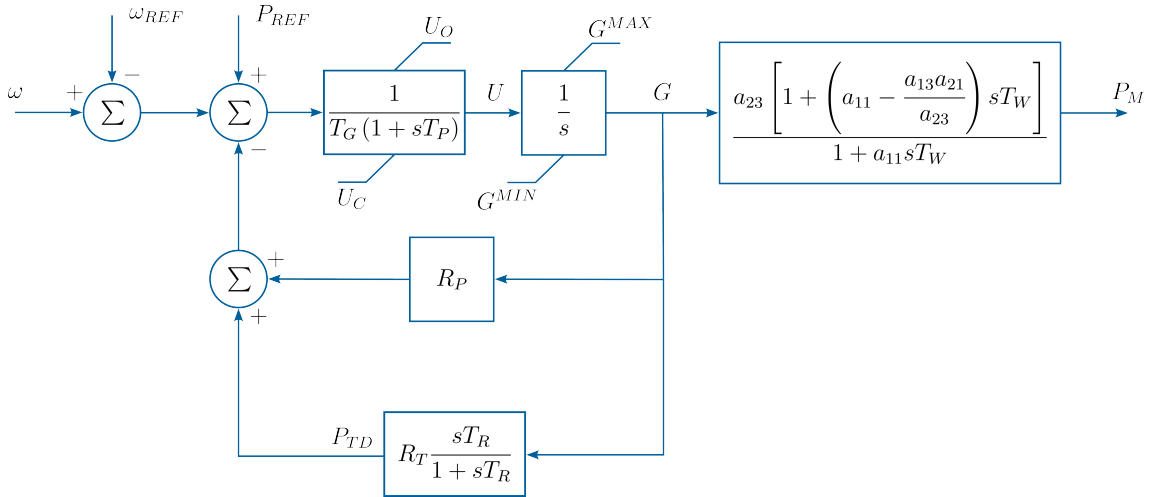
Parametar	Opis	Jedinica
R	trajni statizam turbinskog regulatora	r.j.
T_1	vremenska konstanta parnog kotla	s
V^{MAX}	maksimalna pozicija regulacionog ventila	r.j.
V^{MIN}	minimalna pozicija regulacionog ventila	r.j.
T_2	vremenska konstanta turbine visokog pritiska	s
T_3	vremenska konstanta pregrijača pare	s
D_T	koeficijent prigušenja turbine	r.j.

IEEEG3 model hidrauličnih turbina

IEEEG3 model je jedan od najčešće korišćenih modela hidrauličnih turbina i njihovih turbinskih regulatora. Model turbinskog regulatora predstavlja tipični mehaničko-hidraulični regulator. Iako je većina savremenih hidroagregata opremljena elektro-hidrauličnim regulatorima, njihove dinamičke karakteristike su veoma slične starijim mehaničko-hidrauličnim regulatorima. Iz tog razloga, predstavljeni model se može koristiti i za novije izvedbe turbinskih regulatora. Sama turbina je predstavljena linearnim modelom razvijenim uz pretpostavku neelastičnog cjevovoda. Ovakav model turbine se bez izuzetka može koristiti u analizama statičke stabilnosti, dok je njegova validnost u analizama tranzijentne stabilnosti ograničena na scenarije bez izraženih odstupanja brzine.

Blok dijagram IEEEG3 modela je predstavljen na Slici 2.10. Promjena ulaznog signala, koji predstavlja linearnu kombinaciju referentne snage turbine P_{REF} i odstupanja brzine $\omega - \omega_{REF}$, uzrokuje promjenu položaja klipa servomotora. Ova promjena dalje dovodi do promjene položaja zatvarača G . Brzina promjene položaja zatvarača je ograničena na U_C pri zatvaranju, odnosno na U_O pri otvaranju, kako bi se spriječila pojava nedozvoljeno visokog pritiska u cjevovodu zbog relativno slabe stišljivosti vode. Slično, položaj zatvarača se ograničava na opseg od G^{MIN} do G^{MAX} , koji odgovara minimalnoj i maksimalnoj snazi turbine, respektivno.

Pored trajnog statizma R_P , regulatori hidrauličnih turbina su opremljeni i povratnom spregom sa prolaznim statizmom R_T , koja sprečava suprotnu promjenu snage od one koja je potrebna neposredno nakon poremećaja. U suštini, prolazni statizam usporava djelovanje turbinskog regulatora u slučaju brzih prelaznih procesa. Iz tog razloga, turbinski regulatori hidrauličnih turbina za vrijeme brzih prelaznih procesa imaju visoku, a za vrijeme sporih prelaznih procesa nisku vrijednost statizma.



Slika 2.10: Blok dijagram IEEE3 modela hidrauličnih turbina

Sama turbina je predstavljena neminimalno faznom funkcijom prenosa u kojoj figurišu koeficijenti turbine (a_{11} , a_{13} , a_{21} , a_{23}) i vrijeme startovanja vode T_W . Koeficijenti zavise od tipa turbine, ali i od opterećenja, pa ih je neophodno modifikovati u skladu sa karakteristikom turbine. Odgovarajućim izborom koeficijenata, dobija se funkcija prenosa idealne turbine bez gubitaka:

$$G_T(s) = \frac{1 - sT_W}{1 + \frac{sT_W}{2}} \quad (2.81)$$

koja je dugi niz godina korišćena u analizama statičke stabilnosti.

IEEE3 model hidraulične turbine može se opisati jednačinama:

$$T_P \frac{dU}{dt} = P_{REF} + \omega - \omega_{REF} - R_P G - P_{TD} - T_G U \quad (2.82)$$

$$\frac{dG}{dt} = U \quad (2.83)$$

$$T_R \frac{dP_{TD}}{dt} = T_R R_T U - P_{TD} \quad (2.84)$$

$$B_T T_W \frac{dP_M}{dt} = K_T G + K_T A_T T_W U - P_M \quad (2.85)$$

gdje su konstante K_T , A_T i B_T date izrazima:

$$K_T = a_{23}, \quad A_T = a_{11} - \frac{a_{13} a_{21}}{a_{23}}, \quad B_T = a_{11} \quad (2.86)$$

dok su parametri modela definisani u Tabeli 2.6.

Tabela 2.6: Parametri IEEE3G modela hidrauličnih turbina

Parametar	Opis	Jedinica
T_P	vremenska konstanta pilot servomotora	s
T_G	vremenska konstanta glavnog servomotora	s
U_O	maksimalna brzina otvaranja zatvarača	r.j./s
U_C	maksimalna brzina zatvaranja zatvarača	r.j./s
G^{MAX}	maksimalni položaj zatvarača	r.j.
G^{MIN}	minimalni položaj zatvarača	r.j.
R_P	trajni statizam	r.j.
R_T	prolazni statizam	r.j.
T_R	vremenska konstanta amortizera	s
T_W	vrijeme startovanja vode	s
a_{11}	koeficijent turbine	-
a_{13}	koeficijent turbine	-
a_{21}	koeficijent turbine	-
a_{23}	koeficijent turbine	-

Za IEEE3G model hidraulične turbine u stacionarnom stanju, gdje važi $\omega = \omega_{REF}$, inicijalizacija modela se sprovodi na osnovu mehaničke snage na osovini rotora P_M primjenom jednačina:

$$U = P_{TD} = 0 \quad (2.87)$$

$$G = \frac{P_M}{K_T} \quad (2.88)$$

$$P_{REF} = R_P G \quad (2.89)$$

2.1.5 Model elektroenergetske mreže

Elektroenergetska mreža nije izolovana od poremećaja koji uzrokuju elektromehaničke oscilacije - naprotiv. Nagle promjene potrošnje ili proizvodnje, kratki spojevi i ispadi mrežnih elemenata uzrokuju elektromagnetne prelazne procese tokom kojih dolazi do razmjene energije između električnog i magnetnog polja. Ipak, vremenske konstante elektromagnetnih prelaznih procesa su neuporedivo kraće od vremenskih konstanti elektromehaničkih prelaznih procesa. Iz tog razloga se, u analizama elektromehaničkih prelaznih procesa, za elektroenergetsku mrežu smatra da direktno prelazi iz jednog stacionarnog stanja u drugo. Ovo omogućava njeno predstavljanje sistemom nelinearnih algebarskih jednačina koje se rješavaju zajedno sa diferencijalnim jednačinama ostalih elemenata elektroenergetskog sistema.

Algebarske jednačine mreže se mogu formulisati na bazi metoda napona nezavisnih čvorova ili na bazi jednačina injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga. U nastavku su predstavljene obje formulacije, kao i analiza njihovih prednosti i mana.

Model mreže na bazi metoda napona nezavisnih čvorova

Osnovna jednačina metoda napona nezavisnih čvorova ima oblik:

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{Y}_B \mathbf{V}_B \quad (2.90)$$

gdje je \mathbf{I}_B vektor injektiranih struja nezavisnih čvorova, \mathbf{V}_B vektor napona nezavisnih čvorova, a \mathbf{Y}_B matrica admitansi nezavisnih čvorova. U razvijenoj formi, jednačina injektiranja struje u čvoru i ima oblik:

$$\underline{I}_i = \sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \underline{V}_k \quad (2.91)$$

gdje je \underline{Y}_{ik} element matrice \mathbf{Y}_B na poziciji (i, k) , \underline{V}_k napon čvora k , a n broj nezavisnih čvorova sistema.

U skladu sa aktivnom konvencijom, injektiranje struje u čvoru i se može predstaviti kao:

$$\underline{I}_i = \underline{I}_{Gi} - \underline{I}_{Pi} \quad (2.92)$$

gdje su \underline{I}_{Gi} i \underline{I}_{Pi} struje generatora i potrošača u čvoru i , respektivno.

Struja generatora u čvoru i se, u referentnom koordinatnom sistemu mreže, može izraziti na osnovu njenih komponenti po d i q -osi kao:

$$\underline{I}_{Gi} = (I_{di} + jI_{qi}) e^{j(\delta_i - \frac{\pi}{2})} \quad (2.93)$$

Sa druge strane, struja potrošača u čvoru i može se odrediti primjenom jednačine:

$$\underline{I}_{Pi} = \frac{P_{Pi}(V_i) - jQ_{Pi}(V_i)}{V_i e^{-j\theta_i}} \quad (2.94)$$

gdje su $P_{Pi}(V_i)$ i $Q_{Pi}(V_i)$ aktivna i reaktivna snaga potrošača, a V_i i θ_i moduo i fazni stav napona u čvoru i , respektivno. Oznake $P_{Pi}(V_i)$ i $Q_{Pi}(V_i)$ ukazuju da se prilikom proračuna struje uzimaju u obzir statičke karakteristike potrošača, čiji je najopštiji oblik dat ZIP modelom. Generalno, ne postoji jedinstven stav oko načina modelovanja potrošača u analizama statičke i tranzijentne stabilnosti. Dobar pregled postojećih praksi predstavljen je u [27], ali je jasno da ovo pitanje nije dovoljno istraženo.

Zamjenom jednačina (2.93) i (2.94) u jednačine (2.91) i (2.92), dolazi se do opšte forme jednačine injektiranja struje u čvoru i :

$$(I_{di} + jI_{qi}) e^{j(\delta_i - \frac{\pi}{2})} - \frac{P_{Pi}(V_i) - jQ_{Pi}(V_i)}{V_i e^{-j\theta_i}} = \sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik} \underline{V}_k \quad (2.95)$$

Primjenom prethodne relacije na svih n čvorova u sistemu i njihovim razdvajanjem na realni i imaginarni dio, dolazi se do sistema od $2n$ nelinearnih algebarskih jednačina mreže.

Model mreže na bazi jednačina injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga

Model mreže na bazi jednačina injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga predstavlja klasični model mreže korišćen za formulaciju problema tokova snaga. Injektiranje kompleksne snage u čvoru i dato je jednačinom:

$$\underline{S}_i = \underline{V}_i \sum_{k=1}^n \underline{Y}_{ik}^* \underline{V}_k^* \quad (2.96)$$

Uvođenjem polarnih formi:

$$\underline{V}_i = V_i e^{j\theta_i}, \quad \underline{V}_k = V_k e^{j\theta_k}, \quad \underline{Y}_{ik} = Y_{ik} e^{j\alpha_{ik}} \quad (2.97)$$

jednačina injektiranja kompleksne snage dobija oblik:

$$\underline{S}_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_i V_k e^{j(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik})} \quad (2.98)$$

čijim se razdvajanjem na realni i imaginarni dio određuju jednačine injektiranja aktivne i reaktivne snage u čvoru i :

$$P_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_i V_k \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.99)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_i V_k \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.100)$$

U skladu sa aktivnom konvencijom, injektiranja aktivne i reaktivne snage u čvoru i mogu se predstaviti kao:

$$P_i = P_{Gi} - P_{Pi} \quad (2.101)$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Pi} \quad (2.102)$$

gdje se aktivna i reaktivna snaga generatora u čvoru i date izrazima:

$$P_{Gi} = V_i I_{di} \sin(\delta_i - \theta_i) + V_i I_{qi} \cos(\delta_i - \theta_i) \quad (2.103)$$

$$Q_{Gi} = V_i I_{di} \cos(\delta_i - \theta_i) - V_i I_{qi} \sin(\delta_i - \theta_i) \quad (2.104)$$

Zamjenom prethodnih izraza u jednačine (2.99) i (2.100) i uvažavanjem statičkih karakteristika potrošača, dolazi se do opšte forme jednačina injektiranja aktivne i reaktivne snage u čvoru i :

$$V_i I_{di} \sin(\delta_i - \theta_i) + V_i I_{qi} \cos(\delta_i - \theta_i) - P_{Pi}(V_i) = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_i V_k \cos(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.105)$$

$$V_i I_{di} \cos(\delta_i - \theta_i) - V_i I_{qi} \sin(\delta_i - \theta_i) - Q_{Pi}(V_i) = \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_i V_k \sin(\theta_i - \theta_k - \alpha_{ik}) \quad (2.106)$$

Kao i u prethodnom slučaju, primjenom prethodnih jednačina na svih n čvorova u sistemu, dolazi se do sistema od $2n$ nelinearnih algebarskih jednačina mreže.

Izbor formulacije mrežnih jednačina

Objek formulacije mrežnih jednačina imaju svoje prednosti i mane. Model mreže na bazi metoda napona nezavisnih čvorova dominantno se koristi u industrijskim softverima za analizu elektroenergetskih sistema [23]. Njegova široka primjena proizilazi iz mogućnosti redukcije matrice \mathbf{Y}_B , čime se eliminišu mrežne jednačine koje odgovaraju pasivnim čvorovima. Takođe, ako se potrošači predstavljaju modelom konstantne impedanse, iste je moguće uključiti u matricu \mathbf{Y}_B , što omogućava dalju redukciju sistema jednačina i čini sistem mrežnih jednačina linearnim. Sve ovo doprinosi manjoj proračunskoj složenosti koja može predstavljati ograničavajući faktor kod analiza realnih elektroenergetskih sistema velikih dimenzija.

Pored navedenih prednosti, model mreže na bazi metoda napona nezavisnih čvorova omogućava jednostavno simuliranje kratkih spojeva promjenom sopstvene admitanse čvora u kojem se kvar desio. U slučaju trolnog kratkog spoja, sopstvenoj admitansi čvora se dodaje velika konduktansa. Ako je bazna snaga sistema 100 MVA, tipično je konduktansa od 10^6 r.j. dovoljna kako bi napon čvora u kojem se desio trolni kratki spoj bio jednak nuli [9]. Sa druge strane, nesimetrični kratki spojevi simuliraju se dodavanjem ekvivalentnih admitansi sistema inverznog i nultog redosljeda sopstvenoj admitansi čvora, u zavisnosti od vrste kratkog spoja.

Što se tiče modela mreže na bazi jednačina injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga, njegova najveća prednost je primjena istog modela mreže za potrebe proračuna tokova snaga i analiza stabilnosti. Ovo rezultira značajno jednostavnijim i kompaktnijim kodom u poređenju sa modelom na bazi metoda napona nezavisnih čvorova. Ipak, primjena modela mreže na bazi jednačina injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga usložnjava tretiranje kratkih spojeva. Ako se kratki spojevi tretiraju modifikacijama matrice \mathbf{Y}_B , matrica Jakobijana mrežnih jednačina postaje singularna. Iz tog razloga je, tokom trajanja kvara, neophodno eliminisati jednačine injektiranja aktivnih i reaktivnih snaga u čvoru u kojem se desio kvar.

Imajući prethodno u vidu, prednosti modela mreže na bazi metoda napona nezavisnih čvorova su očigledne, što opravdava njegovu primjenu u industrijskim softverima za analizu elektroenergetskih sistema. Iz tog razloga je ovaj model usvojen za implementaciju softverskog alata za analizu stabilnosti razvijenog u okviru ove disertacije. Međutim, pretpostavka o predstavljanju potrošača modelom konstantne impedanse nije usvojena, već se model koristi u izvornoj formi opisanoj jednačinom (2.95). Mišljenje autora ove disertacije je da uticaj statičkih karakteristika potrošača na ugaonu stabilnost nije dovoljno istražen u dostupnoj literaturi, pa je, s obzirom na brojnost i raznolikost potrošača, ovakva pretpostavka upitna.

Važno je napomenuti da neusvajanje pretpostavke o konstantnoj impedansi potrošača čini sistem mrežnih jednačina nelinearnim. Ipak, ovo ne predstavlja značajan problem, jer se za rješavanje sistema diferencijalno-algebarskih jednačina koje opisuju elektroenergetski sistem koriste implicitne metode integracije. Kod ovih metoda, algebarske jednačine se rješavaju istovremeno sa diferencijalnim jednačinama, koje su u opštem slučaju nelinearne. Zbog toga je primjena Newton-Raphsonovog metoda neizbježna, bez obzira na linearnost mrežnih jednačina. Jedini nedostatak ovog pristupa je nešto veća proračunska složenost, jer tretiranje realnih statičkih karakteristika potrošača onemogućava eliminaciju potrošačkih čvorova iz matrice \mathbf{Y}_B .

2.1.6 FACTS uređaji

FACTS (eng. *Flexible AC Transmission System*) uređaji su statički uređaji zasnovani na elementima energetske elektronike, koji se koriste za regulaciju napona i upravljanje tokovima snaga u elektroenergetskim sistemima [28]. Strateška alokacija FACTS uređaja doprinosi poboljšanju naponskih prilika, smanjenju gubitaka snage i energije, povećanju prenosnog kapaciteta, ali i unapređenju naponske i ugaone stabilnosti elektroenergetskog sistema. Sami po sebi, FACTS uređaji u opštem slučaju ne doprinose prigušenju oscilacija. Međutim, moguće ih je opremiti odgovarajućim kontrolerima tako da, pored svoje osnovne uloge, obavljaju i ovu funkciju.

Za razliku od ostalih elemenata elektroenergetskog sistema koji su do sada razmatrani, za FACTS uređaje ne postoje standardizovani modeli za primjenu u analizama stabilnosti. Modeli predstavljeni u nastavku, zastupljeni u velikom broju istraživačkih radova, preuzeti su iz [29]. Od širokog spektra FACTS uređaja, predstavljeni su modeli statičkog kompenzatora reaktivne snage (eng. *Static VAR Compensator*, SVC) i tiristorski kontrolisanog rednog kompenzatora (eng. *Thyristor-Controlled Series Capacitor*, TCSC), koji su našli najveću primjenu u prigušenju oscilacija.

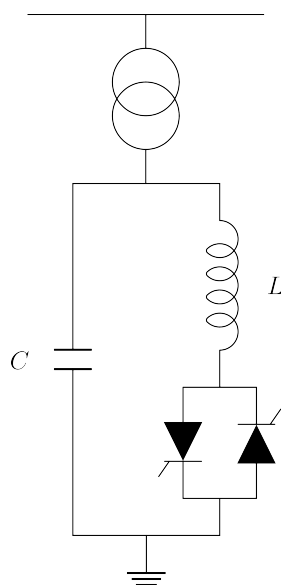
Model SVC uređaja

Statički kompenzator reaktivne snage je otočni FACTS uređaj koji predstavlja paralelnu vezu kondenzatora konstantne kapacitivnosti i tiristorski kontrolisanog reaktora kao na Slici 2.11. U zavisnosti od ugla okidanja tiristora, ekvivalentna impedansa SVC uređaja može biti induktivna ili kapacitivna. Drugim riječima, SVC uređaj se po potrebi može ponašati kao potrošač ili proizvođač reaktivne snage, što ga čini odličnim naponsko-reaktivnim regulacionim resursom.

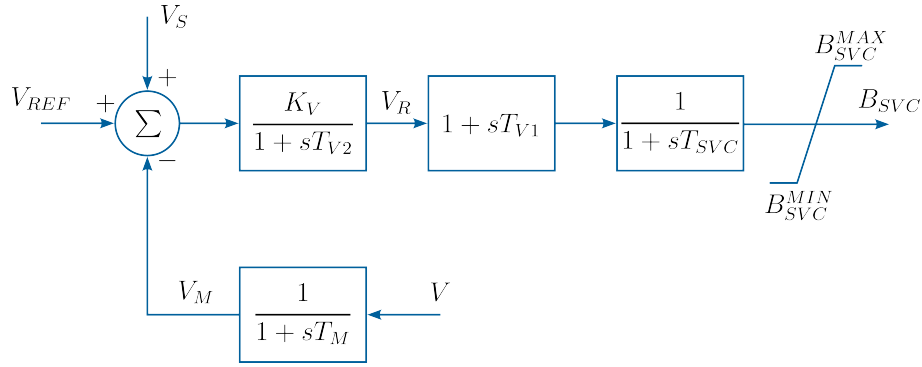
Injektiranje reaktivne snage od strane SVC uređaja priključenog u čvor k dato je jednačinom:

$$Q_k = B_{SVC} V_k^2 \quad (2.107)$$

gdje je $B_{SVC} = B_C - B_L$ ekvivalentna susceptansa SVC uređaja, a B_C i B_L predstavljaju susceptanse kondenzatora i tiristorski kontrolisanog reaktora, respektivno. Injektiranje reaktivne snage se jednostavno uključuje u mrežni model, bez obzira na korišćenu formulaciju.



Slika 2.11: Topologija SVC uređaja



Slika 2.12: Blok dijagram dinamičkog modela SVC uređaja

Ekvivalentnom susceptansom B_{SVC} upravlja se u skladu sa blok dijagramom na Slici 2.12, kako bi se napon čvora u kojem je SVC priključen održavao na željenoj vrijednosti. Signal greške predstavlja razliku između referentne V_{REF} i mjerene vrijednosti napona V_M , uvećanu za signal V_S koji predstavlja izlaz kontrolera za prigušenje oscilacija, ako je SVC uređaj opremljen istim. Na osnovu signala greške, regulator generiše upravljački signal koji se koristi za formiranje okidnih signala za tiristorske pretvarače. Cjelokupna dinamika tiristorskih pretvarača je predstavljena prenosnom funkcijom prvog reda sa vremenskom konstantom T_{SVC} .

U skladu sa izloženom notacijom, dinamički model SVC uređaja se može opisati jednačinama:

$$T_M \frac{dV_M}{dt} = V - V_M \quad (2.108)$$

$$T_{V2} \frac{dV_R}{dt} = K_V (V_{REF} + V_S - V_M) - V_R \quad (2.109)$$

$$T_{SVC} \frac{dB_{SVC}}{dt} = V_R - B_{SVC} + \frac{T_{V1}}{T_{V2}} [K_V (V_{REF} + V_S - V_M) - V_R] \quad (2.110)$$

čiji su parametri dati u Tabeli 2.7.

Za SVC uređaj u stacionarnom stanju, početne vrijednosti promjenljivih stanja i ulaznih promjenljivih se određuju na osnovu početnih vrijednosti susceptanse B_{SVC} i napona na sabirnicama V , primjenom jednačina:

$$V_M = V \quad (2.111)$$

$$V_R = B_{SVC} \quad (2.112)$$

$$V_{REF} = V_M + \frac{V_R}{K_V} \quad (2.113)$$

Tabela 2.7: Parametri dinamičkog modela SVC uređaja

Parametar	Opis	Jedinica
T_M	vremenska konstanta mjernog pretvarača	s
T_{V1}	diferencijalna vremenska konstanta regulatora	s
T_{V2}	integralna vremenska konstanta regulatora	s
K_V	pojačanje regulatora	r.j.
T_{SVC}	vremenska konstanta tiristorskih pretvarača	s
B_{SVC}^{MAX}	maksimalna susceptansa SVC uređaja	r.j.
B_{SVC}^{MIN}	minimalna susceptansa SVC uređaja	r.j.

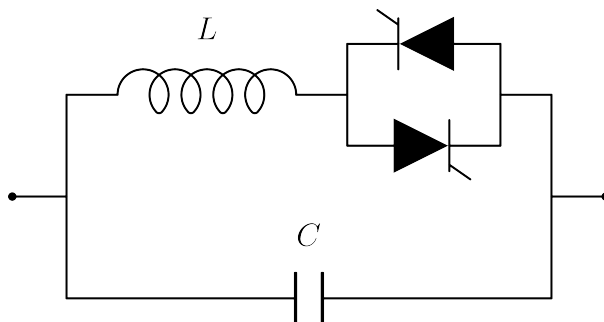
Model TCSC uređaja

Topologija tiristorski kontrolisanog rednog kompenzatora prikazana je na Slici 2.13. Kao što se uočava, topologija TCSC uređaja je slična topologiji statičkog kompenzatora reaktivne snage, uz osnovnu razliku da TCSC pripada klasi rednih FACTS uređaja. Promjenom ugla okidanja tiristora, mijenja se ekvivalentna impedansa TCSC uređaja. Ekvivalentna reaktansa je u opštem slučaju kapacitivna tako da djelimično kompenzuje induktivnu reaktansu dalekovoda na koji je TCSC priključen. Međutim, ekvivalentna impedansa može biti i induktivna kada se TCSC koristi za ograničavanje struje kratkog spoja [28].

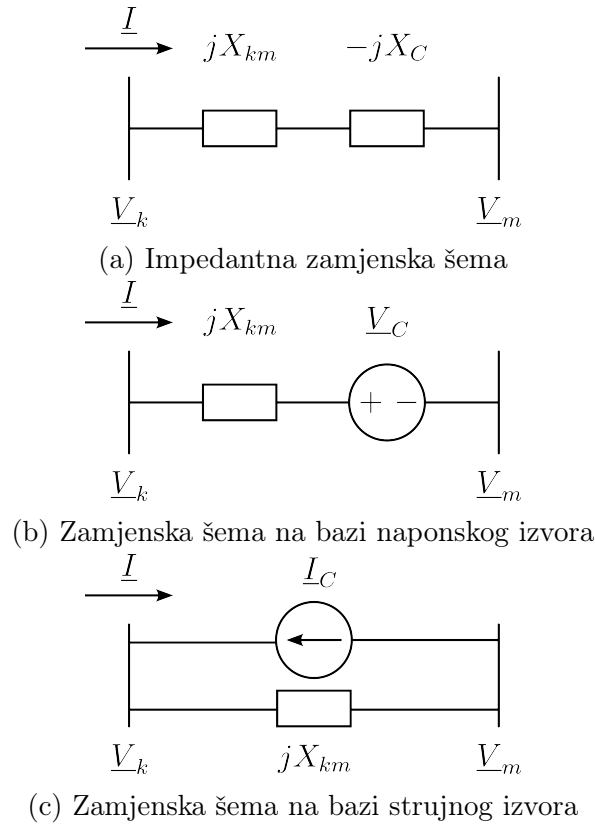
Djelovanje TCSC uređaja opisuje se pomoću faktora kompenzacije K_C . Za TCSC uređaj priključen na dalekovod (k, m) , faktor kompenzacije definiše se u odnosu na reaktansu dalekovoda X_{km} kao:

$$K_C = \frac{X_C}{X_{km}} \quad (2.114)$$

gdje je X_C ekvivalentna kapacitivna reaktansa TCSC uređaja. Iako je modifikacija matrice \mathbf{Y}_B najprirodniji pristup za integraciju TCSC uređaja u mrežni model, ovaj pristup se u praksi najčešće ne koristi. Razlog za ovo je činjenica da do promjene



Slika 2.13: Topologija TCSC uređaja



Slika 2.14: Ekvivalentne zamjenske šeme TCSC uređaja

matrice \mathbf{Y}_B dolazi samo u slučaju kratkih spojeva ili promjena konfiguracije sistema. Sa druge strane, faktor kompenzacije K_C je dinamička promjenljiva koja se može mijenjati bilo promjenom referentne kompenzacije, bilo pod uticajem kontrolera za prigušenje oscilacija. Prema tome, ovaj pristup bi zahtijevao stalno ažuriranje matrice \mathbf{Y}_B u dinamičkim simulacijama, što se izbjegava predstavljanjem TCSC uređaja ekvivalentnim strujnim izvorom.

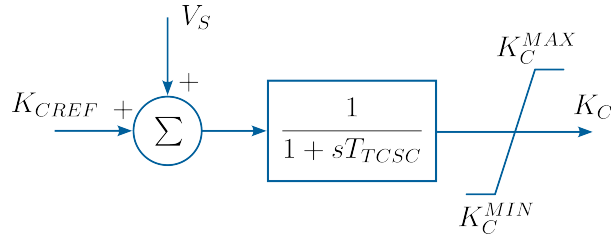
Polazeći od Slike 2.14a, struja redno kompenzovanog dalekovoda se, uz zanemarenu otpornost dalekovoda, određuje kao:

$$\underline{I} = \frac{\underline{V}_k - \underline{V}_m}{j(X_{km} - X_C)} = \frac{\underline{V}_k - \underline{V}_m}{j(1 - K_C)X_{km}} \quad (2.115)$$

Napon na ekvivalentnoj reaktansi TCSC uređaja je tada:

$$\underline{V}_C = -jX_C \underline{I} = -jK_C X_{km} \underline{I} = -\frac{K_C}{1 - K_C} (\underline{V}_k - \underline{V}_m) \quad (2.116)$$

pa se ekvivalentna reaktansa TCSC uređaja može zamijeniti ekvivalentnim naponskim izvorom kao na Slici 2.14b. Na kraju, transformacijom redne veze reaktanse



Slika 2.15: Blok dijagram dinamičkog modela TCSC uređaja

dalekovoda i naponskog izvora u paralelnu vezu iste reaktanse i strujnog izvora:

$$\underline{I}_C = \frac{V_C}{jX_{km}} = j \frac{K_C}{1 - K_C} \frac{V_k - V_m}{X_{km}} \quad (2.117)$$

dolazi se do finalnog oblika ekvivalentne zamjenske šeme prikazane na Slici 2.14c.

Kao što se uočava, korišćenjem strujne reprezentacije, TCSC uređaj se može lako integrisati u mrežni model modifikacijom vektora injektiranih struja, dok matrica \mathbf{Y}_B ostaje nepromijenjena.

Dinamički model TCSC uređaja prikazan je na Slici 2.15. Cjelokupna dinamika tiristorskih pretvarača i njihovih upravljačkih krugova je predstavljena funkcijom prenosa prvog reda. Kao što je ranije objašnjeno, faktor kompenzacije K_C se može mijenjati promjenom referentne kompenzacije K_{CREF} ili pod uticajem stabilizacionog signala V_S kontrolera za prigušenje oscilacija.

U skladu sa usvojenom notacijom, dinamički model TCSC uređaja se opisuje diferencijalnom jednačinom:

$$T_{TCSC} \frac{dK_C}{dt} = K_{CREF} + V_S - K_C \quad (2.118)$$

dok su parametri modela definisani u Tabeli 2.8.

U stacionarnom stanju sistema, gdje je izlaz kontrolera za prigušenje oscilacija $V_S = 0$, faktor kompenzacije K_C je jednak njegovoj referentnoj vrijednosti K_{CREF} na osnovu čega se sprovodi inicijalizacija dinamičkog modela.

Tabela 2.8: Parametri dinamičkog modela TCSC uređaja

Parametar	Opis	Jedinica
T_{TCSC}	vremenska konstanta tiristorskih pretvarača	s
K_C^{MAX}	maksimalna vrijednost faktora kompenzacije	-
K_C^{MIN}	minimalna vrijednost faktora kompenzacije	-

2.1.7 Ograničavači

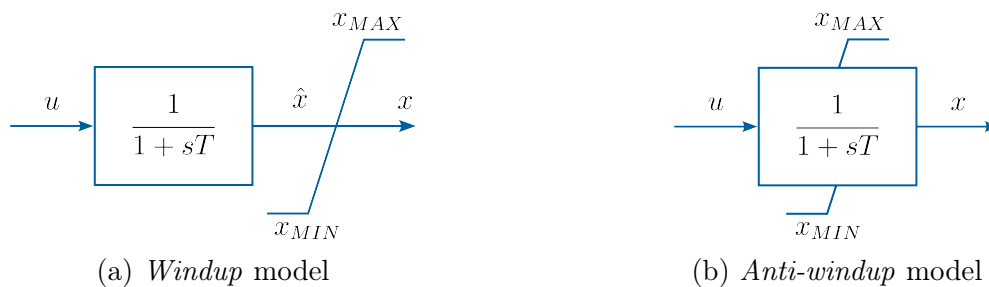
U većini blok dijagrama razmatranih u prethodnim poglavljima pojavljuju se ograničavači različitih namjena. Kod pobudnih sistema, njihova osnovna uloga je ograničavanje pobudnog napona kako bi se spriječilo prekomjerno zagrijavanje pobudnog namotaja i prekomjerno naprezanje izolacije. U slučaju turbina i turbinskih regulatora, ograničavači oslikavaju fizičke granice položaja zatvarača i štite turbinu od prebrzih promjena opterećenja i prekomjernog opterećenja. Kod stabilizatora elektroenergetskog sistema, njihova uloga je ograničavanje modulišućeg signala kako bi se spriječile pojave nedozvoljeno niskih ili visokih napona na sabirnicama generatora. U suštini, siguran rad svih uređaja u elektroenergetskom sistemu bi bio nemoguć bez primjene ograničavača.

U analizama statičke stabilnosti, uticaj ograničavača se obično zanemaruje. Ovo je posljedica činjenice da mali poremećaji, po pravilu, ne rezultiraju velikim odstupanjima karakterističnih veličina u elektroenergetskom sistemu od njihovih početnih vrijednosti. Prema tome, ako se sistem prije poremećaja nalazio daleko od oblasti djelovanja ograničavača, validna pretpostavka je da isto važi i pri djelovanju malih poremećaja. Sa druge strane, veliki poremećaji rezultiraju burnim promjenama karakterističnih veličina u elektroenergetskom sistemu, pa je modelovanje ograničavača neophodno u analizama tranzijentne stabilnosti.

Na Slici 2.16 predstavljena su dva najčešća načina za modelovanje ograničavača. *Windup* model ograničavača je najjednostavniji model koji se može opisati jednačinom:

$$x = \begin{cases} x_{MAX}, & \tilde{x} \geq x_{MAX} \\ \tilde{x}, & x_{MIN} < \tilde{x} < x_{MAX} \\ x_{MIN}, & \tilde{x} \leq x_{MIN} \end{cases} \quad (2.119)$$

gdje x_{MIN} i x_{MAX} predstavljaju donju i gornju graničnu vrijednost promjenljive x .



Slika 2.16: *Windup* i *anti-windup* model ograničavača

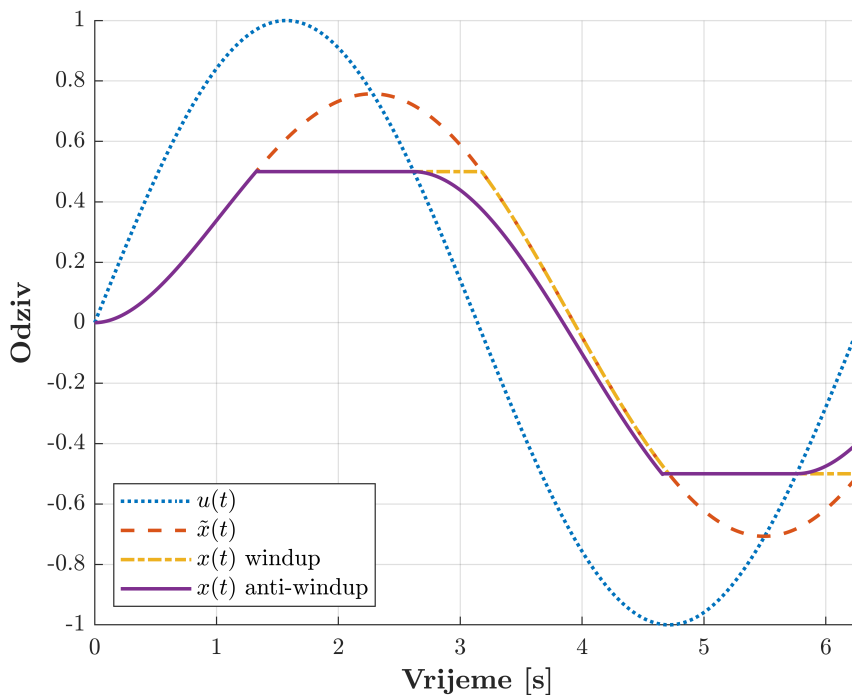
Sa druge strane, *anti-windup* model se može opisati jednačinama:

$$\frac{dx}{dt} = \begin{cases} 0, \text{ uz } x = x^{MAX}, & \text{za } x \geq x^{MAX} \wedge \frac{dx}{dt} \geq 0 \\ 0, \text{ uz } x = x^{MIN}, & \text{za } x \leq x^{MIN} \wedge \frac{dx}{dt} \leq 0 \\ \frac{u - x}{T}, & \text{inače} \end{cases} \quad (2.120)$$

i, kao što se uočava, za razliku od *windup* ograničavača, utiče kako na promjenljivu stanja x , tako i na njen izvod.

Djelovanje *windup* i *anti-windup* ograničavača najlakše je objasniti na konkretnom primjeru preuzetom iz [23]. Neka se posmatraju sistemi kao na Slici 2.16, sa parametrima $T = 1 \text{ s}$, $x^{MIN} = -0,5$ i $x^{MAX} = 0,5$. Odzivi sistema sa različitim modelom ograničavača za ulazni signal $u(t) = \sin(t)$ prikazani su na Slici 2.17.

Kao što se uočava, kada promjenljiva $\tilde{x}(t)$ pređe gornju graničnu vrijednost, vrijednost promjenljive $x(t)$ se fiksira na x^{MAX} i kod oba modela. Međutim, ponašanje ovih modela razlikuje se kod nastavka slobodnog kretanja sistema nakon primjene ograničenja. Dok se kod *anti-windup* modela slobodno kretanje sistema nastavlja čim izvod promjenljive $x(t)$ promijeni znak, *windup* model unosi kašnjenje poznato kao *windup* efekat. Ovaj efekat se ne javlja kod realnih regulatora, pa se u dinamičkim simulacijama elektroenergetskog sistema obično koristi *anti-windup* model.



Slika 2.17: Poređenje odziva *windup* i *anti-windup* ograničavača

Na kraju, važno je naglasiti da se *windup* i *anti-windup* modeli ograničavača jednostavno implementiraju za prenosnu funkciju razmatranu u ovom poglavlju. Međutim, njihova implementacija postaje složenija u slučaju složenijih funkcija prenosa. Detaljno tretiranje modela ograničavača za različite funkcije prenosa prevazilazi okvire ove disertacije, pa se zainteresovani čitalac upućuje na [9].

2.2 Analiza tranzijentne stabilnosti

Tranzijentna stabilnost predstavlja sposobnost elektroenergetskog sistema da ostane u sinhronizmu nakon velikih poremećaja, kao što su kratki spojevi ili ispadi velikih generatora i potrošača. Veliki poremećaji su, po pravilu, praćeni velikim varijacijama brzine obrtanja rotora sinhronih generatora, napona u čvorovima sistema, tokovima aktivnih i reaktivnih snaga, kao i drugih parametara režima. Prema tome, osnovni zadatak analize tranzijentne stabilnosti je ispitivanje stabilnosti elektroenergetskog sistema nakon pojave velikih poremećaja.

Slijedeći razvoj elektroenergetskih sistema i razvoj tehnologije, metode za analizu tranzijentne stabilnosti su kroz istoriju doživjele značajne promjene. Na samom početku razvoja elektroenergetskih sistema, za analizu tranzijentne stabilnosti su isključivo korišćene analitičke metode zasnovane na grafičkoj interpretaciji fizičkih procesa, čiji je tipičan predstavnik metod jednakih površina [30]. Povećanjem kompleksnosti elektroenergetskih sistema, primjena grafoanalitičkih metoda je postala gotovo nemoguća. Ipak, one do danas predstavljaju osnov za razumijevanje problema tranzijentne stabilnosti.

Tridesetih godina prošlog vijeka se za analizu tranzijentne stabilnosti počinju koristiti mrežni analizatori [31], koji su na našim prostorima bili u upotrebi i šezdesetih godina [32]. Primjena mrežnih analizatora u analizi tranzijentne stabilnosti podrazumijevala je ručno rješavanje jednačina njihovih rotora sinhronih generatora primjenom metoda korak po korak. Pri tom je mrežni analizator u svakom koraku korišćen za određivanje električne snage sinhronih generatora. Složenost ovog pristupa, čak i za relativno jednostavne elektroenergetske sisteme, je više nego očigledna.

Revolucija u analizi tranzijentne stabilnosti dogodila se razvojem digitalnih računara, koji su omogućili numeričko rješavanje sistema diferencijalno-algebarskih jednačina koji opisuju ponašanje sistema nakon poremećaja. Prvi kompjuterski program za dinamičku simulaciju elektroenergetskih sistema razvijen je 1956. godine [33]. Ubrzo nakon toga, razvijen je veliki broj sličnih i naprednijih programa, za koje se procjenjuje da su troškove i vrijeme potrebno za sprovođenje analiza tranzijentne stabilnosti smanjili do 20 i 500 puta, respektivno [34]. Numeričko rješavanje

sistema diferencijalno-algebarskih jednačina do danas predstavlja glavni pristup u analizi tranzijentne stabilnosti elektroenergetskih sistema i u nastavku će biti detaljno obrađen.

Prije prelaska na metode numeričke integracije, važno je naglasiti da značajno mjesto u literaturi zauzimaju direktne metode za analizu tranzijentne stabilnosti [35, 36, 37]. Direktne metode se, u najvećoj mjeri, temelje na primjeni teoreme stabilnosti Ljapunova. Osnovna ideja je da se ponašanje elektroenergetskog sistema opiše funkcijom Ljapunova $V(x)$, koja najčešće predstavlja ukupnu kinetičku i potencijalnu energiju sistema. Poređenjem vrijednosti funkcije Ljapunova nakon otklanjanja kvara sa njenom kritičnom vrijednošću V_{cr} , utvrđuje se da li će elektroenergetski sistem ostati stabilan.

Primjena direktnih metoda značajno smanjuje proračunsku složenost u odnosu na metode numeričke integracije, što ih čini posebno pogodnim za dinamičke analize sigurnosti i analize tranzijentne stabilnosti u realnom vremenu. Ipak, šira primjena direktnih metoda je suočena sa dva ključna problema: izborom odgovarajuće funkcije Ljapunova i njene kritične vrijednosti. U literaturi su dostupne različite formulacije funkcije Ljapunova, koje najčešće rezultiraju konzervativnom procjenom margina tranzijentne stabilnosti. Iz tog razloga, direktne metode nijesu našle široku primjenu, iako ova oblast i dalje predstavlja predmet intenzivnih istraživanja.

2.2.1 Formulacija dinamičkog modela

Posmatrajući modele svih elemenata elektroenergetskog sistema, kao i model mreže, jasno je da se elektroenergetski sistem može opisati sistemom diferencijalno-algebarskih jednačina oblika:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}}{dt} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}), & \mathbf{x}(t_0) &= \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{0} &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}), & \mathbf{y}(t_0) &= \mathbf{y}_0 \end{aligned} \quad (2.121)$$

U prethodnim jednačinama, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ predstavlja vektor promjenljivih stanja, $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^m$ vektor algebarskih promjenljivih, $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^p$ vektor ulaznih promjenljivih, a $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^n$ i $\mathbf{g} \in \mathbb{R}^m$ nelinearne vektorske funkcije diferencijalnih i algebarskih jednačina, respektivno. Uz to, \mathbf{x}_0 i \mathbf{y}_0 su početne vrijednosti promjenljivih stanja i algebarskih promjenljivih u trenutku t_0 .

U opštem slučaju, sistem diferencijalno-algebarskih jednačina (2.121) nema rješenje u zatvorenoj formi. Umjesto toga, rješenje na intervalu $t \in [t_0, t_f]$ određuje se primjenom metoda numeričke integracije koje aproksimiraju $\mathbf{x}(t)$ i $\mathbf{y}(t)$ u diskretnim

tačkama:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(t_0), \mathbf{x}(t_1), \dots, \mathbf{x}(t_f) \\ \mathbf{y}(t_0), \mathbf{y}(t_1), \dots, \mathbf{y}(t_f) \end{aligned} \tag{2.122}$$

Nakon određivanja vremenskih promjena promjenljivih stanja i algebarskih promjenljivih nakon poremećaja, stabilnost sistema se može utvrditi i vizuelnim putem.

2.2.2 Pregled metoda numeričke integracije

U literaturi je dostupan veliki broj različitih metoda numeričke integracije. U zavisnosti od načina tretiranja algebarskih jednačina, razlikuju se dva glavna pristupa: sekvencijalni i simultani [9, 10, 23]. Kao i uvijek, oba pristupa imaju svoje prednosti i mane.

Sekvencijalni (eng. *partitioned*) pristup podrazumijeva sekvencijalno ažuriranje promjenljivih stanja \mathbf{x} i algebarskih promjenljivih \mathbf{y} u svakom koraku. U n -tom koraku, prvo se ažuriraju vrijednosti promjenljivih stanja x_{n+1} , dok se algebarske promjenljive smatraju zamrznutim na vrijednostima iz prethodnog koraka y_n . Nakon proračuna promjenljivih stanja, njihove nove vrijednosti koriste se za ažuriranje algebarskih promjenljivih y_{n+1} , dok se promjenljive stanja smatraju zamrznutim. Jasno je da se na ovaj način unosi kašnjenje između promjenljivih stanja i algebarskih promjenljivih. Kako bi se eliminisalo kašnjenje, ova procedura se iterativno ponavlja do konvergencije u svakom koraku.

Iako se za ažuriranje promjenljivih stanja može koristiti bilo koji metod integracije, obično se uz sekvencijalni pristup koriste eksplicitne metode, jer ne zahtijevaju formiranje i inverziju matrice Jakobijana $\mathbf{f}'_{\mathbf{x}}$. Prema tome, proračunska složenost ovog pristupa u najvećoj mjeri zavisi od formiranja i inverzije matrice Jakobijana $\mathbf{g}'_{\mathbf{y}}$ dimenzija $m \times m$, koja je neophodna za ažuriranje algebarskih promjenljivih.

Za razliku od sekvencijalnog, simultani pristup se najčešće koristi zajedno sa implicitnim metodama integracije. Kod simultanog pristupa se promjenljive stanja \mathbf{x} i algebarske promjenljive \mathbf{y} ažuriraju istovremeno u svakom koraku. Ažuriranje promjenljivih stanja i algebarskih promjenljivih zahtijeva rješavanje sistema nelinearnih algebarskih jednačina. Prema tome, simultani pristup sa implicitnim metodama integracije u svakom koraku zahtijeva formiranje i inverziju matrice Jakobijana dimenzija $(n + m) \times (n + m)$.

S obzirom na očiglednu razliku u dimenzijama matrice Jakobijana, jasno je da sekvencijalni pristup karakteriše značajno manja proračunska složenost od simultanog. Ipak, iako je sekvencijalni pristup godinama bio glavni izbor za numeričku integraciju, njegova primjena u savremenim industrijskim softverima je sve rjeđa zbog rizika od numeričke nestabilnosti.

Naime, vremenske konstante različitih procesa u elektroenergetskom sistemu variraju u širokom opsegu. Iz tog razloga, sistem diferencijalno-algebarskih jednačina koji opisuje elektroenergetski sistem pripada klasi krutih (eng. *stiff*) sistema. Za rješavanje krutih sistema diferencijalno-algebarskih jednačina pogodne su isključivo metode koje imaju svojstvo apsolutne stabilnosti (*A*-stabilnosti). Dok implicitne metode integracije jesu, iz Dalkvistove teoreme slijedi da eksplicitne metode integracije ne mogu biti *A*-stabilne [38]. Iz ovog razloga se implicitne metode integracije sve više koriste u komercijalnim i nekomercijalnim softverima za analizu elektroenergetskih sistema. Od implicitnih metoda integracije, najveću primjenu našao je implicitni trapezni metod koji će biti detaljnije obrađen u nastavku.

2.2.3 Implicitni trapezni metod

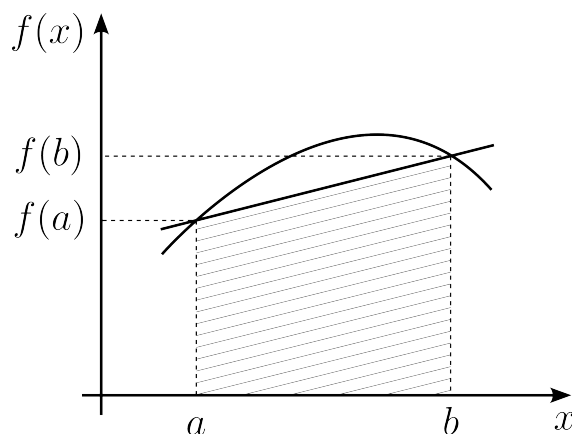
Implicitni trapezni metod je zasnovan na trapeznom pravilu koje je ilustrovano na Slici 2.18. Osnovna ideja trapeznog pravila je da se funkcija $f(x)$ na proizvoljnom intervalu $[a, b]$ aproksimira pomoću duži od tačke $(a, f(a))$ do $(b, f(b))$. Određeni integral funkcije $f(x)$ na intervalu $[a, b]$ se tada može aproksimirati primjenom jednačine [39]:

$$\int_a^b f(x)dx = \frac{b-a}{2} [g(a) + g(b)] \quad (2.123)$$

Za maksimalnu grešku aproksimacije integrala primjenom trapeznog pravila važi:

$$|E| \leq \frac{(b-a)^3}{12} \max_{a \leq \xi \leq b} |f''(\xi)| \quad (2.124)$$

gdje je $f''(\xi)$ vrijednost drugog izvoda funkcije $f(x)$ za $x = \xi$. Očigledno, što je interval $[a, b]$ kraći, to je greška aproksimacije trapeznog pravila manja.



Slika 2.18: Ilustracija trapeznog pravila

U skladu sa izloženim, integral diferencijalnih jednačina elektroenergetskog sistema $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$ od t_n do t_{n+1} :

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \int_{t_n}^{t_{n+1}} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) dt \quad (2.125)$$

se primjenom trapeznog pravila može aproksimirati kao:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n, \mathbf{u}_n) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}, \mathbf{u}_{n+1})] \quad (2.126)$$

odnosno, nakon reformulacije:

$$\mathbf{0} = \mathbf{x}_{n+1} - \mathbf{x}_n - \frac{\Delta t}{2} [\mathbf{f}(\mathbf{x}_n, \mathbf{y}_n, \mathbf{u}_n) + \mathbf{f}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}, \mathbf{u}_{n+1})] \quad (2.127)$$

Pri tom, algebarske jednačine moraju biti zadovoljene:

$$\mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}, \mathbf{u}_{n+1}) \quad (2.128)$$

Kao što se uočava, primjenom trapeznog pravila su diferencijalne jednačine sistema transformisane u implicitne algebarske jednačine koje se u svakom koraku rješavaju zajedno sa algebarskim jednačinama sistema. Kombinovani sistem algebarskih jednačina (2.127) i (2.128) se može zapisati u obliku:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}, \mathbf{u}_{n+1}) &= \mathbf{0} \\ \mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}, \mathbf{y}_{n+1}, \mathbf{u}_{n+1}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2.129)$$

i najčešće se rješava primjenom Newton-Raphsonovog metoda.

Linearizovana jednačina sistema u k -toj iteraciji Newton-Raphsonovog metoda ima oblik:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x}_{n+1}^{(k)} \\ \Delta \mathbf{y}_{n+1}^{(k)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{F}(\mathbf{x}_{n+1}^{(k)}, \mathbf{y}_{n+1}^{(k)}, \mathbf{u}_{n+1}) \\ \mathbf{G}(\mathbf{x}_{n+1}^{(k)}, \mathbf{y}_{n+1}^{(k)}, \mathbf{u}_{n+1}) \end{bmatrix} \quad (2.130)$$

gdje je matrica Jakobijana \mathbf{J} definisana kao:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{y}} \\ \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{x}} & \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_n - \frac{\Delta t}{2} \mathbf{f}'_x & -\frac{\Delta t}{2} \mathbf{f}'_y \\ \mathbf{g}'_x & \mathbf{g}'_y \end{bmatrix} \quad (2.131)$$

Rješavanjem sistema jednačina (2.130), određuju se korekcije promjenljivih stanja $\Delta \mathbf{x}_{n+1}^{(k)}$ i algebarskih promjenljivih $\Delta \mathbf{y}_{n+1}^{(k)}$ koje se koriste za njihovo ažuriranje

primjenom jednačina:

$$\mathbf{x}_{n+1}^{(k+1)} = \mathbf{x}_{n+1}^{(k)} + \Delta \mathbf{x}_{n+1}^{(k)} \quad (2.132)$$

$$\mathbf{y}_{n+1}^{(k+1)} = \mathbf{y}_{n+1}^{(k)} + \Delta \mathbf{y}_{n+1}^{(k)} \quad (2.133)$$

Iteracije Newton-Raphsonovog metoda se sprovode do konvergencije koja se najčešće provjerava u odnosu na normu vektora odstupanja $[\mathbf{F}, \mathbf{G}]^T$. Nakon konvergencije, ista procedura se ponavlja za sljedeći korak integracije.

2.3 Analiza statičke stabilnosti

Statička stabilnost predstavlja sposobnost elektroenergetskog sistema da ostane u sinhronizmu nakon malih poremećaja, kao što su spore i spontane promjene potrošnje i proizvodnje. Sve analize statičke stabilnosti se sprovode na linearizovanom modelu elektroenergetskog sistema. Ovo je moguće zahvaljujući dokazu Anrija Poenkarea, prema kojem je nelinearni sistem stabilan u stacionarnoj tački ako je njegova linearizovana forma stabilna u istoj stacionarnoj tački. U tom kontekstu, malim poremećajima smatraju se oni poremećaji koji omogućavaju linearizaciju modela elektroenergetskog sistema bez značajnih grešaka.

Elektroenergetski sistem može biti statički nestabilan zbog nedostatka sinhronizacionog ili prigušnog momenta. Nedostatak sinhronizacionog momenta se manifestuje postepenim povećavanjem ugla rotora sinhronih generatora nakon poremećaja. Sa druge strane, nedostatak prigušnog momenta manifestuje se oscilacijama ugla rotora rastuće amplitude.

Na početku razvoja elektroenergetskih sistema, nedostatak sinhronizacionog momenta je predstavljao jedan od ključnih problema, koji je u najvećoj mjeri prevaziđen primjenom pobudnih sistema sa brzim odzivom. Međutim, primjena ovakvih pobudnih sistema je negativno uticala na prigušenje oscilacija, pa su incidenti izazvani oscilatornom nestabilnošću bili sve češći. Iako je ovaj problem djelimično prevaziđen razvojem i širokom primjenom stabilizatora elektroenergetskog sistema, problemi statičke nestabilnosti u savremenim elektroenergetskim sistemima su i dalje najčešće posljedica nedostatka prigušnog momenta.

Najveće istorijske promjene u analizi statičke stabilnosti mogu se uočiti na polju modelovanja elektroenergetskog sistema. U prvim fazama razvoja elektroenergetskog sistema, sinhroni generatori su predstavljani jednostavnim modelima, uz konstantan pobudni napon i mehaničku snagu na osovini rotora. Kako su incidenti izazvani nedostatkom sinhronizacionog ili prigušnog postajali učestaliji, u analizama statičke stabilnosti se počeo razmatrati uticaj pobudnih sistema. Na kraju, od pojave digi-

talnih računara, modeli elemenata elektroenergetskog sistema postaju sve detaljniji zbog smanjenih ograničenja u pogledu radne memorije i procesorske snage računskog sredstva.

Za razliku od metoda za analizu tranzijentne stabilnosti, metode za analizu statičke stabilnosti se kroz istoriju nijesu značajno mijenjale, što je posljedica njihove utemeljenosti u opštoj teoriji linearnih sistema. Uz razliku u detaljnosti modelovanja elektroenergetskog sistema, iste metode za analizu statičke stabilnosti se koriste i danas. Osnove matematičkog aparata potrebnog za analize statičke stabilnosti predstavljene su u nastavku.

2.3.1 Formulacija dinamičkog modela

U prethodnom poglavlju je dinamički model elektroenergetskog sistema opisan sistemom diferencijalno-algebarskih jednačina oblika:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{0} &= \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})\end{aligned}\tag{2.134}$$

Prethodni sistem se može linearizovati u okolini stacionarne tačke $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0)$ kao:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{y} + \mathbf{C}\Delta\mathbf{u} \\ \mathbf{0} &= \mathbf{D}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{E}\Delta\mathbf{y} + \mathbf{F}\Delta\mathbf{u}\end{aligned}\tag{2.135}$$

Kako je matrica \mathbf{E} u opštem slučaju invertibilna, iz druge jednačine je moguće izraziti promjene algebarskih promjenljivih kao:

$$\Delta\mathbf{y} = -\mathbf{E}^{-1}\mathbf{D}\Delta\mathbf{x} - \mathbf{E}^{-1}\mathbf{F}\Delta\mathbf{u}\tag{2.136}$$

Zamjenom ovog izraza u linearizovanu formu sistema diferencijalnih jednačina, dolazi se do redukovanog modela sistema:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_S\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}_S\Delta\mathbf{u}\tag{2.137}$$

gdje su matrice \mathbf{A}_S i \mathbf{B}_S date izrazima:

$$\begin{aligned}\mathbf{A}_S &= \mathbf{A} - \mathbf{E}^{-1}\mathbf{D}, \\ \mathbf{B}_S &= \mathbf{C} - \mathbf{E}^{-1}\mathbf{F}\end{aligned}\tag{2.138}$$

Kao što se uočava, na ovaj način se iz dinamičkog modela sistema u potpunosti eliminišu algebarske promjenljive.

Prethodnu proceduru je moguće sprovesti u opštem slučaju, pa se u analizama statičke stabilnosti dinamički model elektroenergetskog sistema najčešće koristi u obliku:

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta \mathbf{u} \\ \Delta \mathbf{y} &= \mathbf{C}\Delta \mathbf{x} + \mathbf{D}\Delta \mathbf{u}\end{aligned}\tag{2.139}$$

gdje je:

- $\Delta \mathbf{x}$ - vektor promjenljivih stanja dimenzija $n \times 1$,
- $\Delta \mathbf{u}$ - vektor ulaznih promjenljivih dimenzija $m \times 1$,
- $\Delta \mathbf{y}$ - vektor izlaznih promjenljivih dimenzija $p \times 1$,
- \mathbf{A} - matrica stanja dimenzija $n \times n$,
- \mathbf{B} - matrica ulaza dimenzija $n \times m$,
- \mathbf{C} - matrica izlaza dimenzija $p \times n$,
- \mathbf{D} - matrica direktnog prenosa (eng. *feedforward*) dimenzija $p \times m$.

Kao što se uočava, vektori \mathbf{x} i \mathbf{u} zadržavaju svoja dosadašnja značenja. Sa druge strane, vektor \mathbf{y} u novom modelu predstavlja vektor izlaznih promjenljivih i može uključivati kako promjenljive stanja, tako i algebarske promjenljive. Važno je naglasiti da matrice \mathbf{A} i \mathbf{B} odgovaraju matricama \mathbf{A}_S i \mathbf{B}_S iz redukovanog modela sistema opisanog jednačinom (2.137). Sa druge strane, matrice \mathbf{C} i \mathbf{D} opisuju zavisnost izlaznih promjenljivih od promjenljivih stanja i ulaznih promjenljivih, respektivno.

2.3.2 Svojstvene vrijednosti i svojstveni vektori

Svojstvene vrijednosti matrice predstavljaju vrijednosti skalarnog parametra λ za koje postoje netrivialna rješenja jednačine:

$$\mathbf{A}\phi = \lambda\phi\tag{2.140}$$

gdje je \mathbf{A} matrica sistema dimenzija $n \times n$, a ϕ vektor dimenzija $n \times 1$. Ako se prethodna jednačina zapiše u obliku:

$$(\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}_n)\phi = 0\tag{2.141}$$

netrivialno rješenje se ima za:

$$|\mathbf{A} - \lambda\mathbf{I}_n| = 0\tag{2.142}$$

Razvojem determinante dolazi se do karakteristične jednačine, čijih n rješenja predstavljaju svojstvene vrijednosti $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ matrice \mathbf{A} .

Za bilo koju svojstvenu vrijednost λ_i , vektor ϕ_i dimenzija $n \times 1$ koji zadovoljava jednačinu:

$$\mathbf{A}\phi_i = \lambda_i\phi_i \quad (2.143)$$

naziva se desnim svojstvenim vektorom matrice \mathbf{A} .

Slično, za bilo koju svojstvenu vrijednost λ_i , vektor ψ_i dimenzija $1 \times n$ koji zadovoljava jednačinu:

$$\psi_i\mathbf{A} = \lambda_i\psi_i \quad (2.144)$$

naziva se lijevim svojstvenim vektorom matrice \mathbf{A} .

Lijevi i desni svojstveni vektori koji odgovaraju različitim svojstvenim vrijednostima su ortogonalni, odnosno važi:

$$\psi_j\phi_i = 0 \quad (2.145)$$

Sa druge strane, za svojstvene vektore koji odgovaraju istoj svojstvenoj vrijednosti važi:

$$\psi_i\phi_i \neq 0 \quad (2.146)$$

Svojstveni vektori se najčešće normalizuju tako da važi:

$$\psi_i\phi_i = 1 \quad (2.147)$$

Ovo je moguće zahvaljujući činjenici da je jednačina (2.141) homogena.

Lijevi i desni svojstveni vektori se najčešće grupišu u matrice:

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_n] \quad (2.148)$$

$$\Psi = [\psi_1^T, \psi_2^T, \dots, \psi_n^T]^T \quad (2.149)$$

koje predstavljaju matrice desnih i lijevih svojstvenih vektora, respektivno. Slično, matrica svojstvenih vrijednosti se može definisati kao dijagonalna matrica:

$$\Lambda = \mathbf{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n) \quad (2.150)$$

Matrice Φ , Ψ i Λ se zajedničkim imenom nazivaju modalnim matricama. Polazna jednačina (2.140) se, u funkciji modalnih matrica, može zapisati u obliku:

$$\mathbf{A}\Phi = \Phi\Lambda \quad (2.151)$$

odakle slijedi:

$$\mathbf{\Lambda} = \mathbf{\Phi}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{\Phi} \quad (2.152)$$

što će biti korišćeno u nastavku za raspredanje jednačina stanja.

2.3.3 Svojstvene vrijednosti i stabilnost

Polazeći od jednačine (2.139), homogeni odziv sistema se određuje na osnovu jednačine:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x} \quad (2.153)$$

Problem sa prethodnim sistemom jednačina je međusobna povezanost promjenljivih stanja. Drugim riječima, brzina promjene određene promjenljive stanja je linearna kombinacija svih ostalih promjenljivih stanja, tako da je teško identifikovati parametre koji imaju dominantan uticaj na odziv sistema.

Međusobnu povezanost promjenljivih stanja je moguće eliminisati uvođenjem smjene:

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{\Phi} \mathbf{z} \quad (2.154)$$

gdje je $\mathbf{\Phi}$ prethodno definisana matrica desnih svojstvenih vektora. Zamjenom prethodnog izraza u jednačinu (2.153), dolazi se do jednačine:

$$\mathbf{\Phi} \dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A} \mathbf{\Phi} \mathbf{z} \quad (2.155)$$

koja, nakon množenja sa $\mathbf{\Phi}^{-1}$, dobija oblik:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{\Phi}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{\Phi} \mathbf{z} \quad (2.156)$$

Imajući u vidu jednačinu (2.152), jednačina stanja sistema dobija oblik:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{\Lambda} \mathbf{z} \quad (2.157)$$

S obzirom da je matrica $\mathbf{\Lambda}$ dijagonalna matrica, uvođenjem smjene opisane jednačinom (2.154), spregnuti sistem diferencijalnih jednačina stanja se raspreže na n nezavisnih diferencijalnih jednačina oblika:

$$\dot{z}_i = \lambda_i z_i \quad (2.158)$$

čije je rješenje dato izrazom:

$$z_i(t) = z_{i0} e^{\lambda_i t} \quad (2.159)$$

gdje je z_{i0} početna vrijednost $z_i(t)$ koja je, u skladu sa jednačinom (2.154), sa početnim vrijednostima promjenljivih stanja $\Delta \mathbf{x}_0$ povezana izrazom:

$$z_{i0} = \boldsymbol{\psi}_i \Delta \mathbf{x}_0 \quad (2.160)$$

Zamjenom izraza za $z_i(t)$ u jednačinu (2.154), vremenske promjene promjenljivih stanja se mogu zapisati kao:

$$\Delta \mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\phi}_i z_{i0} e^{\lambda_i t} \quad (2.161)$$

što ukazuje da homogeni odziv sistema predstavlja linearnu kombinaciju n dinamičkih modova koji odgovaraju svojstvenim vrijednostima matrice stanja.

Kako je vremenski odziv moda koji odgovara svojstvenoj vrijednosti λ_i opisan izrazom $e^{\lambda_i t}$, stabilnost sistema direktno zavisi od svojstvenih vrijednosti matrice stanja. Svojstvene vrijednosti mogu biti realne i kompleksne.

Realne svojstvene vrijednosti odgovaraju neoscilatornim modovima. Dok negativna realna vrijednost odgovara modu čija amplituda opada s vremenom, pozitivna realna vrijednost odgovara modu čija amplituda s vremenom raste. Što je apsolutna vrijednost λ_i veća, to amplituda neoscilatornog moda brže opada ili raste.

Kompleksne svojstvene vrijednosti se javljaju u konjugovanim parovima, pri čemu svaki par odgovara jednom oscilatornom modu. Za konjugovano-kompleksan par svojstvenih vrijednosti:

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (2.162)$$

prigušenje oscilacija zavisi od realnog dijela σ , dok učestanost oscilacija zavisi od imaginarnog dijela ω . Prigušenje moda se najčešće kvantifikuje faktorom prigušenja:

$$\xi = -\frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}} \quad (2.163)$$

dok je učestanost oscilacija data izrazom:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.164)$$

Elektroenergetski sistem je statički stabilan ako se sve svojstvene vrijednosti nalaze u lijevoj poluravni. Dodatno, oscilacije su dobro prigušene ako sve oscilatorne modove karakterišu vrijednosti faktora prigušenja veće od 0,1.

2.3.4 Faktori učešća

Posmatrajući veze između originalnog i transformisanog vektora stanja:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{x}(t) &= \mathbf{\Phi} \mathbf{z}(t) \\ \mathbf{z}(t) &= \mathbf{\Psi} \Delta \mathbf{x}(t)\end{aligned}\tag{2.165}$$

može se utvrditi značenje desnih i lijevih svojstvenih vektora imajući u vidu da je transformisani vektor stanja $\mathbf{z}(t)$ direktno povezan sa oscilatornim i neoscilatornim modovima.

Prva jednačina ukazuje da desni svojstveni vektor $\boldsymbol{\psi}_i$ kvantifikuje relativnu aktivnost promjenljivih stanja pri pobuđivanju moda i . Na primjer, stepen relativne aktivnosti promjenljive stanja x_k pri pobuđivanju moda i određen je vrijednošću ϕ_{ki} desnog svojstvenog vektora $\boldsymbol{\phi}_i$. Drugim riječima, desni svojstveni vektor daje oblik moda. Osim relativne aktivnosti pojedinačnih promjenljivih stanja, oblik moda ukazuje i na fazni pomjeraj promjenljivih stanja u odnosu na mod. Oblik moda je veoma koristan u elektroenergetskim sistemima, jer se na osnovu njega mogu identifikovati grupe sinhronih generatora koji osciluju jedni u odnosu na druge.

Na osnovu druge jednačine, jasno je da lijevi svojstveni vektor $\boldsymbol{\psi}_i$ identifikuje kombinaciju promjenljivih stanja koja učestvuje u modu i . Na primjer, doprinos aktivnosti promjenljive stanja x_k oscilatornom ili neoscilatornom modu i određen je vrijednošću ψ_{ik} .

Iako svojstveni vektori sadrže korisne informacije o vezama između promjenljivih stanja i modova, problem sa njihovom primjenom je njihova zavisnost od skaliranja promjenljivih stanja. Ovaj problem se rješava korišćenjem faktora učešća koji predstavljaju kombinaciju desnih i lijevih svojstvenih vektora. Konkretno, učešće promjenljive stanja x_k u i -tom oscilatornom modu se može kvantifikovati faktorom učešća:

$$p_{ki} = \phi_{ki} \psi_{ik}\tag{2.166}$$

koji je bezdimenziona veličina. S obzirom na normalizaciju svojstvenih vektora, zbir faktora učešća svih promjenljivih stanja u i -tom modu je jednak jedinici:

$$\sum_{k=1}^n p_{ki} = 1\tag{2.167}$$

2.3.5 Funkcija prenosa i rezidumi

Analiza statičke stabilnosti elektroenergetskog sistema se najčešće sprovodi u prostoru stanja. Ipak, za dizajn kontrolera je češće od interesa poznavanje funkcije

prenosa između određenih promjenljivih. Do funkcije prenosa se dolazi polazeći od linearizovanog dinamičkog modela opisanog jednačinama (2.139).

Nakon primjene Laplasove transformacije, jednačine linearizovanog dinamičkog modela sistema imaju oblik:

$$s\Delta\mathbf{x}(s) - \Delta\mathbf{x}_0 = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x}(s) + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(s) \quad (2.168)$$

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{C}\Delta\mathbf{x}(s) + \mathbf{D}\Delta\mathbf{u}(s) \quad (2.169)$$

Uz zanemarivanje početnih uslova u jednačini (2.168), promjenljive stanja se mogu izraziti kao:

$$\Delta\mathbf{x}(s) = (s\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}\Delta\mathbf{u}(s) \quad (2.170)$$

Zamjenom prethodnog izraza u jednačinu (2.169), dolazi se do direktne veze između ulaznih i izlaznih promjenljivih:

$$\Delta\mathbf{y}(s) = [\mathbf{C}(s\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D}] \Delta\mathbf{u}(s) \quad (2.171)$$

na osnovu čega je matrica funkcija prenosa $\mathbf{G}(s)$ data izrazom:

$$\mathbf{G}(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} + \mathbf{D} \quad (2.172)$$

Funkcija prenosa između izlazne promjenljive i i ulazne promjenljive j se tada određuje kao:

$$G_{ij}(s) = \mathbf{C}_i (s\mathbf{I}_n - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B}_j + D_{ij} \quad (2.173)$$

gdje \mathbf{C}_i i \mathbf{B}_j predstavljaju i -ti red matrice izlaza i j -tu kolonu matrice ulaza, respektivno, a D_{ij} predstavlja element matrice direktnog prenosa na poziciji (i, j) .

Polovi funkcije prenosa $G_{ij}(s)$ predstavljaju svojstvene vrijednosti matrice sistema, pa se funkcija prenosa može razložiti na proste činioce kao:

$$G_{ij}(s) = \sum_{k=1}^n \frac{R_{ij}^k}{s - \lambda_k} \quad (2.174)$$

gdje R_{ij}^k predstavlja reziduum funkcije prenosa koji odgovara k -tom modu. Reziduum funkcije prenosa je opisan relacijom:

$$R_{ij}^k = \mathbf{C}_i \phi_k \psi_k \mathbf{B}_j \quad (2.175)$$

gdje ϕ_k i ψ_k predstavljaju desni i lijevi svojstveni vektor koji odgovara k -tom modu, respektivno.

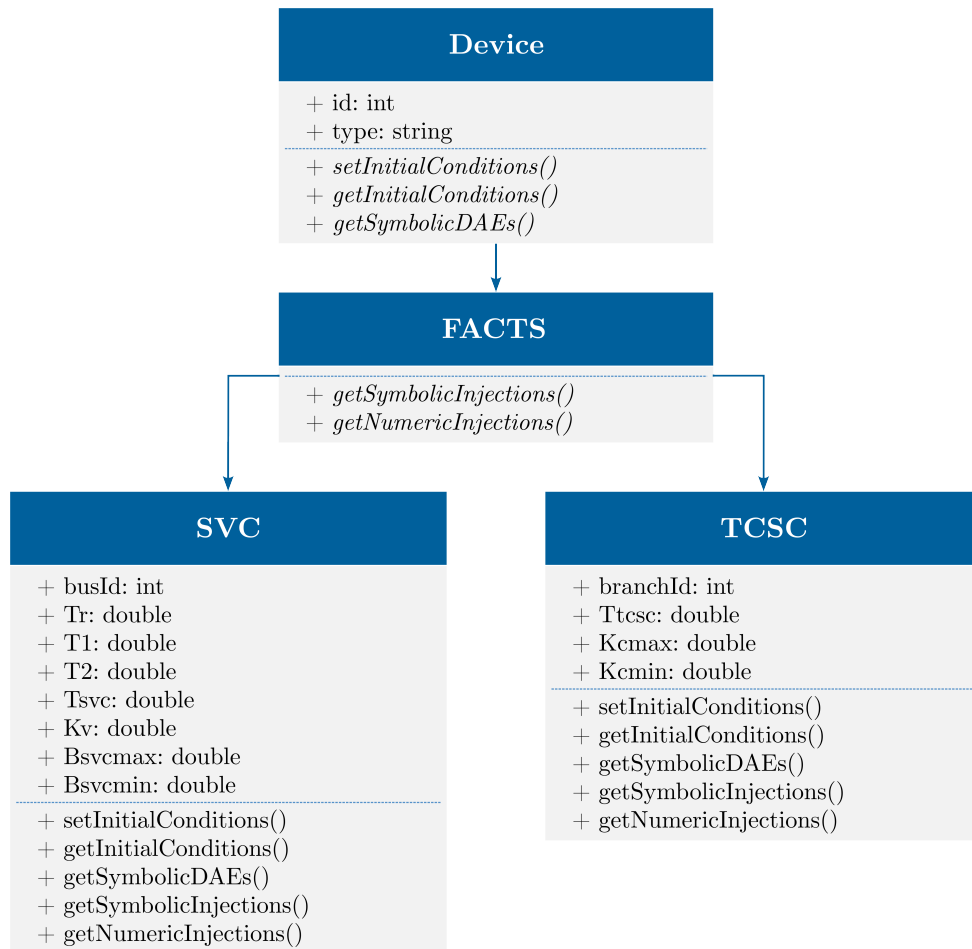
2.4 Osnove implementacije softverskog alata za analizu elektroenergetskih sistema

Razvoj softverskog alata za analizu elektroenergetskih sistema predstavlja izuzetno složen proces. Ovo je, prije svega, posljedica velikog broja elemenata i složenih interakcija između njih, kao i kompleksnosti samih metoda za analizu statičke i tranzijentne stabilnosti. U tom kontekstu, razvojna paradigma je u više navrata mijenjana kako bi razvijeni alat zadovoljio sve zahtjeve ovog i budućih istraživanja u oblasti ugaone stabilnosti elektroenergetskih sistema. U nastavku su predstavljene, prema mišljenju autora, najbolje prakse koje mogu poslužiti kao smjernice svima koji se odluče na sličan poduhvat.

Softverski alat za analizu elektroenergetskih sistema inicijalno je razvijan u programskom jeziku Python. Iako su performanse alata na elektroenergetskim sistemima manjih dimenzija bile zadovoljavajuće, proračunska složenost i vrijeme izvršavanja predstavljali su ograničavajući faktor za primjenu na elektroenergetskim sistemima većih dimenzija. Ovaj problem je riješen prelaskom na programski jezik MATLAB, koji je optimizovan za matrične operacije, karakteristične za gotovo sve analize elektroenergetskih sistema. U skladu sa ovim, primjeri koda u nastavku dati su u programskom jeziku MATLAB. Ipak, važno je istaći da loša skalabilnost alata razvijenog u Pythonu nije bila posljedica nedostataka programskog jezika, već neiskustva autora u korišćenju specijalizovanih proračunskih biblioteka. Dugo nakon razvoja softverskog alata u MATLAB-u, komparabilne ili čak bolje performanse postignute su razvojem alata u Pythonu, uz korišćenje `scipy.sparse` biblioteke za rad sa rijetkim matricama, kao i `numba` biblioteke, koja omogućava konverziju Python koda u mašinski kod.

2.4.1 Objektno orijentisano programiranje

U većini MATLAB alata za analizu elektroenergetskih sistema, kao što su MATPOWER i Power System Toolbox, matrice predstavljaju osnovnu strukturu koja se koristi za skladištenje, organizovanje i obradu podataka [40, 41]. Iako se na ovaj način u potpunosti koristi efikasnost matričnih operacija koja je karakteristična za MATLAB, ovakav pristup pati od loše skalabilnosti i u velikoj mjeri utiče na čitljivost koda i mogućnost dodavanja novih elemenata. Iz tog razloga je, prilikom razvoja alata za analizu elektroenergetskih sistema u ovom istraživanju, usvojen objektno orijentisani pristup. Prednosti ovakvog pristupa će biti objašnjene kroz osnovne principe objektno orijentisanog programiranja na primjeru klasnog dijagrama prikazanog na Slici 2.19.



Slika 2.19: Primjer klasnog dijagrama

Osnovni principi objektno orijentisanog programiranja su enkapsulacija, apstrakcija, naslijeđivanje i polimorfizam. Enkapsulacija predstavlja grupisanje podataka i metoda koje njima manipulišu u jedinstvene cjeline, odnosno klase. Uz to, enkapsulacijom se u potpunosti izoluju interni podaci i metode klase od spoljašnjeg koda. Na primjeru klasnog dijagrama na Slici 2.19, SVC i TCSC uređaji su predstavljeni posebnim klasama sa nezavisnim skupom atributa i metoda. Kako su SVC i TCSC klase u potpunosti izolovane, to se mogu nezavisno mijenjati ili prilagođavati prema specifičnim potrebama. Tokom razvoja softverskog alata, svi elementi elektroenergetskog sistema su predstavljeni nezavisnim klasama, čime je postignuta modularna i skalabilna struktura. Ovakav pristup omogućava bolju čitljivost koda i pojednostavljuje modifikaciju postojećih i dodavanje novih elemenata, bez značajnog uticaja na ostatak programskog koda.

Apstrakcija podrazumijeva sakrivanje složenosti implementacije, čime se korisnicima omogućava rad sa objektima klase, bez potrebe za poznavanjem detalja implementacije. Na primjer, SVC i TCSC klase sadrže metodu `setInitialConditions()`,

koja se koristi za inicijalizaciju njihovih dinamičkih modela. Nakon proračuna tokova snaga, pozivanjem metode `setInitialConditions()` korisnik može inicijalizovati dinamički model SVC ili TCSC uređaja, bez poznavanja procedure inicijalizacije opisane u potpoglavlju 2.1.6.

Naslijeđivanje omogućava da izvedene klase SVC i TCSC preuzmu atribute i metode klase FACTS, koja preuzima atribute i metode osnovne klase Device, iz koje su izvedene klase svih ostalih elemenata elektroenergetskog sistema. Ovaj pristup smanjuje dupliranje koda, jer zajedničke funkcionalnosti mogu biti implementirane samo jednom u osnovnoj klasi. Iako u slučaju SVC i TCSC klasa prednosti naslijeđivanja nijesu očigledne, one dolaze do izražaja kod implementacije različitih modela istog elementa koji dijele veliki broj identičnih atributa i metoda.

Na kraju, jedna od najvećih prednosti objektno orijentisanog pristupa je koncept polimorfizma. Polimorfizam predstavlja sposobnost objekata različitih klasa da na isti poziv metoda odgovaraju na različite načine. Ovo omogućava da se objekti izvedenih klasa tretiraju kao objekti osnovne klase. U konkretnom slučaju, Device klasa implementira apstraktnu metodu `getSymbolicDAEs()`, koja definiše diferencijalno-algebarske jednačine uređaja u simboličkoj formi. Izvedene klase SVC i TCSC imaju sopstvene implementacije ove metode, prilagođene dinamičkim modelima uređaja. Isto važi i za sve ostale elemente elektroenergetskog sistema. Ako se žele definisati diferencijalno-algebarske jednačine svih elemenata elektroenergetskog sistema, dovoljno je sakupiti sve elemente u niz i redom primijeniti metodu `getSymbolicDAEs()` na sve članove niza. Zahvaljujući polimorfizmu, izvršno okruženje će automatski pozvati odgovarajuću verziju metode u zavisnosti od klase objekta. Ovakav vid polimorfizma naziva se dinamičkim (eng. *runtime*) polimorfizmom i značajno pojednostavljuje razvoj softvera eliminišući potrebu za eksplicitnom primjenom `if-else` i `switch` uslova.

2.4.2 Kompjuterska algebra

Kompjuterska algebra predstavlja oblast računarskih nauka koja se bavi dizajnom, analizom, razvojem i primjenom algoritama za manipulisanje matematičkim izrazima i sprovođenje simboličkih proračuna [42]. U skladu sa ovom definicijom, softverske aplikacije koje omogućavaju simboličke proračune se nazivaju sistemima kompjuterske algebre.

Osnovne prednosti simboličkih proračuna u odnosu na klasične numeričke proračune su:

1. **Egzaktnost:** Decimalni brojevi se na računarima predstavljaju pomoću zapisa sa pomičnim zarezom (eng. *floating-point precision*). Na primjer, decimal-

na reprezentacija broja $\frac{1}{3}$, zaokružena na četvrtu decimalu, je 0,3333. Zbir $\frac{1}{3} + \frac{1}{3} + \frac{1}{3}$, takođe zaokružen na četvrtu decimalu, je tada 0,9999. U simboličkim proračunima se ovaj zbir određuje direktnim manipulacijama nad razlomcima, čime se dolazi do egzaktno vrijednosti 1. Iako je greška od 0,0001 u većini primjena zanemarljiva, u složenim proračunima karakterističnim za analizu elektroenergetskih sistema se greške zaokruživanja mogu akumulirati i rezultirati numeričkom nestabilnošću.

2. **Algebarsko uprošćavanje:** Sistemi kompjuterske algebre omogućavaju uprošćavanje simboličkih izraza, čime se smanjuje proračunska složenost. Na primjer, izraz $\frac{x^2-1}{x-1}$ može se algebarski uprostiti na $x + 1$, čime se u naknadnim numeričkim evaluacijama smanjuje broj matematičkih operacija. Osim toga, simboličkim uprošćavanjem se značajno povećava robusnost proračuna. Na primjer, funkcija koja numerički proračunava izraz $\frac{x^2-1}{x-1}$ bi za $x = 1$ javila grešku zbog dijeljenja sa nulom, dok to nije slučaj kod simboličkih proračuna.
3. **Generalizacija rješenja:** Za razliku od numeričkih proračuna koji daju konkretan numerički rezultat, simbolički proračuni omogućavaju određivanje rješenja u opštem obliku. Na primjer, numeričko rješavanje kvadratne jednačine $ax^2 + bx + c = 0$ daje dvije približne vrijednosti x_1 i x_2 . Sa druge strane, simboličkim proračunima se određuju rješenja u opštem obliku $x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$.
4. **Simbolička diferencijacija i integracija:** U numeričkim proračunima se izvod funkcije $f(x) = x^2$ može približno odrediti primjenom metode konačnih razlika kao $f'_x = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x}$. Sa druge strane, simbolički proračuni omogućavaju precizno određivanje izvoda $f'_x = 2x$. Isti princip važi i za numeričku i simboličku integraciju, gdje simbolički proračuni određuju tačna, analitička rješenja.

Uprkos ovim prednostima, simboličke metode karakterišu visoka proračunska složenost i visoki zahtjevi za memorijom. Iz tog razloga je, prilikom razvoja softverskog alata za analizu stabilnosti, usvojen hibridni simboličko-numerički pristup opisan u nastavku.

Kao što je ranije objašnjeno, rješavanje sistema diferencijalno-algebarskih jednačina primjenom implicitnog trapeznog metoda podrazumijeva rješavanje sistema nelinearnih algebarskih jednačina u svakom koraku integracije. Rješavanje sistema nelinearnih algebarskih jednačina zahtijeva određivanje vrijednosti vektorskih funkcija $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$ i $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$, kao i njihovih Jakobijana \mathbf{f}'_x , \mathbf{f}'_y , \mathbf{g}'_x i \mathbf{g}'_y u svakoj iteraciji. Mada je vrijednosti vektorskih funkcija $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$ i $\mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$ moguće odrediti

numerički, čisto numeričko određivanje matrica Jakobijana zahtijeva određivanje i direktno programiranje njihovih analitičkih formi. Iskustvo autora ove disertacije ukazuje da ovaj pristup stvara previše prostora za greške koje je veoma teško uočiti. Umjesto toga, tokom razvoja softverskog alata za analizu stabilnosti je usvojen simbolički pristup koji je konceptualno prikazan u Isječku koda 2.1.

Funkcija `setSymbolicDAEs()` predstavlja metodu klase `System` koja sadrži sve elemente elektroenergetskog sistema i, uz brojne druge metode, metode za sprovođenje proračuna tokova snaga, analizu statičke i tranzijentne stabilnosti. Na samom početku, funkcija formira nizove promjenljivih stanja, algebarskih promjenljivih i ulaznih promjenljivih u simboličkom domenu. Nakon toga, koristeći fleksibilnost koju nude principi naslijeđivanja i polimorfizma, formira nizove `f` i `g`, koji sadrže analitičke izraze diferencijalnih i algebarskih jednačina svih elemenata elektroenergetskog sistema, respektivno. Na kraju, korišćenjem funkcije `jacobian()`, određuju se analitičke forme pojedinačnih matrica Jakobijana. Najveća prednost ovog pristupa je izbjegavanje ručnog određivanja analitičkih formi matrica Jakobijana i njihovo direktno programiranje, čime se smanjuje rizik kako od semantičkih, tako i od sintaksičkih grešaka.

Isječak koda 2.1: Funkcija za formiranje sistema jednačina u simboličkoj formi

```

1 function obj = setSymbolicDAEs(obj)
2
3 % Definisanje simboličkih promjenljivih
4 [obj.x,obj.y,obj.u] = obj.setSymbolicVars() ;
5
6 % Inicijalizacija nizova za skladištenje simboličkih jednačina
7 obj.f = sym([]) ;
8 obj.g = sym([]) ;
9
10 % Sakupljanje simboličkih jednačina svih elemenata
11 for i = 1 : obj.numberofDevices
12     [fTemp,gTemp] = obj.devices(i).getSymbolicDAEs() ;
13     obj.f = [obj.f
14             fTemp] ;
15     obj.g = [obj.g
16             gTemp] ;
17 end
18
19 % Određivanje matrica Jakobijana
20 obj.df_dx = simplify(jacobian(obj.f,obj.x)) ;
21 obj.df_dy = simplify(jacobian(obj.f,obj.y)) ;
22 obj.dg_dx = simplify(jacobian(obj.g,obj.x)) ;
23 obj.dg_dy = simplify(jacobian(obj.g,obj.y)) ;
24
25 end

```

Nakon formiranja simboličkih formi vektorskih funkcija $f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$ i $g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$ i njihovih Jakobijana, numeričke vrijednosti ovih funkcija se mogu odrediti korišćenjem funkcija `subs()` i `eval()`. Na primjer, funkcijom `subs(expression,old,new)` se stare simboličke vrijednosti koje figurišu u izrazu `expression` mijenjaju novim brojnim vrijednostima. Nakon zamjene brojnih vrijednosti, `f` i dalje predstavlja simbolički izraz do čijih se konkretnih numeričkih vrijednosti dolazi primjenom funkcije `eval(f)`.

Iako je u potpunosti korektan, problem ovakvog pristupa za određivanje numeričkih vrijednosti simboličkih izraza je visoka proračunska složenost, koja se povećava sa veličinom elektroenergetskog sistema. Iz tog razloga, nakon određivanja analitičkih izraza za vektorske funkcije $f(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$ i $g(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{u})$ i njihove Jakobijane, najbolje je izvršiti prelazak iz simboličkog u numerički domen. Ovo je omogućeno funkcijom `symbolicToNumeric()` čija je konceptualna implementacija predstavljena u Isječku koda 2.2.

Kao i funkcija `setSymbolicDAEs()`, funkcija `symbolicToNumeric()` predstavlja metodu klase `System`. Na samom početku, funkcija formira jedinstveni vektor simboličkih promjenljivih, koji uključuje promjenljive stanja, algebarske promjenljive i ulazne promjenljive. Nakon toga, simbolički zapisi vektorskih funkcija i njihovih Jakobijana se konvertuju u numeričke funkcije korišćenjem ugrađene funkcije `matlabFunction()`. Nakon konverzije, numeričke funkcije se koriste na isti način kao i standardne funkcije. Na primjer, za elektroenergetski sistem u stacionarnom sta-

Isječak koda 2.2: Funkcija za konverziju simboličkih izraza u numeričke funkcije

```

1 function obj = symbolicToNumeric(obj)
2
3 % Formiranje jedinstvenog vektora simboličkih promjenljivih
4
5 vars = [obj.x ; obj.y ; obj.u] ;
6
7 % Konverzija simboličkih vektorskih funkcija u numeričke funkcije
8
9 obj.f = matlabFunction(obj.f, 'Vars', vars) ;
10 obj.g = matlabFunction(obj.g, 'Vars', vars) ;
11
12 % Konverzija simboličkih Jakobijana u numeričke funkcije
13
14 obj.df_dx = matlabFunction(obj.df_dx, 'Vars', vars, 'Sparse', true) ;
15 obj.df_dy = matlabFunction(obj.df_dy, 'Vars', vars, 'Sparse', true) ;
16 obj.dg_dx = matlabFunction(obj.dg_dx, 'Vars', vars, 'Sparse', true) ;
17 obj.dg_dy = matlabFunction(obj.dg_dy, 'Vars', vars, 'Sparse', true) ;
18
19 end

```

nju sa početnim uslovima $(\mathbf{x}_0, \mathbf{y}_0, \mathbf{u}_0)$, rezultat poziva funkcije $f([x_0 ; y_0 ; u_0])$ je nula vektor dimenzija broja promjenljivih stanja. Uz to, važno je uočiti da je, prilikom formiranja numeričkih funkcija za matrice Jakobijana, parametar `Sparse` postavljen na vrijednost `true`. Ovo je posljedica činjenice da matrice Jakobijana pripadaju klasi rijetkih matrica, o čemu će više riječi biti u nastavku.

Na kraju, važno je istaći da se isti simboličko-numerički pristup može iskoristiti u analizama statičke stabilnosti. Dok se linearizacija modela elektroenergetskog sistema sprovodi primjenom funkcije `jacobian()`, primjenom `matlabFunction()` funkcije se simbolički izrazi za matrice sistema konvertuju u numeričke funkcije čije se vrijednosti lako određuju za proizvoljne početne uslove.

2.4.3 Tehnike rijetkih matrica

Rijetke (eng. *sparse*) matrice su matrice čija je većina elemenata jednaka nuli. Nasuprot tome, matrice sa većinom nenultih elemenata nazivaju se gustim (eng. *dense*) matricama. Važno je naglasiti da ne postoji striktna matematička granica koja određuje tačan odnos nultih i nenultih elemenata na osnovu kojeg bi se matrica mogla jednoznačno klasifikovati kao rijetka ili gusta.

Standardne strukture i algoritmi za matricne operacije se pokazuju izuzetno sporim i neefikasnim kada se primijene na rijetke matrice velikih dimenzija. Iz tog razloga, posebne tehnike su razvijene za efikasno skladištenje, obradu i manipulisanje rijetkim matricama. Na primjer, jedan od najčešće korišćenih formata za skladištenje rijetkih matrica je CSR (eng. *Compressed Sparse Row*) format, koji skladišti samo nenulte vrijednosti i njihove indekse po vrstama. Dok se za množenje gustih matrica i vektora najčešće koristi klasični direktan metod, za množenje rijetkih matrica i vektora koristi se specijalizovani algoritam SpMV (eng. *Sparse Matrix-Vector Multiplication*). Takođe, klasični algoritam LU dekompozicije je modifikovan za rijetke matrice kako bi se spriječila pojava nenultih elemenata koji ne postoje u originalnoj matrici.

Većina matrica koje se koriste u analizi elektroenergetskih sistema pripada klasi rijetkih matrica, pa se primjenom specijalizovanih tehnika mogu značajno ubrzati proračuni i smanjiti zahtjevi za memorijom. Detaljna razrada tehnika rijetkih matrica prevazilazi okvire ove disertacije. Umjesto toga, u nastavku su prednosti njihovog korišćenja predstavljene na konkretnom primjeru, dok se zainteresovani čitalac upućuje na jednu od fundamentalnih knjiga u oblasti rijetkih matrica [43].

Jedna od matrica čije je formiranje neophodno u gotovo svim analizama elektroenergetskog sistema je matrica admitansi nezavisnih čvorova, odnosno matrica \mathbf{Y}_B . Matrica \mathbf{Y}_B je kvadratna matrica dimenzija $n \times n$, gdje je n broj nezavisnih čvo-

Tabela 2.9: Poređenje performansi i memorijskih zahtjeva gustih i rijetkih matrica

Parametar	Gusta struktura	Rijetka struktura
Veličina matrice u memoriji [GB]	7,4695	0,0020
Vrijeme transponovanja matrice [s]	1,0397	0,0021
Vrijeme inverzije matrice [s]	61,0786	0,0361
Vrijeme vektorskog množenja [s]	0,1850	0,0003

rova u elektroenergetskom sistemu. Model elektroenergetskog sistema kontinentalne Evrope ima 22.389 čvorova. Nakon formiranja matrice $\mathbf{Y}_{\mathbf{B}}$, uočava se da nenulti elementi čine svega 0,016% ukupnog broja elemenata. Kako bi se ispitale prednosti korišćenja tehnika rijetkih matrica, matrica $\mathbf{Y}_{\mathbf{B}}$ je formirana u standardnoj gustoći i rijetkoj strukturi. Nakon toga, analizirani su sljedeći parametri:

- Količina radne memorije koju matrice zauzimaju,
- Vrijeme potrebno za transponovanje matrice $\mathbf{Y}_{\mathbf{B}}$,
- Vrijeme potrebno za inverziju matrice $\mathbf{Y}_{\mathbf{B}}$ i
- Vrijeme potrebno za množenje matrice $\mathbf{Y}_{\mathbf{B}}$ vektorom dimenzija $n \times 1$.

Numerički rezultati predstavljeni su u Tabeli 2.9.

Kao što se uočava, prelaskom sa guste na rijetku strukturu se zahtjevi za memorijom smanjuju sa inicijalnih 7,47 GB na svega 0,002 GB. Takođe, eliminisanjem nepotrebne obrade nulnih elemenata se značajno ubrzavaju proračuni. Ovo je najizraženije u slučaju inverzije matrice $\mathbf{Y}_{\mathbf{B}}$, gdje je vrijeme potrebno za inverziju smanjeno sa više od jednog minuta na manje od 40 milisekundi.

2.5 Verifikacija razvijenog alata za analizu elektroenergetskih sistema

Kako bi primjena razvijenog softverskog alata bila moguća, neophodna je njegova verifikacija u odnosu na referentni industrijski softver. Kao referentni industrijski softver izabran je Power System Simulator for Engineering (PSS/E), koji kompanija Siemens razvija još od 1976. godine [44]. Verifikacijom su obuhvaćeni proračun toкова snaga, analiza tranzijentne stabilnosti i analiza statičke stabilnosti na testnom elektroenergetskom sistemu.

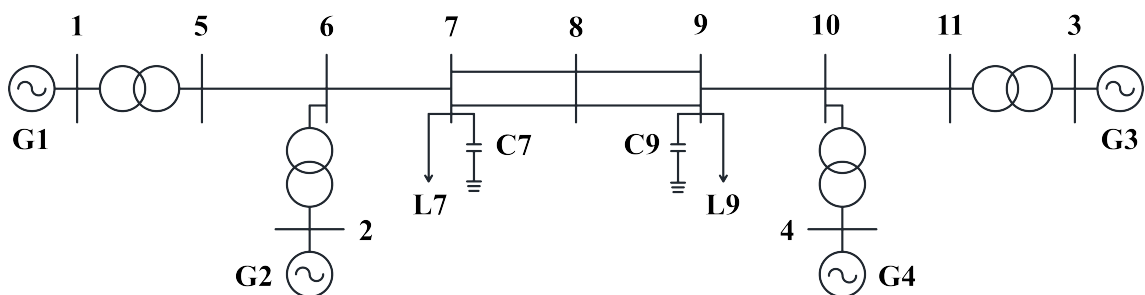
2.5.1 Opis testnog elektroenergetskog sistema

Verifikacija razvijenog softverskog alata za analizu elektroenergetskih sistema je sprovedena na Kundurovom dvozonskom sistemu, koji je jedan od najčešće korišćenih testnih sistema. Jednopolna šema Kundurovog dvozonskog sistema je predstavljena na Slici 2.20, a potpuni podaci o sistemu dostupni su u [45].

Kundurov testni sistem se sastoji od dvije oblasti, koje su međusobno povezane interkonektivnim dalekovodima ukupne dužine 220 km. Obje oblasti sadrže po dva sinhrona generatora naznačenog napona 20 kV i naznačene snage 900 MVA. Sinhroni generatori su povezani na mrežu pomoću transformatora naznačenog prenosnog odnosa 20/230 kV/kV.

U radnom režimu koji se najčešće razmatra, ukupan konzum u sistemu iznosi oko 2.700 MW, od čega oko 35% pripada potrošaču L7, a 65% potrošaču L9. Konzum se snabdijeva približno jednako iz obje oblasti, tako da u posmatranom scenariju oko 400 MW aktivne snage teče interkonektivnim dalekovodima ka drugoj oblasti. U cilju poboljšanja naponskih prilika, baterije kondenzatora snage 200 i 350 MVAR priključene su na sabirnice 7 i 8, respektivno.

Za potrebe analiza statičke i tranzijentne stabilnosti, sinhroni generatori su predstavljeni modelom šestog reda sa eksponencijalnom funkcijom zasićenja. Svi generatori su opremljeni statičkim pobudnim sistemima sa visokom vrijednošću tranzijentnog pojačanja. Pobudni sistemi su predstavljeni ST1A modelom sa zanemarenom stabilizacionom povratnom spregom. Svi generatori su opremljeni stabilizatorima elektroenergetskog sistema na bazi brzine obrtanja rotora. Slijedeći ustaljenu istraživačku praksu u oblasti ugaone stabilnosti, uticaj turbine i turbinskog regulatora je zanemaren.



Slika 2.20: Jednopolna šema Kundurovog dvozonskog sistema

2.5.2 Poređenje rezultata proračuna tokova snaga

Svim analizama statičke i tranzijentne stabilnosti prethodi sprovođenje proračuna tokova snaga. Rješavanjem problema tokova snaga određuju se početne vrijednosti

modula i faznih stavova napona, kao i aktivne i reaktivne snage svih generatora, koje se naknadno koriste za inicijalizaciju dinamičkih modela svih elemenata.

Iako u literaturi postoji veliki broj različitih metoda za proračun tokova snaga, u razvijenom alatu za analizu elektroenergetskih sistema je implementiran Newton-Raphsonov metod, koji karakteriše brza i pouzdana konvergencija za sisteme različitih dimenzija. Rezultati proračuna tokova snaga za Kundurov dvozonski sistem primjenom razvijenog i referentnog softvera predstavljani su u Tabelama 2.10 i 2.11.

Kao što se uočava, maksimalne apsolutne greške u proračunu modula i faznih stavova napona iznose 0,0001 r.j. i $0,05^\circ$, respektivno. Sa druge strane, greške u proračunu aktivne i reaktivne snage generatora su manje od 0,15%. Greške u proračunu su zanemarljive za sve praktične primjene i posljedica su isključivo računarske preciznosti. Iz tog razloga, može se zaključiti da su rezultati proračuna tokova snaga razvijenog i referentnog softvera ekvivalentni.

Tabela 2.10: Poređenje fazora napona u čvorovima sistema

Čvor	Moduo napona [r.j.]		Fazni stav napona [°]	
	Razvijeni alat	PSS/E	Razvijeni alat	PSS/E
1	1,0300	1,0300	27,08	27,10
2	1,0100	1,0100	17,31	17,30
3	1,0300	1,0300	0,00	0,00
4	1,0100	1,0100	-10,19	-10,20
5	1,0064	1,0065	20,60	20,60
6	0,9780	0,9781	10,51	10,50
7	0,9609	0,9610	2,10	2,10
8	0,9485	0,9486	-11,77	-11,80
9	0,9713	0,9714	-25,37	-25,40
10	0,9834	0,9835	-16,95	-16,90
11	1,0082	1,0083	-6,64	-6,60

Tabela 2.11: Poređenje aktivnih i reaktivnih snaga generatora

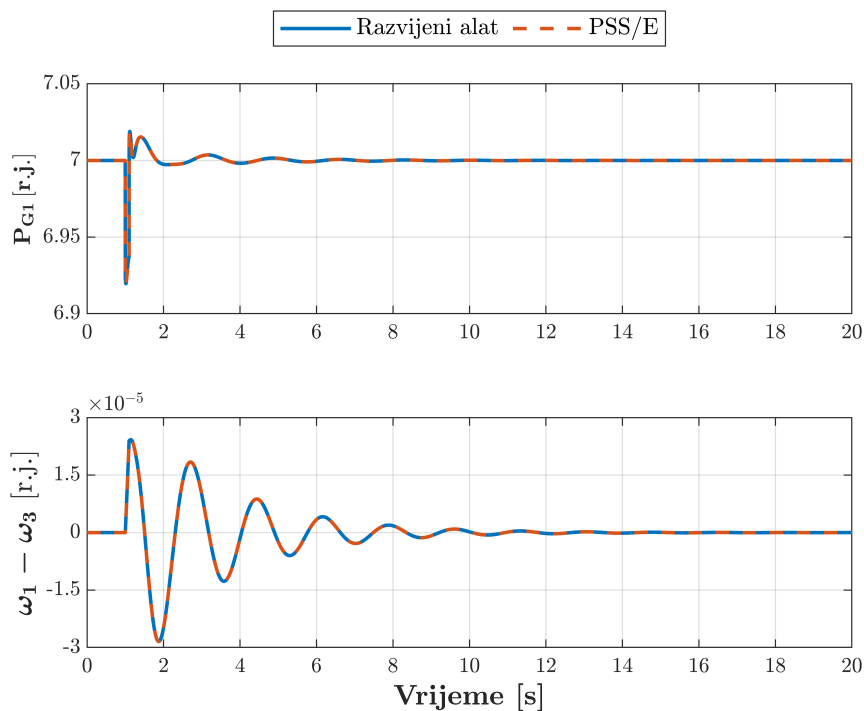
Generator	Aktivna snaga [MW]		Reaktivna snaga [MVar]	
	Razvijeni alat	PSS/E	Razvijeni alat	PSS/E
1	700,00	700,00	185,25	185,01
2	700,00	700,00	234,84	234,59
3	719,11	719,09	176,26	176,00
4	700,00	700,00	202,34	202,05

2.5.3 Poređenje rezultata analize tranzijentne stabilnosti

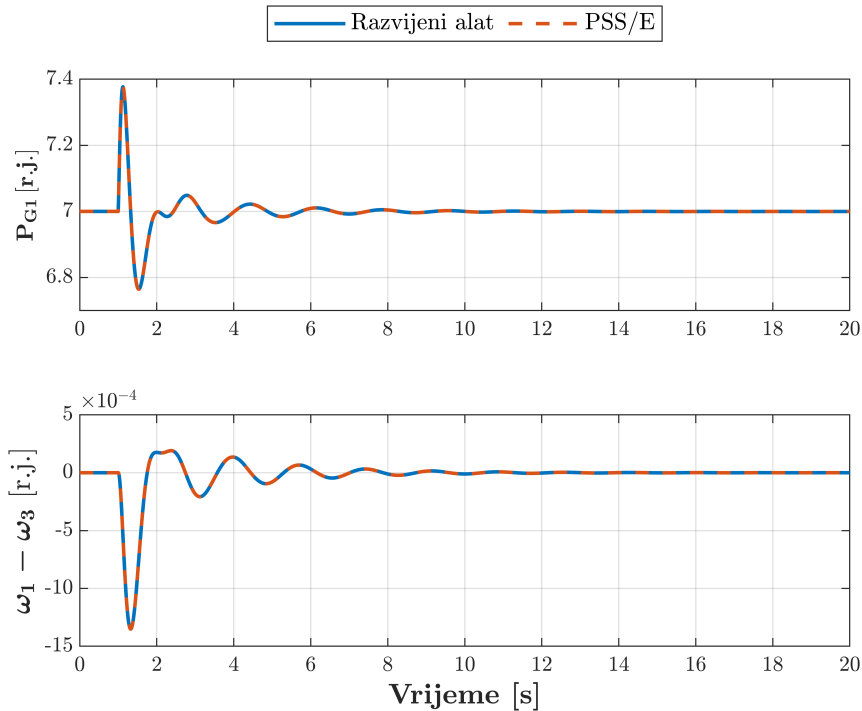
Kako bi se verifikovala tačnost razvijenih metoda za analizu tranzijentne stabilnosti, razmotren je dinamički odgovor testnog elektroenergetskog sistema na dva različita poremećaja:

- Privremeno priključenje šant reaktora naznačene snage 50 MVA_r na sabirnice 8 u trajanju od 100 ms. Kako se sabirnice 8 nalaze na električnoj sredini testnog elektroenergetskog sistema, priključenjem šant reaktora se pobuđuje među-zonski oscilatorni mod.
- Istovremena promjena referentnih vrijednosti napona pobudnih sistema svih generatora, čime se pobuđuju svi elektromehanički modovi u sistemu. Promjene referentnih napona pojedinačnih generatora iznose +3%, -1%, -3% i +1% za generatore 1-4, respektivno.

Odziv sistema na oba poremećaja je prikazan na Slikama 2.21 i 2.22. Odziv je analiziran kroz aktivnu snagu generatora 1 i razliku brzina obrtanja rotora generatora 1 i 3. Kao što se uočava, odziv sistema određen primjenom razvijenog alata je identičan odzivu određenom primjenom softvera PSS/E. Ovim je potvrđena tačnost razvijenih metoda za dinamičku simulaciju elektroenergetskih sistema i dokazana mogućnost njihove primjene u daljem istraživanju.



Slika 2.21: Poređenje odziva sistema u slučaju priključenja reaktora na sabirnice 8



Slika 2.22: Poređenje odziva sistema u slučaju promjene referentnih napona

2.5.4 Poređenje rezultata analize statičke stabilnosti

Na kraju, kako bi se ispitala tačnost razvijenih metoda za analizu statičke stabilnosti, za testni sistem bez stabilizatora elektroenergetskog sistema je sprovedena modalna analiza. Ovaj scenario je izabran kako bi se, uz verifikaciju razvijenog alata, demonstrirao uticaj nedostatka prigušnog momenta na odgovor elektroenergetskog sistema na poremećaje. Svojstvene vrijednosti sistema određene primjenom razvijenog alata i PSS/E softvera predstavljene su u Tabeli 2.12.

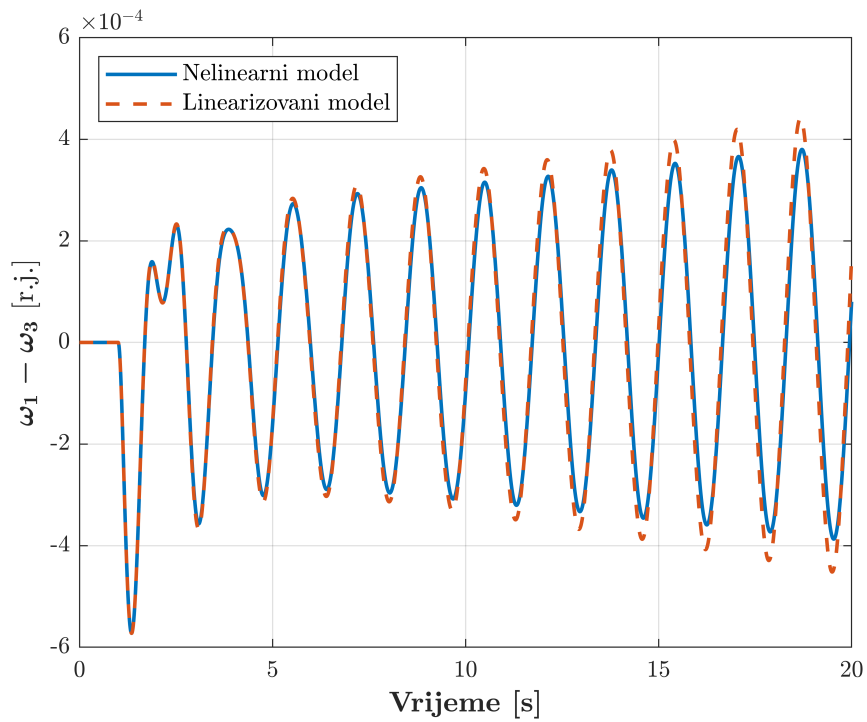
Kao što se uočava, svojstvene vrijednosti sistema određene primjenom razvijenog alata i PSS/E softvera, iako vrlo bliske, nijesu identične. Razlike između svojstvenih vrijednosti su posljedica različitih metoda modalne analize.

U razvijenom alatu, linearizovani model sistema u prostoru stanja se određuje analitičkom linearizacijom nelinearnog modela sistema. Sa druge strane, u PSS/E softveru se linearizovani model sistema određuje numeričkom aproksimacijom na osnovu vremenskih promjena karakterističnih veličina sistema nakon poremećaja. Prema tome, preciznost aproksimiranog modela sistema zavisi od primijenjenog poremećaja. Iz tog razloga, svojstvene vrijednosti određene primjenom PSS/E softvera su u opštem slučaju manje precizne od svojstvenih vrijednosti određenih na osnovu linearizovanog modela sistema određenog analitičkim putem [45]. Drugim riječima, razvijene metode za analizu statičke stabilnosti se mogu smatrati preciznijim od metoda implementiranih u PSS/E softveru.

Tabela 2.12: Poređenje svojstvenih vrijednosti sistema

Redni broj	Razvijeni alat	PSS/E
1	$0,0228613 \pm j3,82258$	$0,00064617 \pm j3,8361$
2	$-0,637213 \pm j7,07206$	$-0,65639 \pm j7,0881$
3	$-0,637894 \pm j7,27137$	$-0,66058 \pm j7,2907$
4	$-19,1418 \pm j16,3743$	$-19,167 \pm j16,532$
5	$-18,0805 \pm j22,1685$	$-18,119 \pm j22,262$
6	-3,3174	-3,2842
7	-3,3395	-3,3135
8	-3,5619	-3,534
9	-3,6198	-3,6304
10	-15,4453	-15,953
11	-16,1914	-16,818
12	-24,9579	-24,357
13	-25,7325	-25,254
14	-30,6954	-30,678
15	-31,6109	-31,617
16	-36,1449	-36,200
17	-36,2364	-36,297
18	-94,4717	-94,467
19	-95,6131	-95,600
20	-97,3851	-97,389
21	-97,4419	-97,447

Preciznost razvijenih metoda za analizu statičke stabilnosti je moguće dokazati i poređenjem odziva nelinearnog i linearizovanog modela sistema za slučaj malih poremećaja. Ako je model elektroenergetskog sistema ispravno linearizovan u okolini početnog rješenja, odzivi nelinearnog i linearizovanog modela sistema pri malim poremećajima su gotovo identični. Ovo je ispitano simuliranjem odziva nelinearnog i linearizovanog modela sistema na step promjenu referentnih vrijednosti napona pobudnih sistema generatora 1 i 3 u iznosu od +1% i -1%, respektivno. Kao što se uočava sa Slike 2.23, odzivi nelinearnog i linearizovanog modela sistema su na početku prelaznog procesa praktično identični. Ipak, kako vrijeme simulacije odmiče, greška linearizovanog modela raste. Ovo je očekivano s obzirom da posmatrani sistem ima nestabilan među-zonski oscilatorni mod kojem odgovara svojstvena vrijednost $\lambda = 0,0228613 \pm j3,82258$. Kako amplituda oscilacija u sistemu raste, to se radna tačka sistema sve više odaljava od početne radne tačke u čijoj je okolini



Slika 2.23: Poređenje odziva nelinearnog i linearizovanog modela sistema

linearizovan model sistema. I pored toga, greška linearizovanog modela je zanemarljiva u vremenskom intervalu koji je od interesa za analize ugaone stabilnosti, čime je dodatno dokazana preciznost razvijenih metoda za analizu statičke stabilnosti.

Glava 3

Pregled postojećih pristupa dizajnu sistema za prigušenje oscilacija

Ništa nije pogodnije da proširi vidike kao sposobnost da sistematski i istinito istražujemo sve što zapazimo u životu.

Marko Aurelije, Meditacije, 3:11

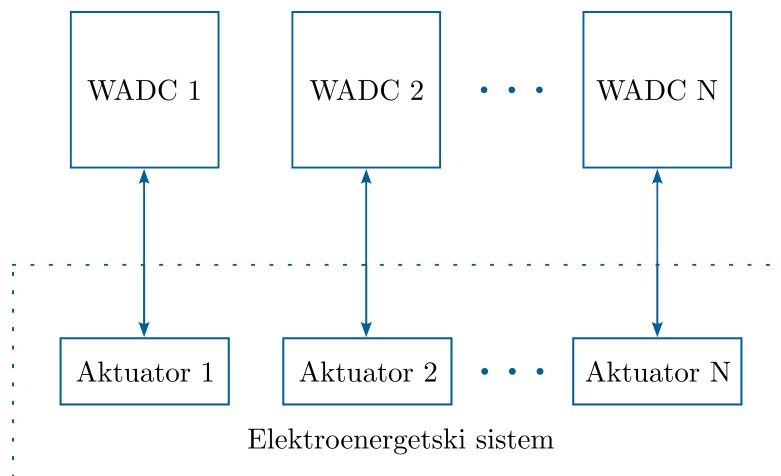
Problem dizajna sistema za prigušenje oscilacija predstavlja izuzetno kompleksan problem koji se, zbog jednostavnije analize, može razložiti na:

- Problem dizajna arhitekture sistema za prigušenje oscilacija,
- Problem izbora upravljačke petlje, odnosno mjernih i upravljačkih signala i
- Problem dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija.

Slijedeći izloženu dekompoziciju problema, u nastavku je predstavljen pregled postojećih pristupa dizajnu sistema za prigušenje oscilacija sa komparativnom analizom njihovih prednosti i mana.

3.1 Pregled arhitektura sistema za prigušenje oscilacija

U zavisnosti od organizacije i stepena autonomije pojedinačnih kontrolera, kao i načina komunikacije između njih, razlikuju se decentralizovane, centralizovane i distribuirane arhitekture sistema za prigušenje oscilacija. Sve tri kategorije se razlikuju u pogledu performansi i složenosti implementacije, pri čemu ne postoji konsenzus po pitanju optimalne arhitekture.

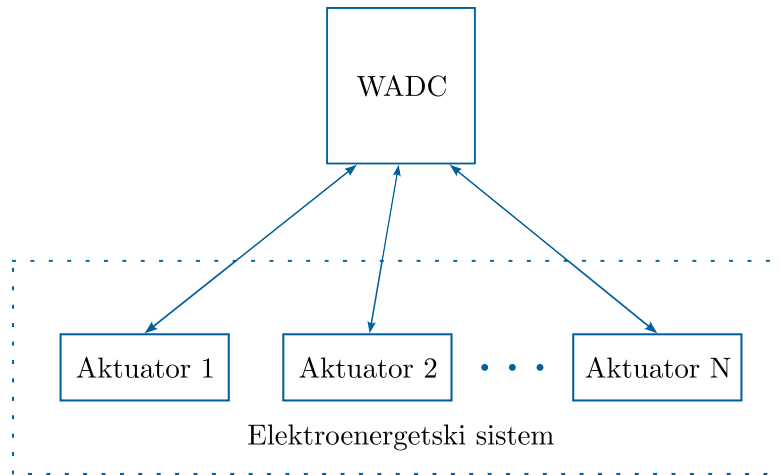


Slika 3.1: Decentralizovana arhitektura sistema za prigušenje oscilacija

Osnovna struktura decentralizovanih sistema za prigušenje oscilacija predstavljena je na Slici 3.1. Kao što se uočava, decentralizovana arhitektura podrazumijeva nezavistan rad više kontrolera, od kojih svaki djeluje na prigušenje oscilacija posredstvom konkretnog aktuatora. Kao aktuatori se u literaturi najčešće koriste sinhroni generatori, solarne i vjetroelektrane, FACTS uređaji i HVDC sistemi.

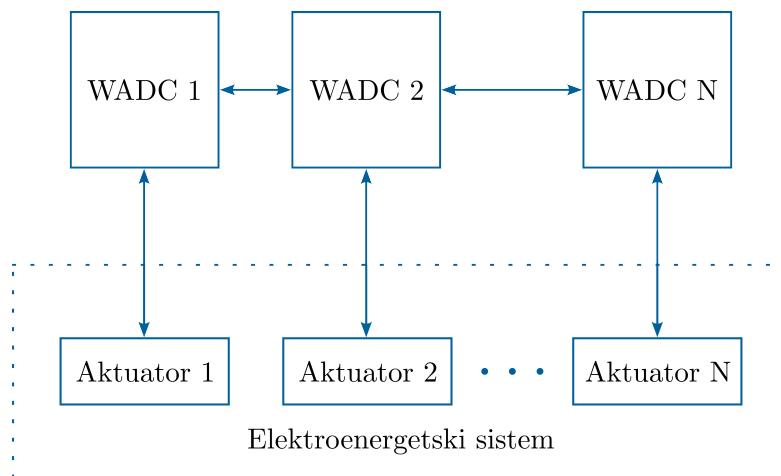
Decentralizovani sistemi za prigušenje oscilacija se mogu podijeliti na sisteme koji koriste lokalna mjerenja ili mjerenja sa udaljenih lokacija. Decentralizovani sistemi na bazi lokalnih mjerenja odgovaraju aktuelnom stanju u realnim elektroenergetskim sistemima. U trenutnoj praksi, stabilizatori elektroenergetskog sistema predstavljaju kontrolere za prigušenje oscilacija koji se oslanjaju na lokalna mjerenja brzine obrtanja rotora ili snage na sabirnicama generatora. Veliki broj istraživačkih radova je posvećen koordinisanom dizajnu stabilizatora elektroenergetskog sistema s ciljem prigušenja među-zonskih oscilacija [46, 47, 48]. Najveći nedostatak ovog pristupa je činjenica da među-zonske oscilacije najčešće nijesu opservabilne u lokalnim mjerenjima, pa ovakvi sistemi neće biti razmatrani u okviru ove disertacije. Iz tog razloga, u nastavku se pod decentralizovanim sistemima podrazumijevaju decentralizovani sistemi koji, zahvaljujući WAMS tehnologiji, koriste mjerenja sa udaljenih lokacija.

Kod centralizovanih sistema za prigušenje oscilacija, čija je arhitektura prikazana na Slici 3.2, centralni kontroler prikuplja informacije iz različitih dijelova sistema, obrađuje ih i definiše upravljačke akcije koje se prenose do aktuatora. Po pravilu, centralizovane sisteme za prigušenje oscilacija karakterišu superiornije performanse u odnosu na decentralizovane. Ipak, kako centralizovani sistemi zahtijevaju prenos velike količine podataka, kašnjenje ili gubitak signala rezultira značajnom degradacijom njihovih performansi. Iz tog razloga se teži povećati njihova robusnost na komunikacione probleme tokom samog dizajna [49, 50].



Slika 3.2: Centralizovana arhitektura sistema za prigušenje oscilacija

Distribuirani sistemi za prigušenje oscilacija predstavljaju kompromis između centralizovanih i decentralizovanih sistema. Kao što se uočava sa Slike 3.3, kod distribuiranih sistema je omogućena komunikacija između susjednih kontrolera bez posredstva centralizovane jedinice koja sprovodi zakon upravljanja. I pored brojnih prednosti, poput visoke tolerancije na otkaz jednog ili više kontrolera i komunikacionih kanala, visoke skalabilnosti i adaptivnosti na promjene radnih uslova u elektroenergetskom sistemu, distribuirani sistemi za prigušenje oscilacija su najmanje zastupljeni u literaturi. Glavni razlozi za ovo su kompleksni zakoni upravljanja i izražen uticaj varijabilnog komunikacionog kašnjenja na koordinisan rad kontrolera i aktuatora koji se nalaze na velikim udaljenostima. Jedna od rijetkih analiza distribuiranih sistema za prigušenje oscilacija predstavljena je u [51], gdje je pokazano da su distribuirani sistemi inferiorni u odnosu na centralizovane sisteme s aspekta performansi.



Slika 3.3: Distribuirana arhitektura sistema za prigušenje oscilacija

Pored decentralizovanih, centralizovanih i distribuiranih sistema, u [52] se navodi i posebna kategorija hijerarhijskih sistema za prigušenje oscilacija. Ipak, tradicionalna hijerarhijska struktura upravljačkog sistema, kakva se koristi kod sistema automatske regulacije proizvodnje, nije zastupljena u literaturi. Umjesto toga, pod hijerarhijskim sistemima se obično podrazumijevaju decentralizovani, centralizovani ili distribuirani sistemi, kod kojih klasični stabilizatori elektroenergetskog sistema predstavljaju osnovni upravljački nivo. Tipičan primjer su sistemi predstavljeni u [53] i [54], gdje se rad pobudnih sistema odabranih generatora moduliše kako pomoću lokalnog stabilizatora, tako i pomoću centralnog kontrolera za prigušenje oscilacija. Kod drugog tipa hijerarhijskih sistema, kakav je sistem predstavljen u [55], jedan centralni kontroler moduliše rad nekoliko aktuatora u elektroenergetskom sistemu. Pri tom, svaki od aktuatora je opremljen i kontrolerom za prigušenje oscilacija na bazi lokalnih mjerenja, koji služi kao redudansa u slučaju otkaza komunikacionog kanala između centralnog kontrolera i aktuatora.

3.2 Pregled metoda za izbor mjernih i upravljačkih signala

Nakon izbora arhitekture, naredni korak u razvoju sistema za prigušenje oscilacija je izbor upravljačke petlje, odnosno izbor mjernih i upravljačkih signala kontrolera za prigušenje oscilacija. Dok mjerni signal treba da obezbijedi zadovoljavajuću opservabilnost, upravljački signal treba da obezbijedi zadovoljavajuću kontrolabilnost kritičnih oscilatornih modova.

Većina metoda za izbor mjernih i upravljačkih signala zasniva se na metodama modalne analize. Jedna od najranijih metoda koja je korišćena u ove svrhe zasniva se na faktorima učešća [56, 57]. Podsjećanja radi, faktori učešća p_{ki} definišu se kao:

$$p_{ki} = \phi_{ki}\psi_{ik} \quad (3.1)$$

gdje su ϕ_{ki} i ψ_{ik} vrijednosti desnog i lijevog svojstvenog vektora koje odgovaraju k -toj promjenljivoj stanja i i -tom oscilatornom modu. Ako je faktor učešća brzine obrtanja rotora sinhronog generatora u oscilatornom modu visok, implementacijom stabilizatora na posmatranom generatoru može se uticati na prigušenje posmatranog moda. Iako vrlo intuitivan, nedostatak ovog pristupa je činjenica da omogućava određivanje samo upravljačkog, ali ne i mjernog signala. Uz to, u [58] je pokazano da ovakav pristup može dovesti do pogrešnih zaključaka u situaciji kada u elektroenergetskom sistemu postoji više lokalnih modova sa sličnom frekvencijom.

Pored faktora učešća, u velikom broju istraživačkih radova su za izbor mjernih i upravljačkih signala korišćene mjere modalne kontrolabilnosti i opservabilnosti [59, 60, 61]. Kontrolabilnost moda k ulaznom promjenljivom j data je izrazom:

$$m_c^{j,k} = \boldsymbol{\psi}_k \mathbf{B}_j \quad (3.2)$$

gdje \mathbf{B}_j predstavlja j -tu kolonu matrice ulaza, a $\boldsymbol{\psi}_k$ lijevi svojstveni vektor koji odgovara k -tom modu. Slično, opservabilnost moda k u izlaznoj promjenljivoj i data je izrazom:

$$m_o^{i,k} = \mathbf{C}_i \boldsymbol{\phi}_k \quad (3.3)$$

gdje \mathbf{C}_i predstavlja i -ti red matrice izlaza, a $\boldsymbol{\phi}_k$ desni svojstveni vektor koji odgovara k -tom modu. Ako je mjera modalne kontrolabilnosti $m_c^{j,k}$ jednaka nuli, tada na mod k nije moguće uticati posredstvom uređaja kojem pripada ulazna promjenljiva j . Slično, ako je mjera modalne opservabilnosti $m_o^{i,k}$ jednaka nuli, mod k nije opservabilan u izlaznom signalu i .

Podsjećanja radi, reziduuum funkcije prenosa $G_{ij}(s)$ koji odgovara oscilatornom modu k opisan je izrazom:

$$R_{ij}^k = \mathbf{C}_i \boldsymbol{\phi}_k \boldsymbol{\psi}_k \mathbf{B}_j \quad (3.4)$$

Kao što se uočava, reziduuum funkcije prenosa predstavlja proizvod mjera modalne kontrolabilnosti i opservabilnosti. Prema tome, kombinacijama mjernog i upravljačkog signala koje obezbjeđuju visoku kontrolabilnost i opservabilnost moda k odgovaraju visoke vrijednosti reziduuma R_{ij}^k . Metoda reziduuma je jedna od najčešće korišćenih metoda za izbor mjernih i upravljačkih signala [62, 63, 64]. Međutim, važno je naglasiti da je, zbog različitog skaliranja pojedinačnih mjernih signala, primjena metode reziduuma moguća samo za poređenje upravljačkih petlji sa istom vrstom mjernog signala [65]. Kako reziduuum predstavlja njihov proizvod, pristup zasnovan na primjeni mjera modalne kontrolabilnosti i opservabilnosti pati od istog nedostatka.

Problem metode reziduuma otklanja metoda zasnovana na primjeni geometrijskih mjera modalne kontrolabilnosti i opservabilnosti predložen u [66]. Kontrolabilnost i opservabilnost moda k , u odnosu na upravljački signal j i mjerni signal i , data je geometrijskim mjerama:

$$m_c^{j,k} = \frac{|\boldsymbol{\psi}_k \mathbf{B}_j|}{\|\boldsymbol{\psi}_k\| \|\mathbf{B}_j\|} \quad (3.5)$$

$$m_o^{i,k} = \frac{|\mathbf{C}_i \boldsymbol{\phi}_k|}{\|\boldsymbol{\phi}_k\| \|\mathbf{C}_i\|} \quad (3.6)$$

U prethodnim izrazima, $|z|$ predstavlja moduo, a $\|z\|$ Euklidsku normu vektora z . Mjere $m_c^{j,k}$ i $m_o^{i,k}$ se nazivaju geometrijskim mjerama kontrolabilnosti i opservabilnosti, jer u suštini predstavljaju kosinus ugla između vektora koji figurišu u njihovim izrazima. Na primjer, geometrijska mjera kontrolabilnosti $m_c^{j,k}$ predstavlja kosinus ugla koji zatvaraju vektori B_j i ψ_k . Prelaskom na ovakvu formulaciju, eliminiše se uticaj skaliranja promjenljivih na mjere modalne kontrolabilnosti i opservabilnosti, čime se omogućava poređenje upravljačkih petlji sa različitim vrstama mjernih signala. Umjesto pojedinačne primjene, najčešće se koristi kombinovana mjera geometrijske kontrolabilnosti i opservabilnosti:

$$m_{co}^{ij,k} = m_c^{j,k} m_o^{i,k} \quad (3.7)$$

Prirodno, upravljačke petlje kojima odgovaraju veće vrijednosti kombinovane mjere geometrijske kontrolabilnosti i opservabilnosti predstavljaju bolje kandidate za prigušenje kritičnih oscilatornih modova. U [67] je pokazano da ovaj metod daje superiornije rezultate u odnosu na metod reziduuma, od kada se isti dominantno koristi za određivanje optimalne upravljačke petlje u brojnim istraživanjima.

Pored ovih, u literaturi je dostupno još nekoliko različitih pristupa koji uključuju primjenu metoda dekompozicije singularnih vrijednosti [53], matrice relativnog pojačanja [68] i hibridnih metoda [69], ali je njihova šira primjena do danas izostala.

3.3 Pregled metoda za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija

Za razliku od problema izbora arhitekture i optimalne upravljačke petlje, za koje postoji nekoliko karakterističnih pristupa, u dostupnoj literaturi se može pronaći mnoštvo različitih metoda za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija. Većina postojećih pristupa može se grubo svrstati u jednu od pet kategorija:

- metoda reziduuma,
- metode optimalnog upravljanja,
- metode robusnog upravljanja,
- optimizacione metode i
- inteligentne metode.

U nastavku su objašnjeni osnovni koncepti dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija primjenom svake od navedenih metoda, uz analizu njihovih prednosti i nedostataka.

3.3.1 Metoda reziduuma

Metoda reziduuma je jedna od najstarijih metoda za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija. Osnovna ideja metode reziduuma je da se fazna karakteristika kontrolera za prigušenje oscilacija podese na osnovu ugla reziduuma tako da se svojstvena vrijednost koja odgovara kritičnom oscilatornom modu pomjeri ka lijevoj poluravnini. Nakon određivanja fazne karakteristike kontrolera, potrebno pojačanje se određuje na osnovu geometrijskog mjesta korijena sistema (eng. *root locus analysis*).

Metoda reziduuma za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija je prvi put predložena u [62]. U ovom radu je predstavljen hijerarhijski sistem za prigušenje oscilacija na dva nivoa, od kojih prvi nivo služi za prigušenje lokalnih, a drugi nivo za prigušenje među-zonskih oscilacija. Predstavljeni rezultati ukazuju da su, nakon ugradnje kontrolera dizajniranih primjenom metode reziduuma, svi oscilatorni modovi adekvatno prigušeni, što se manifestuje i povećanjem prenosnog kapaciteta između različitih oblasti. Isti zaključci važe bez obzira na to da li se na prigušenje oscilacija djeluje posredstvom sinhronih generatora ili SVC uređaja, kao i bez obzira na to da li se kao mjerni signal koristi razlika brzine obrtanja rotora sinhronih generatora ili snaga razmjene između oblasti.

Kašnjenje u prenosu mjernog signala unosi sopstveno pojačanje i fazni pomjeraj u upravljačku petlju, čime se značajno degradiraju performanse kontrolera za prigušenje oscilacija dizajniranih primjenom metode reziduuma. Kako bi se ovaj problem prevazišao, u [70] je predložena primjena *lead-lag* kompenzatora koji na učestanosti kritičnog oscilatornog moda kompenzuje pojačanje i fazno kašnjenje koje su posljedica komunikacionog kašnjenja. Predstavljeni rezultati ukazuju da su performanse sistema za prigušenje oscilacija sa ovako dizajniranim kompenzatorom vremenskog kašnjenja približno jednake performansama sistema za slučaj idealnog mjernog signala. Slični rezultati predstavljeni su u [71], gdje je fazno kašnjenje koje je posljedica komunikacionog kašnjenja uključeno u ugao reziduuma koji se kompenzuje faznom karakteristikom kontrolera za prigušenje oscilacija. Dodatno, u [71] je predložena modifikacija metoda reziduuma koja, korišćenjem negativnog pojačanja, smanjuje broj *lead-lag* blokova koji je potreban za postizanje odgovarajuće fazne karakteristike kontrolera za prigušenje oscilacija.

Umjesto kompenzacije vremenskog kašnjenja, u [72] se pojačanje kontrolera za prigušenje oscilacija određuje na osnovu kompromisa između prigušenja kritičnog oscilatornog moda i preteka kašnjenja sistema. Povećanjem pojačanja kontrolera se poboljšava prigušenje kritičnog oscilatornog moda, ali se istovremeno i smanjuje pretek kašnjenja sistema. Kompromisom između ova dva kontrastna kriterijuma, obezbjeđuje se adekvatno prigušenje oscilacija i dovoljna margina stabilnosti u odno-

su na kašnjenje mjernog signala. Proračun preteka kašnjenja sprovodi se primjenom metoda zasnovanog na linearnim matricnim nejednakostima, koji je ista grupa autora razvila u [73].

Kontroleri za prigušenje oscilacija dizajnirani primjenom metoda reziduuma mogu negativno interagovati sa ostalim oscilatornim modovima u elektroenergetskom sistemu. Kako bi se ovaj problem prevazišao, u [74] je kontroler za prigušenje oscilacija proširen pojasno propusnim (eng. *bandpass*) filtrom. Predstavljeni rezultati ukazuju da se na ovaj način efikasno prigušuje kritični oscilatorni mod, bez negativnih interakcija sa ostalim modovima u sistemu.

Rezultati primjene metoda reziduuma u svim razmatranim istraživanjima dobijeni su u klasičnom simulacionom okruženju. Za razliku od njih, u [75] je primjenom metode reziduuma dizajniran kontroler za prigušenje oscilacija za SVC uređaj, čije su performanse ispitane na ekvivalentu sistema Sjeverne Amerike implementiranom na digitalnom simulatoru u realnom vremenu. Rezultati eksperimenata potvrđuju efikasnost kontrolera dizajniranih primjenom metode reziduuma, koja posebno dolazi do izražaja kod visokog učešća vjetroelektrana u proizvodnom miksu.

3.3.2 Metode optimalnog upravljanja

Optimalno upravljanje predstavlja granu teorije automatskog upravljanja koja se bavi određivanjem zakona upravljanja dinamičkim sistemom tako da se funkcija performansi optimizuje tokom perioda posmatranja. Najčešće korišćene metode optimalnog upravljanja uključuju upravljanje primjenom linearnog kvadratnog regulatora, linearnog kvadratnog Gausovog regulatora, kao i modelsko prediktivno upravljanje.

Linearni kvadratni regulator

Problem optimalnog upravljanja kod kojeg je dinamika sistema opisana skupom linearnih diferencijalnih jednačina, a indeks performansi kvadratnom funkcijom, naziva se linearnim kvadratnim problemom, čije rješenje predstavlja linearni kvadratni regulator (eng. *Linear-Quadratic Regulator*, LQR). Osnovna pretpostavka LQR problema je potpuna opservabilnost svih promjenljivih stanja.

U elektroenergetskim sistemima, kao i u mnogim drugim problemima optimalnog upravljanja, mjerenja svih promjenljivih stanja nijesu dostupna. U literaturi su uočena dva pristupa za rješavanje ovog problema. Prvi pristup podrazumijeva svodenje LQR problema na problem upravljanja sa povratnom spregom po izlazu (eng. *output-feedback control*). U [76] je, prilikom dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija za TCSC uređaj, ovo sprovedeno primjenom metoda projekcije. Slično,

u [77] se LQR koristi za dizajn centralnog kontrolera u hijerarhijskoj arhitekturi sistema za prigušenje oscilacija, pri čemu je LQR problem sveden na problem upravljanja sa povratnom spregom po izlazu uvođenjem strukturnih ograničenja. Drugi, češće zastupljeni pristup, podrazumijeva kombinovanje LQR regulatora sa estimatorom stanja. U [78] i [79] se izvorni LQR koristi u kombinaciji sa estimatorima stanja redukovano modela sistema za koordinisano upravljanje vjetroagregatima s ciljem prigušenja oscilacija. Sličan pristup je predložen u [80], pri čemu se umjesto vjetroagregata za prigušenje oscilacija koriste virtuelni sinhroni generatori.

Linearni kvadratni Gausov regulator

Ako se LQR regulator koristi u kombinaciji sa Kalmanovim filtrom, takva kombinacija se naziva linearnim kvadratnim Gausovim regulatorom (eng. *Linear-Quadratic-Gaussian*, LQG). Za razliku od LQR problema, koji pretpostavlja bešuman sistem, LQG uzima u obzir mjerni šum za koji se pretpostavlja da podliježe normalnoj raspodjeli. Iako izvan okvira ove disertacije, bilo bi zanimljivo ispitati performanse LQG kontrolera u slučaju realnih šumova u elektroenergetskim sistemima, za koje je dokazano da ne slijede normalnu raspodjelu [81].

LQG je jedna od metoda optimalnog upravljanja koja je najčešće korišćena u dizajnu kontrolera za prigušenje oscilacija. U [82] je kontroler za prigušenje oscilacija dizajniran kao LQG regulator koji minimizuje standardni kvadratni indeks performansi u najgorem mogućem slučaju. Ista grupa autora je u [83] predložila novi metod za dizajn LQG kontrolera za prigušenje oscilacija koji garantuje optimalne performanse sistema u različitim operativnim scenarijima. Rezultati oba istraživanja pokazuju da je modulacijom reaktivne snage velikih solarnih elektrana primjenom LQG kontrolera moguće prigušiti kritične oscilatorne modove.

Problem pristupa izloženih u [82] i [83] je što se težinske matrice koje penalizuju odstupanja promjenljivih stanja definišu primjenom metoda pokušaja i greške, što je veoma nepraktično u slučaju realnih sistema. Rješenje za ovaj problem je da se promjenljivim stanja koja učestvuju u oscilatornim modovima koji se žele prigušiti dodijele više vrijednosti težinskih koeficijenata [84]. Mana ovog pristupa je što promjenljive stanja koje učestvuju u kritičnim oscilatornim modovima učestvuju i u drugim modovima, pa LQG regulator može negativno uticati na njih. Ovo se rješava primjenom modalnog LQG regulatora koji je u [85] predložen za modulisanje snage HVDC sistema. Formulacija modalnog LQG regulatora omogućava prigušenje samo kritičnih oscilatornih modova, bez uticaja na ostale modove u sistemu. Performanse modalnog LQG kontrolera za prigušenje oscilacija su detaljno analizirane u [86], gdje je dokazana njegova efikasnost u prigušenju oscilacija u različitim scenarijima.

Modelsko prediktivno upravljanje

Modelsko prediktivno upravljanje (eng. *Model Predictive Control*, MPC) predstavlja metodu optimalnog upravljanja kod koje se indeks performansi dinamičkog sistema optimizuje u konačnom vremenskom intervalu, uz poštovanje skupa ograničenja. Modelsko prediktivno upravljanje koristi model sistema za predviđanje njegovog budućeg stanja. Koristeći predviđeno stanje sistema, kontroler u realnom vremenu rješava optimizacioni problem kojim se određuju optimalne upravljačke akcije koje vode sistem ka željenom stanju.

Jedna od prvih primjena modelskog prediktivnog upravljanja za prigušenje oscilacija predstavljena je u [87]. U radu je metod generalizovanog prediktivnog upravljanja predložen u [88] prilagođen dizajnu samopodešavajućeg (eng. *self-tuning*) kontrolera za upravljanje regulacionim otcjepom baterija kondenzatora. Predstavljeni rezultati ukazuju da su performanse ovakvog sistema komparabilne performansama sistema koji uključuje SVC uređaj sa LQG kontrolerom za prigušenje oscilacija. Sličan pristup je u [89] predložen za dizajn samopodešavajućeg stabilizatora elektroenergetskog sistema.

U [90] i [91] je MPC iskorišćeno za razvoj adaptivnih kontrolera za prigušenje oscilacija za TCSC uređaje. Predloženi metod zasniva se na pretpostavci da se stvarni odziv elektroenergetskog sistema može opisati kombinacijom odziva konačnog broja njegovih linearizovanih modela. Za svaki linearizovani model je unaprijed dizajniran kontroler za prigušenje oscilacija sa povratnom spregom po stanjima. Upravljački signal za TCSC uređaj predstavlja linearnu kombinaciju upravljačkih signala pojedinačnih kontrolera. Pri tom, MPC se koristi za određivanje težinskih koeficijenata pojedinačnih kontrolera na osnovu razlika u odzivu stvarnog sistema i njegovih linearizovanih modela. U slučaju kada se linearizovani model sistema nakon poremećaja nalazi u bazi modela, predloženi sistem rezultira adekvatnim prigušenjem kritičnih oscilatornih modova. Ipak, kada se model sistema nakon poremećaja ne nalazi u bazi modela, dolazi do degradacije performansi sistema. Iz tog razloga je mogućnost primjene predloženog metoda u realnim elektroenergetskim sistemima velikih dimenzija upitna.

U prethodno analiziranim radovima, MPC se koristi za dizajn kontrolera u centralizovanim arhitekturama sistema za prigušenje oscilacija. U [51] je primjena modelskog prediktivnog upravljanja proširena na dizajn centralizovanih, distribuiranih i hijerarhijskih sistema za prigušenje oscilacija. Kod distribuirane arhitekture, svaki MPC kontroler rješava optimizacioni potproblem koristeći detaljni model svoje i približni model ostalih oblasti. Nakon rješavanja optimizacionog potproblema, kontroler šalje upravljačke signale svim uređajima koji se koriste za prigušenje oscilacija

u pripadajućoj oblasti. Svi distribuirani kontroleri koriste isti indeks performansi, čime se implicitno postiže njihova koordinacija. Sa druge strane, kod hijerarhijske arhitekture, MPC kontroleri na najvišem nivou definišu upravljačke signale za MPC kontrolere na nižem nivou. MPC kontroleri na nižem nivou koriguju ove upravljačke signale na bazi lokalnih mjerenja i formiraju upravljačke signale za pojedinačne uređaje koji se koriste za prigušenje oscilacija. Od predloženih pristupa, hijerarhijska arhitektura sistema pokazuje najbolje performanse, posebno s aspekta robusnosti na greške estimacije stanja i komunikaciono kašnjenje.

Brojna istraživanja su dokazala da komunikaciono kašnjenje i gubitak mrežnih paketa mogu degradirati performanse sistema za prigušenje oscilacija. Kao rješenje za komunikacione probleme u MPC sistemima za prigušenje oscilacija, u [92] je predložena primjena umreženog prediktivnog upravljanja (eng. *Networked Predictive Control*, NPC). Uz MPC kontroler, NPC uključuje i kompenzator kašnjenja, koji omogućava kompenzaciju kako konstantnog, tako i varijabilnog komunikacionog kašnjenja. Predloženi sistem za prigušenje oscilacija je pokazao bolje performanse od sistema dizajniranog primjenom modelskog prediktivnog upravljanja.

3.3.3 Metode robusnog upravljanja

Matematički model bilo kog realnog sistema uvijek predstavlja samo aproksimaciju stvarnog sistema. Tipični razlozi za odstupanje između modela i stvarnog sistema su zanemareni visokofrekventni fenomeni, zanemarene nelinearnosti, kao i varijacije parametara sistema zbog ambijentalnih uslova ili starosti opreme. Uz to, realni sistemi su uvijek izloženi različitim poremećajima, kao što su mjerni šumovi, komunikaciona kašnjenja, vibracije, elektromagnetne smetnje i ostali uticaji iz okruženja. Razvojem kontrolera robusnih na opisane nesigurnosti bavi se teorija robusnog upravljanja. Metode robusnog upravljanja koje su najčešće korišćene za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija su H_∞ upravljanje i μ sinteza.

H_∞ upravljanje

H_∞ upravljanje predstavlja generalni okvir za dizajn robusnih kontrolera koji optimizuju performanse sistema u prisustvu poremećaja u najgorem mogućem slučaju. U H_∞ okviru, najvažnije tehnike dizajna kontrolera su H_∞ *mixed-sensitivity* dizajn i H_∞ *loop-shaping*. H_∞ *mixed-sensitivity* dizajn podrazumijeva minimizaciju H_∞ norme kombinacije otežanih funkcija osjetljivosti, koje predstavljaju različite aspekte performansi i robusnosti sistema. Podešavanjem težinskih funkcija može se postići kompromis između performansi sistema s aspekta praćenja referentne trajektorije,

odbijanja poremećaja, prigušenja šuma i angažovanja upravljanja. Sa druge strane, kod H_∞ *loop-shaping* pristupa se prvo oblikuje frekventni odziv sistema u otvorenoj sprezi kako bi se postigle željene performanse, nakon čega se primjenjuje robusna stabilizacija. U dostupnoj literaturi u oblasti prigušenja oscilacija u elektroenergetskim sistemima je prvi pristup dominantno zastupljen.

Jedna od prvih primjena H_∞ *mixed-sensitivity* dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija predstavljena je u [63]. U ovom radu je, primjenom *mixed-sensitivity* metode, dizajniran kontroler za TCSC uređaj koji za prigušenje oscilacija koristi mjerenja sa udaljenih lokacija u elektroenergetskom sistemu. Primjenom iste metode dizajnirani su kontroleri za prigušenje oscilacija za tri FACTS uređaja, koji se oslanjaju na lokalna mjerenja. Predstavljene rezultati ukazuju da oba pristupa postižu slične performanse u pogledu prigušenja oscilacija, što ukazuje na prednost korišćenja mjerenja sa udaljenih lokacija koja obezbjeđuju bolju opservabilnost kritičnih oscilatornih modova. Kako bi se povećala robusnost razvijenih kontrolera na komunikaciono kašnjenje, u [64] je ovaj pristup proširen dodavanjem objedinjenog Smitovog prediktora predloženog u [93]. U predloženom pristupu se H_∞ kontroler dizajnira za generalizovani model sistema koji uključuje Smitov prediktor. Pri tom, ako dizajnirani kontroler obezbjeđuje adekvatne performanse generalizovanog sistema, tada njegova kombinacija sa Smitovim prediktorom garantuje adekvatne performanse osnovnog sistema [94]. U radu je pokazano da, kada vremensko kašnjenje prelazi 100 ms, H_∞ kontroler dizajniran bez uvažavanja kašnjenja degradira performanse sistema. Sa druge strane, H_∞ kontroler zasnovan na objedinjenom Smitovom prediktoru obezbjeđuje adekvatne performanse za opseg vremenskih kašnjenja od ± 250 ms oko vrijednosti kašnjenja korišćene prilikom dizajna.

U [60] i [61], razmotrene su mogućnosti unapređenja robusnosti H_∞ kontrolera na gubitak mjernog signala. U [60] je za ovu namjenu predložena arhitektura sistema za prigušenje oscilacija sa dva nezavisna kontrolera od kojih jedan koristi lokalni mjerni signal, a drugi mjerni signal sa udaljene lokacije. Kontroleri se dizajniraju sekvencijalno, tako da se prvo dizajnira kontroler na bazi lokalnog mjernog signala, a zatim kontroler na bazi mjernog signala sa udaljene lokacije. Pri tom, model sistema koji se koristi za dizajn drugog kontrolera uključuje i kontroler na bazi lokalnog mjernog signala. Sa druge strane, pristup predložen u [61] podrazumijeva korišćenje redundantnih kontrolera za prigušenje oscilacija koji koriste različite mjerne signale. U normalnom pogonu, jedini kontroler koji je uključen je kontroler koji odgovara mjernom signalu sa najvećom opservabilnošću kritičnog oscilatornog moda. U slučaju gubitka ovog mjernog signala, pripadajući kontroler se isključuje, a uključuje se sljedeći prioritetni kontroler. Za detekciju gubitka mjernog signala predložen je

algoritam zasnovan na tehnici matematičke morfologije. Rezultati oba istraživanja ukazuju na efikasnost predloženih metoda za povećanje robusnosti kontrolera za prigušenje oscilacija na gubitak mjernog signala.

Problem H_∞ sinteze počiva na činjenici da dizajnirani kontroleri imaju red koji je veći ili jednak od reda sistema. Osim što je njihova implementacija u praksi izuzetno složena, ovako dizajnirani kontroleri mogu unijeti nove slabo prigušene oscilatorne modove, pa se najčešće sprovodi redukcija reda kontrolera primjenom metoda balansirano odsijecanja (eng. *balanced truncation*) [95]. U [96] je kao potencijalno rješenje za ovaj problem predložena primjena H_∞ sinteze kontrolera fiksnog reda. U radu je ispitana primjena različitih kriterijumskih funkcija dostupnih u HIFOO biblioteci razvijenoj u [97]. Predstavljeni rezultati ukazuju da se minimizacijom H_∞ norme spregnutog sistema postižu najbolji rezultati s aspekta prigušenja oscilacija.

μ sinteza

Za razliku od H_∞ dizajna, μ sinteza eksplicitno tretira strukturirane nesigurnosti, poput varijacija parametara modela. Time omogućava dizajn manje konzervativnih kontrolera u poređenju sa metodama H_∞ dizajna, koje obezbjeđuju robusnost u najgorem mogućem slučaju, ali ne tretiraju direktno strukturirane nesigurnosti.

μ sinteza je značajno manje korišćena za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija od metoda H_∞ dizajna. Jedna od najranijih primjena predstavljena je u [98], gdje je predložen algoritam za sekvencijalni dizajn stabilizatora elektroenergetskog sistema na bazi lokalnih mjerenja. U svakom koraku algoritma, stabilizatori se dizajniraju minimizacijom strukturirane singularne vrijednosti μ kao pokazatelja robusnih H_∞ performansi. Predstavljeni rezultati ukazuju na bolje performanse razvijenih stabilizatora u odnosu klasične. Glavni nedostatak predloženog metoda je što performanse sistema zavise od redosljeda kojim se stabilizatori dizajniraju, pa je često potrebno nekoliko pokretanja algoritma kako bi se odredila optimalna konfiguracija.

U [99] je predložena primjena μ sinteze za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija za SVC uređaje, robusnih na varijacije tokova snaga u elektroenergetskom sistemu. Uz dizajn kontrolera, date su i preporuke za optimalnu alokaciju SVC uređaja s aspekta prigušenja kritičnih oscilatornih modova. Ovaj pristup je u [100] proširen tako da, osim nesigurnosti u tokovima snaga, uzme u obzir i nesigurnost u pogledu nivoa komunikacionog kašnjenja. Performanse ovako dizajniranog kontrolera upoređene su sa performansama H_∞ *mixed-sensitivity* kontrolera. Pri nižim vrijednostima komunikacionog kašnjenja, kontroler dizajniran primjenom μ sinteze karakterišu nešto niže vrijednosti faktora prigušenja kritičnih oscilatornih modova u odnosu na H_∞ kontroler. Međutim, dok povećanje nivoa komunikacionog kašnjenja

rezultira značajnim degradiranjem performansi H_∞ kontrolera, kontroler dizajniran primjenom μ sinteze obezbjeđuje adekvatno prigušenje svih oscilatornih modova čak i pri komunikacionim kašnjenjima od 500 ms.

3.3.4 Optimizacione metode

Problem dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija može se jednostavno formulisati kao optimizacioni problem, čijim se rješavanjem određuju parametri kontrolera koji optimizuju kriterijumsku funkciju kojom su opisane performanse sistema. Zahvaljujući strukturiranom pristupu, koji omogućava jednostavno tretiranje nelinearne dinamike sistema i različitih ograničenja, optimizacione metode predstavljaju najzastupljeniju kategoriju metoda za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija.

U [101] je problem dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija formulisano kao optimizacioni problem koji teži da minimizuje energiju svih oscilatornih modova koja je proporcionalna površini ispod njihovih anvelopa nakon impulsnog poremećaja. Optimizacioni problem takođe uključuje ograničenja u pogledu željenih vrijednosti faktora prigušenja, ograničenja kojima se sprječava velika promjena frekvencije kritičnih oscilatornih modova, kao i ograničenja iz H_∞ teorije upravljanja koja se odnose na robusnost sistema na poremećaje, vremensko kašnjenje mjernog signala i angažovanje upravljanja. Za rješavanje optimizacionog problema je predložena primjena sekvencijalnog kvadratnog programiranja (eng. *Sequential Quadratic Programming*, SQP). Primjena SQP za koordinisan dizajn kontrolera za HVDC sisteme predložena je i u [102], gdje se kao kriterijumska funkcija koristi integral odstupanja aktivnih snaga na karakterističnim dalekovodima nakon poremećaja. Ovakva formulacija optimizacionog problema inicijalno je predložena u [103]. U oba istraživanja, kontroleri su razvijeni i njihove performanse ispitane za dio elektroenergetskog sistema Kine, što predstavlja jednu od rijetkih analiza na realnim sistemima.

U [104] su razmotrene dvije različite formulacije problema dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija za vjetroagregate sa dvostrano napajanim asinhronim generatorima. U prvoj formulaciji, kriterijumska funkcija predstavlja integral apsolutnih vrijednosti razlika brzina obrtanja rotora sinhronih generatora nakon trolejnog kratkog spoja. Pri tom se pretpostavlja da mjerni signali koje koristi kontroler za prigušenje oscilacija ne sadrže mjerni šum i da je komunikaciono kašnjenje zanemarljivo. U drugoj formulaciji, razlike brzina obrtanja rotora sinhronih generatora ponderišu se vremenskim kašnjenjem u prenosu mjernih signala. Pored toga, kriterijumskoj funkciji dodaje se integral varijanse mjernih signala, čime se kvantifikuje uticaj mjernog šuma. Za rješavanje ovako formulisanih optimizacionih problema predložena je Nelder-Mead metoda direktnog pretraživanja. Očekivano, druga formulacija proble-

ma rezultira kontrolerima koji su značajno robusniji na komunikaciono kašnjenje i mjerni šum.

Za razliku od klasičnih metoda optimizacije kao što su sekvencijalno kvadratno programiranje i Nelder-Mead metoda, veću primjenu u literaturi našle su metaheurističke metode optimizacije. U [105] su kontroleri za prigušenje oscilacija za vjetroagregate dizajnirani minimizacijom integrala proizvoda vremena i apsolutne vrijednosti odstupanja aktivne snage vjetroagregata od njegove referentne vrijednosti nakon poremećaja. Optimizacioni problem je riješen primjenom metode optimizacije rojem čestica (eng. *Particle Swarm Optimization*, PSO). Sličan pristup predstavljen je u [106], gdje se PSO koristi za dizajn centralnog kontrolera koji generiše stabilizacione signale za pobudne sisteme sinhronih generatora s ciljem prigušenja oscilacija. Centralni kontroler se dizajnira za generalizovani model sistema formulisan primjenom objedinjenog Smitovog prediktora.

U [107] je problem dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija formulisan kao višekriterijumski optimizacioni problem koji nastoji da poboljša položaj svojstvenih vrijednosti koje odgovaraju kritičnim oscilatornim modovima, minimizuje amplitudu funkcije prenosa stabilizatora pri kritičnim frekvencijama i maksimizuje vremensko kašnjenje mjernog signala pri kojem je sistem stabilan. Višekriterijumski optimizacioni problem je zatim pretvoren u jednokriterijumski uvođenjem težinskih koeficijenata za pojedinačne kriterijumske funkcije. Za rješenje ovako definisanog optimizacionog problema predložena je metoda optimizacije sivim vukovima (eng. *Grey Wolf Optimization*, GWO). Primjena GWO predložena je i u [108] za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija za baterijski sistem za skladištenje električne energije na ostrvu Java. U radu je takođe predstavljena analiza uticaja nivoa penetracije obnovljivih izvora energije na performanse kontrolera. Očekivano, povećanje penetracije obnovljivih izvora energije rezultira smanjenjem faktora prigušenja kritičnih oscilatornih modova. Međutim, isti su adekvatno prigušeni i pri penetraciji od 50% ukupne proizvodnje u sistemu.

Problem dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija je u [109] formulisan u probabilističkom okviru u kojem se nastoji maksimizovati vjerovatnoća da su svi oscilatorni modovi u sistemu adekvatno prigušeni u različitim operativnim scenarijima. Optimizacioni problem je riješen primjenom metode diferencijalne evolucije (eng. *Differential Evolution*, DE), koja je prilagođena tako da se izbjegne dvostruki proračun svojstvenih vrijednosti sistema u svakoj generaciji. Za oba posmatrana sistema u normalnom pogonu, kontroler dizajniran primjenom predložene metode garantuje adekvatno prigušenje svih oscilatornih modova u približno 90% scenarija. U N-1 konfiguracijama, vjerovatnoća adekvatnog prigušenja oscilatornih modova kreće se

između 60 i 80%. Primjena DE predložena je i u [110] za koordinisan dizajn stabilizatora elektroenergetskog sistema i kontrolera za prigušenje oscilacija za statički sinhroni kompenzator (eng. *Static Synchronous Compensator*, STATCOM). Robusnost sistema za prigušenje oscilacija postiže se uključivanjem tri scenarija u kriterijumsku funkciju: baznog scenarija sa svim elementima u pogonu, kritičnog N-1 scenarija i kritičnog N-2 scenarija u pogledu prigušenja oscilatornih modova u sistemu.

3.3.5 Inteligentne metode

U poslednjih nekoliko godina, inteligentne metode se sve češće koriste za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija. Njihova glavna prednost ogleda se u mogućnosti dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija čak i kada je model elektroenergetskog sistema samo djelimično poznat ili potpuno nepoznat. Pored toga, inteligentne metode omogućavaju obradu velikih količina podataka u realnom vremenu, pa je njihova primjena sve češća u različitim aspektima upravljanja elektroenergetskim sistemima.

Jedna od često korišćenih metoda inteligentnog upravljanja je fazi upravljanje (eng. *fuzzy control*) koje se temelji na fazi logici (eng. *fuzzy logic*). Za razliku od klasičnih metoda, koje se zasnivaju na strogim matematičkim principima, fazi upravljanje implementira empirijsko znanje čovjeka u sistem upravljanja koristeći skup pravila i odgovarajućih funkcija pripadnosti. U [111] je dizajniran fazi kontroler za prigušenje oscilacija koji kao mjerne signale koristi razliku brzina obrtanja rotora generatora u različitim oblastima, njen prvi izvod, kao i izmjerenu vrijednost komunikacionog kašnjenja. Uticaj komunikacionog kašnjenja kompenzuje se pomjeranjem funkcije pripadnosti upravljačkog signala kontrolera u zavisnosti od izmjerene vrijednosti kašnjenja. U radu su upoređene performanse fazi kontrolera sa i bez izmjerene vrijednosti komunikacionog kašnjenja kao trećeg ulaznog signala. Predstavljene rezultati ukazuju da se korišćenjem mjerene vrijednosti komunikacionog kašnjenja regija stabilnosti sistema proširuje za 200 ms.

Za razliku od klasičnih pristupa modelovanju elektroenergetskog sistema, kod kojih jedan nelinearni model opisuje globalno ponašanje sistema, primjenom Takagi-Sugeno pristupa se elektroenergetski sistem može opisati skupom linearnih fazi modela, čime se omogućava primjena metoda iz teorije linearnih sistema. U [112] je predložena metoda za dizajn robusnih kontrolera primjenom linearnih matričnih nejednakosti na bazi Takagi-Sugeno modela sistema. Robusni Takagi-Sugeno kontroler je pokazao bolje performanse od kontrolera za prigušenje oscilacija dizajniranog primjenom kombinovane H_2/H_∞ metode, pri različitim operativnim uslovima. Sličan pristup predložen je u [113], gdje je H_∞ kontroler za prigušenje oscilacija dizajniran na bazi Takagi-Sugeno modela kojim se eksplicitno tretira komunikaciono kašnjenje.

Fazi logika nema sposobnost učenja na osnovu podataka, što može rezultirati degradacijom performansi u određenim operativnim scenarijima. Kao rješenje za ovaj problem, u [114] je kontroler za prigušenje oscilacija za SVC uređaj dizajniran kao adaptivni neuro-fazi sistem zaključivanja (eng. *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*, ANFIS). ANFIS predstavlja neuralnu mrežu zasnovanu na Takagi-Sugeno fazi sistemu zaključivanja [115]. Budući da kombinuje njihove osnovne principe, ANFIS karakterišu prednosti i fazi sistema zaključivanja i neuralnih mreža. Pored samog kontrolera za prigušenje oscilacija, koristeći osnovnu strukturu predloženu u [116], u radu je predložen i ANFIS za adaptivnu kompenzaciju komunikacionog kašnjenja.

Pored fazi i neuro-fazi pristupa, u velikom broju istraživanja su kontroleri za prigušenje oscilacija dizajnirani primjenom metoda učenja sa podrškom (eng. *reinforcement learning*). Najčešće korišćena metoda učenja sa podrškom je heurističko dinamičko programiranje sa predstavljanjem ciljeva (eng. *Goal representation Heuristic Dynamic Programming*, GrHDP) [117]. U suštini, GrHDP predstavlja kombinaciju tri neuralne mreže koje omogućavaju optimalno upravljanje i prilagođavanje na aktuelne radne uslove. Akciona mreža generiše upravljačke signale na osnovu trenutnog stanja sistema. Evaluaciona mreža procjenjuje vrijednost kriterijumske funkcije kojom se kvantifikuje kvalitet upravljačkih akcija i usmjerava učenje akcione mreže u skladu sa funkcijom nagrade. Mreža reprezentacije ciljeva enkodira cilj upravljanja i dinamički oblikuje funkciju nagrade tako da ubrza proces učenja.

Jedna od najranijih primjena GrHDP metode za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija predstavljena je u [118]. Modulacijom reaktivne snage solarnih elektrana pomoću kontrolera razvijenog primjenom GrHDP metode adekvatno se prigušuju svi oscilatorni modovi u elektroenergetskom sistemu. Ovaj pristup je proširen u [119] dodavanjem fazi modula za podešavanje koraka učenja neuralnih mreža, čime se povećava njihova mogućnost prilagođavanja novim radnim uslovima. Kontroler za prigušenje oscilacija dizajniran primjenom predložene metode pokazao je značajno bolje performanse od referentnih kontrolera. Sličan pristup predstavljen je u [120], gdje je mogućnost primjene GrHDP metode u realnom vremenu potvrđena simulacijom sa hardverom u petlji (eng. *hardware-in-the-loop*).

3.4 Praznine u literaturi i ciljevi istraživanja

Imajući u vidu prethodni pregled literature, jasno je da dizajn sistema za prigušenje oscilacija predstavlja izuzetno široku i aktuelnu oblast istraživanja. I pored toga, moguće je identifikovati brojne praznine u literaturi, u skladu sa kojima su formulisani specifični ciljevi ove disertacije.

Arhitektura sistema za prigušenje oscilacija

Nekoliko nezavisnih istraživanja pokazalo je da centralizovane, distribuirane i hijerarhijske arhitekture karakterišu bolje performanse od decentralizovanih sistema za prigušenje oscilacija. Ipak, decentralizovane arhitekture nude brojne prednosti u odnosu na ostale, posebno s aspekta praktične implementacije.

U poređenju sa ostalim arhitekturama, decentralizovani sistemi za prigušenje oscilacija zahtijevaju prenos značajno manje količine podataka, jer pojedinačni kontroleri funkcionišu nezavisno na osnovu ograničenog skupa mjerenja. Iz tog razloga, decentralizovani sistemi postavljaju najniže zahtjeve u pogledu komunikacione infrastrukture, čime se postiže najveća brzina odziva i minimizuje prisustvo komunikacionih kašnjenja, koja degradiraju performanse sistema za prigušenje oscilacija.

Za razliku od centralizovanih i hijerarhijskih sistema kod kojih centralni kontroler predstavlja jedinstvenu tačku otkaza (eng. *single point of failure*), otkaz jednog kontrolera za prigušenje oscilacija kod decentralizovanih sistema ne utiče na funkcionisanje ostalih kontrolera, što rezultira značajno većom pouzdanošću. Slično važi i za distribuirane sisteme, pri čemu se kod njih povećana pouzdanost postiže na uštrb kompleksnosti sistema za prigušenje oscilacija.

Decentralizovani sistemi takođe pružaju najveću fleksibilnost u pogledu modifikacija koje mogu biti neophodne usljed promjene modalne strukture sistema zbog priključenja novih proizvodnih ili mrežnih kapaciteta. Na kraju, zbog najniže kompleksnosti i najnižih zahtjeva u pogledu komunikacione infrastrukture, decentralizovane sisteme za prigušenje oscilacija karakterišu i najniži troškovi implementacije.

Zbog svih prednosti koje imaju, u ovoj disertaciji su detaljno razmatrani decentralizovani sistemi za prigušenje oscilacija. Pri tom, zadovoljavajuće performanse sistema za prigušenje oscilacija u različitim operativnim uslovima teže se postići adekvatnim izborom upravljačke petlje i dizajnom samog kontrolera.

Izbor mjernih i upravljačkih signala

Za izbor mjernih i upravljačkih signala se u dostupnoj literaturi dominantno koriste metoda reziduuma i metoda zasnovana na geometrijskoj interpretaciji modalne kontrolabilnosti i opservabilnosti. Oba pristupa zasnivaju se na činjenici da upravljačka petlja, kojom se teži prigušiti jedan od kritičnih oscilatornih modova, mora obezbijediti adekvatnu kontrolabilnost i opservabilnost konkretnog moda. Iako adekvatna kontrolabilnost i opservabilnost kritičnog oscilatornog moda predstavljaju potrebne uslove, prilikom izbora upravljačke petlje potrebno je uzeti u obzir i:

- interakciju upravljačke petlje sa drugim oscilatornim modovima, kao i
- robusnost sistema za prigušenje oscilacija u različitim operativnim scenarijima.

U skladu sa navedenim zahtjevima, u ovoj disertaciji je predloženo proširenje klasičnih metoda za izbor upravljačke petlje u sistemima kod kojih se kontroleri za prigušenje oscilacija dizajniraju primjenom metode reziduuma.

Dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija

Svaka od izloženih metoda za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija nosi određene prednosti i mane. Metode optimalnog upravljanja, pod određenim pretpostavkama, matematički garantuju optimalne performanse sistema. Međutim, kontrolere dizajnirane primjenom metoda optimalnog upravljanja karakteriše niska robusnost na strukturirane i nestrukturirane nesigurnosti, koje su u elektroenergetskim sistemima neizbježne.

Problem metoda optimalnog upravljanja rješavaju metode robusnog upravljanja. Međutim, robusne kontrolere najčešće karakterišu pretjerana konzervativnost i suboptimalne performanse. Uz to, kontroleri dizajnirani primjenom metoda robusnog upravljanja su obično visokog reda, tako da je za praktične primjene potrebna njihova redukcija, čime se mogu narušiti performanse.

Metode optimalnog i robusnog upravljanja karakteriše izuzetno složen matematički aparat, koji značajno otežava dizajn kontrolera. Jednostavno tretiranje svih nelinearnosti problema dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija omogućavaju optimizacione metode. Nažalost, optimizacione metode zahtijevaju veliki broj evaluacija kriterijumske funkcije, koja, po pravilu, zahtijeva sprovođenje analize statičke stabilnosti sistema. Iz tog razloga, primjena optimizacionih metoda je gotovo nemoguća u realnim elektroenergetskim sistemima velikih dimenzija.

Inteligentne metode karakteriše najveća adaptivnost na varijabilne uslove rada u elektroenergetskim sistemima. Nažalost, inteligentne metode pate od nedostatka interpretabilnosti, što predstavlja glavni razlog za njihovu vrlo ograničenu primjenu u upravljanju elektroenergetskim sistemima u realnom vremenu. Pored toga, treniranje inteligentnih metoda zahtijeva pripremu velike količine podataka, koji često nijesu dostupni.

U poređenju sa metodama optimalnog i robusnog upravljanja, kao i optimizacionim i inteligentnim metodama, metoda reziduuma ima najveći potencijal za praktične primjene. Prije svega, metoda reziduuma ima snažno teorijsko utemeljenje, u skladu sa kojim se kritične svojstvene vrijednosti pomjeraju ka lijevoj poluravni. Nakon toga, metodu reziduuma karakteriše najniža proračunska složenost od svih metoda, što omogućava brz dizajn više različitih kontrolera i ispitivanje njihovih performansi. Na kraju, primjenom metode reziduuma dizajniraju se kontroleri koji imaju strukturu klasičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema. Ovakva struktura se uspješno koristi za prigušenje lokalnih oscilacija već više od šezdeset godina,

pa u industriji postoji akumulirano znanje o ugradnji, podešavanju i funkcionisanju ovakvih kontrolera. Zbog svih navedenih razloga, metode za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija predložene u ovoj disertaciji zasnivaju se upravo na metodi reziduuma.

Iako metoda reziduuma predstavlja jednu od najstarijih metoda za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija, za njenu primjenu se vezuje nekoliko neodgovorenih pitanja, koja će biti razmotrena u okviru ove disertacije.

Prvo, osnovna ideja metode reziduuma je da se fazna karakteristika kontrolera za prigušenje oscilacija podesi na osnovu ugla reziduuma, tako da se svojstvene vrijednosti koje odgovaraju kritičnim oscilatornim modovima pomjere ka lijevoj poluravni. Ako ugao reziduuma varira sa radnim uslovima u elektroenergetskom sistemu, kontroler za prigušenje oscilacija dizajniran za jedan operativni scenario može amplifikovati oscilacije u drugom. U dostupnoj literaturi nije pronađena analiza varijabilnosti ugla reziduuma i njenog uticaja na performanse kontrolera za prigušenje oscilacija. Kao što će biti pokazano u ovoj disertaciji, varijabilnost ugla reziduuma je u direktnoj korelaciji sa robusnošću kontrolera za prigušenje oscilacija na promjene operativnih uslova u elektroenergetskom sistemu. Uz to, varijabilnost ugla reziduuma u najvećoj mjeri zavisi od izbora mjernog signala koji se koristi kao ulaz kontrolera za prigušenje oscilacija. Prema tome, varijabilnost ugla reziduuma je neophodno uzeti u obzir prilikom izbora upravljačke petlje, za šta je predložena primjena kružne varijanse ugla reziduuma u različitim operativnim scenarijima.

Drugo, metoda reziduuma se u dostupnim istraživanjima koristi po principu *jedan kontroler - jedan oscilatorni mod*. Kao posljedica, u elektroenergetskim sistemima sa više slabo prigušenih oscilatornih modova, potrebno je dizajnirati više kontrolera. Ovim se povećava kompleksnost sistema za prigušenje oscilacija i rizik od neželjenih interakcija između kontrolera. U ovoj disertaciji je pokazano da se, uz pažljiv izbor upravljačke petlje, jedan kontroler dizajniran primjenom metode reziduuma može iskoristiti za prigušenje više oscilatornih modova.

Treće, u dostupnim istraživanjima u kojima se kontroleri za prigušenje oscilacija dizajniraju primjenom metode reziduuma, komunikaciona kašnjenja u prenosu mjernih signala se ili zanemaruju, ili smatraju fiksnim. U praksi, komunikaciona kašnjenja variraju, prije svega zbog zagušenja komunikacione mreže. Prema tome, kontroleri dizajnirani uz pretpostavku fiksnog komunikacionog kašnjenja imaju suboptimalne performanse u uslovima realnog komunikacionog kašnjenja. Kako bi se povećala njihova robusnost na komunikacione probleme, u ovoj disertaciji je predložena primjena adaptivnog kompenzatora kašnjenja u kombinaciji sa kontrolerima dizajniranim primjenom metode reziduuma.

Kao što će biti pokazano u ovoj disertaciji, kontrolere dizajnirane primjenom predloženih metoda karakteriše visok nivo robusnosti na promjene operativnih uslova u elektroenergetskom sistemu. Međutim, u određenim operativnim scenarijima, kritične među-zonske modove i dalje karakterišu vrijednosti faktora prigušenja niže od željenih. Ovo je posljedica varijacija kontrolabilnosti i opservabilnosti kritičnih oscilatornih modova, kao i pripadajućih uglova reziduuma. Kako bi se dodatno poboljšala robusnost sistema za prigušenje oscilacija na promjene operativnih uslova u elektroenergetskom sistemu, u ovoj disertaciji je predložena primjena neuralnih mreža za ažuriranje parametara kontrolera za prigušenje oscilacija u realnom vremenu. Skup podataka za obučavanje neuralne mreže jednostavno se formira u simulacionom okruženju direktnom primjenom metode reziduuma u različitim operativnim scenarijima elektroenergetskog sistema. Kao što će biti pokazano, ovakav adaptivni pristup značajno doprinosi robusnosti sistema za prigušenje oscilacija.

Na kraju, u dostupnim istraživanjima se performanse predloženih sistema za prigušenje oscilacija najčešće ispituju u veoma ograničenom broju operativnih scenarija. Kako bi se uzela u obzir stohastička priroda elektroenergetskog sistema, u ovoj disertaciji se performanse razvijenih sistema za prigušenje oscilacija ispituju u Monte Karlo okviru koji tretira različite konfiguracije mreže, različite nivoe potrošnje i proizvodnje, kao i različite raspodjele potrošnje i proizvodnje u elektroenergetskom sistemu.

Glava 4

Predlog novih metoda za dizajn sistema za prigušenje oscilacija

Ne napuštamo svoje težnje zbog očajanja jer ih nećemo usavršiti.

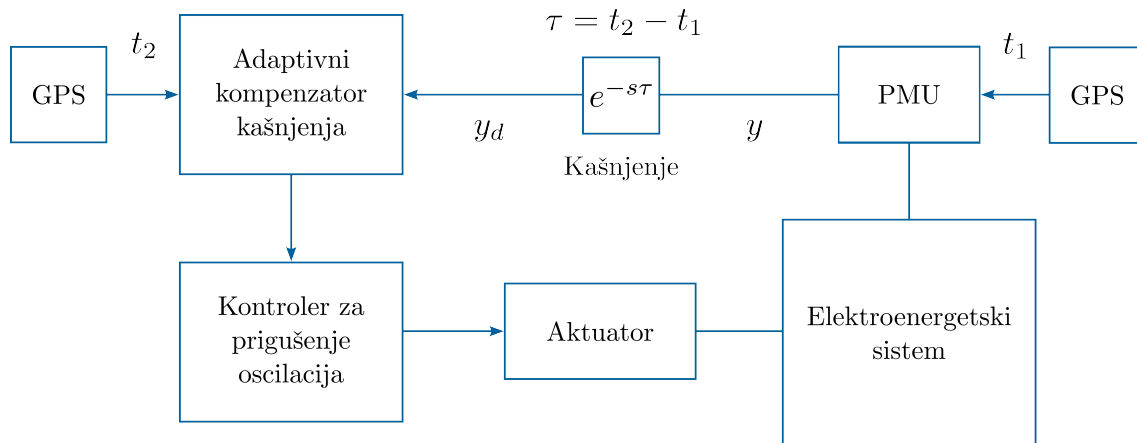
Epiktet, Razgovori, 1:2:37

U ovom poglavlju predstavljena je predložena arhitektura sistema za prigušenje oscilacija, adaptivni kompenzator komunikacionog kašnjenja, kao i predložene metode za izbor upravljačke petlje i dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija.

4.1 Arhitektura sistema za prigušenje oscilacija

Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, prvi korak u dizajnu sistema za prigušenje oscilacija je izbor arhitekture sistema. Arhitektura sistema za prigušenje oscilacija treba da omogući adekvatno prigušenje kritičnih oscilatornih modova, uz visoku pouzdanost, skalabilnost i minimalnu složenost i troškove implementacije.

Arhitektura sistema za prigušenje oscilacija korišćena u ovoj disertaciji predstavljena je na Slici 4.1. Predložena arhitektura predstavlja decentralizovani ekvivalent centralizovane arhitekture predložene u [121]. Osnovna razlika u odnosu na originalnu arhitekturu je što su, umjesto implementacije jednog centralnog kontrolera koji koordiniše rad više aktuatora, svi aktuatori opremljeni nezavisnim kontrolerima za prigušenje oscilacija. Predložena arhitektura se može koristiti bez obzira da li se kao aktuatori koriste pobudni sistemi sinhronih generatora, FACTS uređaji, HVDC sistemi ili drugi kontrolabilni uređaji. Takođe, važno je naglasiti da predložena arhitektura podrazumijeva da konvencionalni kontroleri za prigušenje lokalnih oscilacija ostaju u pogonu, bez izmjena njihovih karakteristika.



Slika 4.1: Arhitektura sistema za prigušenje oscilacija

U predloženoj arhitekturi, kontroler za prigušenje oscilacija oslanja se na fazorska mjerenja, koja se sa udaljenih lokacija prenose do kontrolera putem komunikacionih kanala. Za komunikaciju se u elektroenergetskim sistemima najčešće koriste fiber optički kablovi i digitalni mikrotalasni linkovi, ali se komunikacija često sprovodi i putem energetske vodova. Bez obzira na vrstu komunikacionog kanala, prenos fazorskih mjerenja na velike udaljenosti praćen je komunikacionim kašnjenjem. Očekivani nivo kašnjenja razlikuje se u zavisnosti od vrste komunikacionog kanala, ali se obično kreće u opsegu od 100 do 350 milisekundi [122].

U brojnim istraživanjima pokazano je da komunikaciono kašnjenje degradira performanse sistema za prigušenje oscilacija. Kako bi se kompenzovao uticaj komunikacionog kašnjenja, fazorska mjerenja prije korišćenja od strane kontrolera za prigušenje oscilacija obrađuje adaptivni kompenzator kašnjenja. Adaptivni kompenzator kašnjenja opremljen je namjenskim GPS satom, koji omogućava određivanje tačnog vremena prijema fazorskih mjerenja t_2 . Kako se fazorska mjerenja vremenski označavaju u trenutku zahvata t_1 , komunikaciono kašnjenje τ se jednostavno određuje kao $\tau = t_2 - t_1$. Adaptivni kompenzator kašnjenja koristi ovako proračunatu vrijednost komunikacionog kašnjenja za kompenzaciju njegovih efekata. Struktura korišćenog kompenzatora detaljno je objašnjena u sljedećem potpoglavlju.

4.2 Adaptivni kompenzator kašnjenja

Adaptivni kompenzator kašnjenja korišćen u ovoj disertaciji predložen je u [121]. Predloženi kompenzator je do sada korišćen u kombinaciji sa robusnim kontrolerima i kontrolerima dizajniranim primjenom inteligentnih metoda. Međutim, kao što će biti pokazano u nastavku, karakteristike adaptivnog kompenzatora kašnjenja su izuzetno pogodne za dizajn kontrolera primjenom metode reziduuma.

Komunikaciono kašnjenje degradira performanse sistema za prigušenje oscilacija jer unosi varijabilno fazno kašnjenje u upravljačku petlju. Prema tome, kako bi se efikasno eliminisao njegov uticaj, kompenzator kašnjenja mora adaptivno kompenzovati fazno kašnjenje koje je posljedica kašnjenja u prenosu mjernog signala.

Padeova aproksimacija drugog reda funkcije prenosa vremenskog kašnjenja $e^{-s\tau}$ ima oblik:

$$G_D(s) = \frac{(1 - \frac{s\tau}{4})^2}{(1 + \frac{s\tau}{4})^2} \quad (4.1)$$

Kao što se uočava, uticaj kašnjenja bi se u potpunosti mogao kompenzovati funkcijom prenosa koja je recipročna funkciji $G_D(s)$. Problem sa ovim pristupom je što je ovakva funkcija prenosa neminimalno fazna, što postavlja brojne izazove za dizajn kontrolera. Sa druge strane, fazna karakteristika funkcije prenosa $G_D(s)$ je identična faznoj karakteristici minimalno fazne funkcije prenosa:

$$\bar{G}_D(s) = \frac{1}{(1 + \frac{s\tau}{4})^4} \quad (4.2)$$

Upravo je $\bar{G}_D(s)$ inspirisala funkciju prenosa jediničnog kompenzatora:

$$G_{DC}(s) = \frac{(1 + \frac{sT}{4})^4}{(1 + sT_c)^4} \quad (4.3)$$

gdje je T vrijednost komunikacionog kašnjenja koje se kompenzuje, a T_c je vremenska konstanta koja se podešava u zavisnosti od modalne strukture elektroenergetskog sistema u opsegu od 0,01 do 0,1 sekundi.

Kako bi se omogućila kompenzacija varijabilnog komunikacionog kašnjenja u realnom vremenu, adaptivni kompenzator kašnjenja predstavlja težinsku kombinaciju m jediničnih kompenzatora:

$$G_{ADC}(s) = \sum_{i=1}^m \beta_i(\tau) G_{DC_i}(s) \quad (4.4)$$

gdje $\beta_i(\tau)$ predstavlja težinski koeficijent koji odgovara i -tom jediničnom kompenzatoru. Koeficijenti koji odgovaraju jediničnim kompenzatorima određuju se na osnovu proračunate vrijednosti komunikacionog kašnjenja τ , iz uslova da brojilac funkcije prenosa adaptivnog kompenzatora kašnjenja $G_{ADC}(s)$ bude jednak imenioniku funkcije $\bar{G}_D(s)$. Primjenom ovog uslova dolazi se do jednostavne matrične jednačine:

$$\beta = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{T}_\tau \quad (4.5)$$

koja se može koristiti za ažuriranje težinskih koeficijenata u realnom vremenu.

Kao primjer praktične primjene, ako je broj jediničnih kompenzatora $m = 5$, matrice \mathbf{T} i \mathbf{T}_τ u jednačini (4.5) imaju oblik:

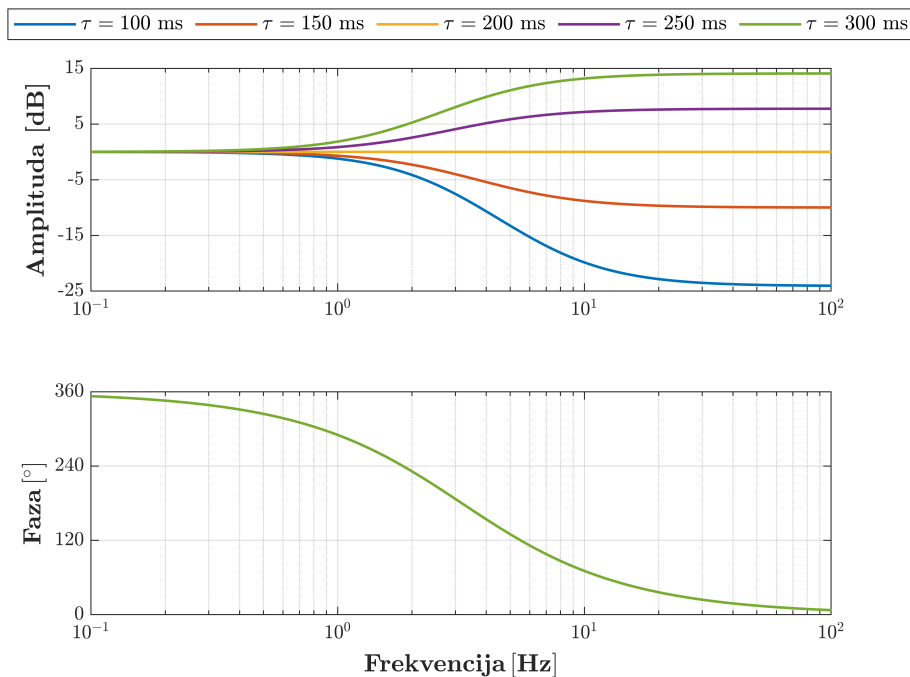
$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 \\ T_1^2 & T_2^2 & T_3^2 & T_4^2 & T_5^2 \\ T_1^3 & T_2^3 & T_3^3 & T_4^3 & T_5^3 \\ T_1^4 & T_2^4 & T_3^4 & T_4^4 & T_5^4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{T}_\tau = \begin{bmatrix} 1 \\ \tau \\ \tau^2 \\ \tau^3 \\ \tau^4 \end{bmatrix}$$

gdje se vremenske konstante jediničnih kompenzatora definišu tako da ravnomjerno pokriju očekivani opseg komunikacionog kašnjenja.

Ako se težinski koeficijenti jediničnih kompenzatora podešavaju u skladu sa jednačinom (4.5), tada je funkcija prenosa kompenzovanog kašnjenja:

$$G_{CD}(s) = G_{ADC}(s)G_D(s) = \frac{(1 - (\frac{s\tau}{4})^2)^2}{(1 + sT_c)^4} \quad (4.6)$$

Frekventni odziv funkcije prenosa kompenzovanog kašnjenja prikazan je na Slici 4.2 za različite vrijednosti kašnjenja τ . Kao što se uočava, fazna karakteristika kompenzovanog kašnjenja ne zavisi od vrijednosti kašnjenja τ , već samo od vremenske konstante T_c . Na ovaj način se u potpunosti eliminiše uticaj varijabilnog faznog kašnjenja koje je posljedica komunikacionog kašnjenja.



Slika 4.2: Frekventni odziv funkcije prenosa kompenzovanog kašnjenja

Fazno kašnjenje koje unosi adaptivni kompenzator kašnjenja se jednostavno uzima u obzir prilikom dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija primjenom metode reziduuma. Jedini zahtjev je da se, prilikom dizajna kontrolera, adaptivni kompenzator kašnjenja uključi u model sistema u otvorenoj sprezi.

Što se tiče amplitudske karakteristike, uočava se da pojačanje funkcije prenosa kompenzovanog kašnjenja raste sa povećanjem komunikacionog kašnjenja. Kako kontroler za prigušenje oscilacija djeluje kroz funkciju prenosa kompenzovanog kašnjenja, povećanje komunikacionog kašnjenja ima isti efekat na sistem kao i povećanje pojačanja kontrolera. Kako se primjenom metode reziduuma fazna karakteristika kontrolera podešava tako da se kritične svojstvene vrijednosti pomjeraju ka lijevoj poluravni, to povećanje kašnjenja tada rezultira dodatnim prigušenjem kritičnih oscilatornih modova. Drugim riječima, ako su kritični modovi adekvatno prigušeni pri nižim nivoima kašnjenja, tada će isti biti adekvatno prigušeni i pri višim. Prema tome, kontroler za prigušenje oscilacija je primjenom metode reziduuma potrebno dizajnirati za slučaj minimalnog očekivanog kašnjenja.

4.3 Izbor mjernih i upravljačkih signala

Upravljačka petlja treba da obezbijedi adekvatnu kontrolabilnost i opservabilnost kritičnog oscilatornog moda. Kako geometrijske mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti omogućavaju poređenje upravljačkih petlji sa različitim vrstama mjernih signala, u ovoj disertaciji će one biti korišćene za izbor optimalne upravljačke petlje.

Podsjećanja radi, nakon formiranja linearizovanog modela sistema u prostoru stanja, geometrijske mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti određuju se kao [66]:

$$m_c^{j,k} = \frac{|\psi_k \mathbf{B}_j|}{\|\psi_k\| \|\mathbf{B}_j\|} \quad (4.7)$$

$$m_o^{i,k} = \frac{|\mathbf{C}_i \phi_k|}{\|\phi_k\| \|\mathbf{C}_i\|} \quad (4.8)$$

U prethodnim izrazima, $m_c^{j,k}$ predstavlja kontrolabilnost moda k upravljačkim signalom j , a $m_o^{i,k}$ predstavlja opservabilnost moda k u izlaznom signalu i . Umjesto pojedinačne primjene, najčešće se koristi kombinovana mjera $m_{co}^{ij,k}$, koja predstavlja proizvod geometrijskih mjera kontrolabilnosti i opservabilnosti moda k za upravljačku petlju $i - j$. Upravljačke petlje kojima odgovaraju više vrijednosti kombinovane mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti predstavljaju bolje kandidate za prigušenje kritičnog oscilatornog moda.

Pored visoke kontrolabilnosti i opservabilnosti kritičnog oscilatornog moda, upravljačka petlja treba da obezbijedi minimalnu interakciju sa ostalim modovima u elektroenergetskom sistemu. Kako bi se kvantifikovala interakcija upravljačke petlje sa ostalim modovima, u ovoj disertaciji se uvodi mjera modalne interakcije m_i^{ij} :

$$m_i^{ij} = \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^n m_{co}^{ij,l} \quad (4.9)$$

Mjera modalne interakcije predstavlja zbir kombinovanih mjera kontrolabilnosti i opservabilnosti upravljačke petlje $i - j$ za sve modove u sistemu osim kritičnog oscilatornog moda k . U praktičnim primjenama, dovoljno je posmatrati skup oscilatornih modova koji se nalaze blizu granice adekvatnog prigušenja. Generalno, upravljačke petlje sa nižim vrijednostima mjere modalne interakcije postavljaju manje problema prilikom dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija.

Iako su visoka kontrolabilnost i opservabilnost kritičnog oscilatornog moda i niska interakcija sa ostalim modovima u sistemu potrebni uslovi koje upravljačka petlja treba da ispuni, ovi uslovi nijesu dovoljni kada se kontroler za prigušenje oscilacija dizajnira primjenom metode reziduuma. Kao što će biti objašnjeno, dizajn kontrolera primjenom metode reziduuma zasniva se na uglu reziduuma φ_{ij}^k . Reziduum funkcije prenosa $G_{ij}(s)$ određuje se na osnovu matrica sistema i odgovarajućih svojstvenih vektora. Kako i matrice sistema i svojstveni vektori zavise od radnih uslova u elektroenergetskom sistemu, isto važi i za ugao reziduuma. Kao posljedica, performanse ovako dizajniranih kontrolera u različitim radnim uslovima u velikoj mjeri zavise od varijabilnosti ugla reziduuma. Prema tome, kako bi se osigurale adekvatne performanse kontrolera za prigušenje oscilacija u različitim radnim uslovima, prilikom izbora upravljačke petlje potrebno je voditi računa o varijabilnosti ugla reziduuma.

Kako bi se kvantifikovala varijabilnost ugla reziduuma, u ovoj disertaciji se uvodi mjera kružne varijanse. Ako su poznate vrijednosti ugla reziduuma u n različitih operativnih scenarija, kružna varijansa V_φ određuje se primjenom jednačine [123]:

$$V_\varphi = 1 - \left| \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n e^{j\varphi_k} \right| \quad (4.10)$$

Kružna varijansa uzima vrijednosti od 0 do 1, pri čemu niže vrijednosti ukazuju na čvršće grupisanje uglova oko srednje vrijednosti, odnosno na manju varijabilnost ugla reziduuma. Prema tome, kako bi se dizajnirali kontroleri za prigušenje oscilacija robusni na promjene radnih uslova u elektroenergetskom sistemu, upravljačka petlja mora obezbijediti nisku varijabilnost ugla reziduuma.

4.4 Metoda reziduuma

Osnovni princip metode reziduuma za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija ilustriran je na Slici 4.3. Reziduum funkcije prenosa u otvorenoj sprezi R_{ij}^k predstavlja osjetljivost svojstvene vrijednosti k na promjenu pojačanja pozitivne povratne sprege izlaza funkcije prenosa na njen ulaz [18]. Prema tome, ako se uspostavi povratna sprega između izlaza i ulaza funkcije prenosa $G_{ij}(s)$, promjena pojačanja pozitivne povratne sprege za ΔK rezultira promjenom k -te svojstvene vrijednosti:

$$\Delta\lambda_k = R_{ij}^k \Delta K \quad (4.11)$$

Kako je ΔK realna vrijednost, svojstvena vrijednost će se pomjeriti od svoje početne vrijednosti λ_{k0} u smjeru ugla reziduuma φ_{ij}^k .

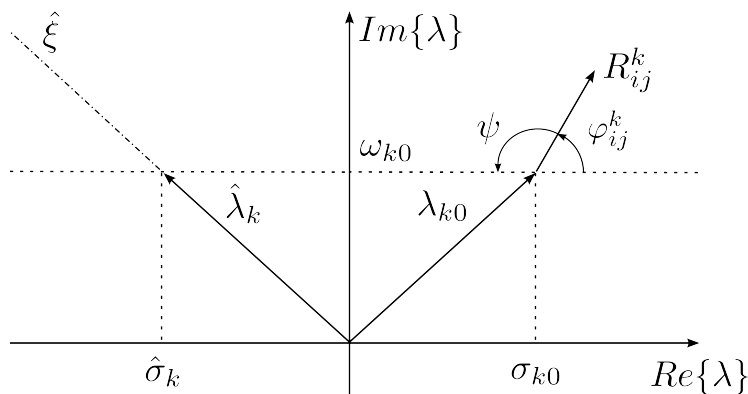
Slično statičkoj povratnoj sprezi, ako se između izlaza i ulaza funkcije prenosa uspostavi povratna sprega pomoću kontrolera za prigušenje oscilacija prenosne funkcije $H(s)$, promjena k -te svojstvene vrijednosti usljed male promjene pojačanja kontrolera data je izrazom:

$$\Delta\lambda_k = R_{ij}^k H(\omega_{k0}) \Delta K \quad (4.12)$$

gdje je $H(\omega_{k0})$ vrijednost funkcije prenosa kontrolera na početnoj učestanosti k -tog oscilatornog moda. Iz prethodne jednačine jasno je da, kako bi se svojstvena vrijednost k pomjerila ka lijevoj poluravni, fazna karakteristika kontrolera za prigušenje oscilacija mora zadovoljiti uslov:

$$\psi = \angle H(\omega_{k0}) = 180^\circ - \varphi_{ij}^k \quad (4.13)$$

gdje je $\angle H(\omega_{k0})$ faza funkcije prenosa kontrolera na početnoj učestanosti moda k .



Slika 4.3: Ilustracija metode reziduuma

Ako kontroler za prigušenje oscilacija ima funkciju prenosa tipičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema:

$$H(s) = K \frac{sT_W}{1 + sT_W} \left(\frac{1 + sT_1}{1 + sT_2} \right)^n \quad (4.14)$$

parametri *lead-lag* kompenzatora određuju se primjenom jednačina [62]:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{T_2}{T_1} = \frac{1 - \sin \frac{\psi}{n}}{1 + \sin \frac{\psi}{n}} \\ T_1 &= \frac{1}{\omega_{k0} \sqrt{\alpha}} \\ T_2 &= \alpha T_1 \end{aligned} \quad (4.15)$$

dok se vremenska konstanta filtra T_W obično postavlja na 10 sekundi. Nakon određivanja vremenskih konstanti kontrolera, pojačanje kontrolera koje rezultira adekvatnim prigušenjem kritičnog oscilatornog moda određuje se formiranjem geometrijskog mjesta korijena sistema za različite vrijednosti pojačanja.

4.5 Simultano prigušenje više oscilatornih modova primjenom metode reziduuma

Kao što je navedeno u prethodnom poglavlju, u dostupnim istraživanjima se metoda reziduuma koristi za dizajn kontrolera koji imaju za cilj prigušenje samo jednog oscilatornog moda. Da bi ovo bilo moguće, izbor upravljačke petlje sprovodi se tako da je njena interakcija sa ostalim modovima u sistemu minimalna. Međutim, ovaj pristup postaje problematičan u sistemima sa više slabo prigušenih oscilatornih modova, kada princip *jedan kontroler - jedan oscilatorni mod* rezultira visokom složenošću sistema za prigušenje oscilacija. Metoda reziduuma pruža jednostavan mehanizam kojim se omogućava simultano prigušenje više oscilatornih modova jednim kontrolerom za prigušenje oscilacija.

Do sada, dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija primjenom metode reziduuma fokusirao se na prioritetni oscilatorni mod k . Međutim, uticaj kontrolera za prigušenje oscilacija nije ograničen samo na prioritetni mod. Naprotiv, implementacijom kontrolera za prigušenje oscilacija utiče se na sve modove u elektroenergetskom sistemu. Dok amplituda promjene položaja svojstvenih vrijednosti zavisi od njihove kontrolabilnosti i opservabilnosti unutar odabrane upravljačke petlje, smjer promjene položaja svojstvenih vrijednosti opisan je jednačinom (4.12).

U skladu sa jednačinom (4.12), neprioritetna svojstvena vrijednost l pomjera se od svoje početne vrijednosti λ_{l0} u smjeru koji je definisan uglom:

$$\angle \Delta \lambda_l = \varphi_{ij}^l + \angle H(\omega_{l0}) \quad (4.16)$$

gdje φ_{ij}^l predstavlja ugao reziduuma funkcije prenosa $G_{ij}(s)$ koji odgovara modu l , a $\angle H(\omega_{l0})$ predstavlja fazu kontrolera za prigušenje oscilacija na početnoj frekvenciji moda l . Prema tome, neprioritetna svojstvena vrijednost l takođe će se pomjeriti ka lijevoj poluravni ako rezultujući ugao pomjeraja $\angle \Delta \lambda_l$ leži u drugom ili trećem kvadrantu. Pri tom, što je rezultujući ugao pomjeraja bliži vrijednosti od 180° , to je efekat kontrolera na prigušenje neprioritetnog oscilatornog moda veći.

Koristeći prethodnu ideju, moguće je izvršiti predselekciju upravljačkih petlji koje omogućavaju simultano prigušenje više oscilatornih modova. Prije sprovođenja predselekcije, potrebno je definisati prioritetne i neprioritetne oscilatorne modove u sistemu. Po pravilu, za prioritetni oscilatorni mod k usvaja se mod sa najnižom vrijednošću faktora prigušenja. Nakon toga, predselekcija se sprovodi u četiri koraka:

1. U prvom koraku se za posmatranu upravljačku petlju određuje ugao reziduuma koji odgovara prioritetnom oscilatornom modu k .
2. Na osnovu proračunate vrijednosti ugla reziduuma, u drugom koraku se, primjenom jednačine (4.15), određuju parametri kontrolera za prigušenje oscilacija, koji rezultiraju pomjeranjem svojstvene vrijednosti λ_k ka lijevoj poluravni.
3. Uz poznatu faznu karakteristiku kontrolera za prigušenje oscilacija, u trećem koraku se određuju rezultujući uglovi pomjeraja $\angle \Delta \lambda_l$ za sve neprioritetne svojstvene vrijednosti.
4. Na kraju, ako se rezultujući uglovi pomjeraja svih svojstvenih vrijednosti od interesa nalaze u uskom opsegu oko 180° , posmatrana upravljačka petlja je kandidat za simultano prigušenje svih kritičnih oscilatornih modova.

Od kandidata za simultano prigušenje kritičnih oscilatornih modova, izbor optimalne upravljačke petlje sprovodi se primjenom mjera uvedenih u prethodnom potpoglavlju. Konkretno, optimalna upravljačka petlja obezbjeđuje visoku kontrolabilnost i opservabilnost kritičnih oscilatornih modova, minimalnu interakciju sa ostalim modovima u elektroenergetskom sistemu i minimalnu varijabilnost uglova reziduuma.

Nakon izbora optimalne upravljačke petlje u skladu sa prethodnom procedurom, dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija sprovodi se primjenom metode reziduuma. Jedina razlika u odnosu na klasični pristup je što se za vrijednost pojačanja kontrolera za prigušenje oscilacija usvaja vrijednost koja rezultira adekvatnim prigušenjem svih kritičnih oscilatornih modova.

Na kraju, važno je istaći da, iako se rezultujući uglovi pomjeraja svih kritičnih svojstvenih vrijednosti nalaze u uskom opsegu oko 180° , ovim nije zagarantovana mogućnost prigušenja svih kritičnih oscilatornih modova. Razlog za ovo je činjenica da, pri određenoj vrijednosti pojačanja kontrolera za prigušenje oscilacija, može doći do promjene smjera kretanja pojedinih svojstvenih vrijednosti u kompleksnoj ravni. Kod određenih upravljačkih petlji, do savijanja grana geometrijskog mjesta korijena sistema dolazi prije postizanja adekvatnog prigušenja za sve oscilatorne modove. Iz tog razloga, u praksi se može javiti potreba za testiranjem nekoliko upravljačkih petlji odabranih primjenom opisane procedure.

4.6 Adaptivni sistem za prigušenje oscilacija na bazi metode reziduuma i neuralnih mreža

Kada se izbor upravljačke petlje sprovodi primjenom pristupa predloženog u ovoj disertaciji, kontrolere za prigušenje oscilacija dizajnirane primjenom metode reziduuma karakteriše visoka robusnost na promjene operativnih uslova u elektroenergetskom sistemu. Ipak, bez obzira na upravljačku petlju, u određenim operativnim scenarijima kritični oscilatorni modovi nijesu adekvatno prigušeni. Ovo je posljedica činjenice da kontrolabilnost i opservabilnost kritičnih oscilatornih modova, kao i odgovarajući uglovi reziduuma, variraju sa radnim uslovima u elektroenergetskom sistemu. Isto važi i za faznu karakteristiku i pojačanje kontrolera za prigušenje oscilacija koji su potrebni za pomjeranje kritičnih svojstvenih vrijednosti ka željenoj zoni kompleksne poluravni.

Tokom izrade ove disertacije, značajno vrijeme je utrošeno na traženje zavisnosti između parametara kontrolera za prigušenje oscilacija i pojedinačnih parametara radnog režima elektroenergetskog sistema. Nažalost, zbog izražene nelinearnosti problema, nije pronađena jednostavna zavisnost koja bi se mogla koristiti za ažuriranje parametara kontrolera za prigušenje oscilacija u realnom vremenu.

Izuzetno moćan alat za modelovanje složenih nelinearnosti predstavljaju neuralne mreže koje su, zbog svoje fleksibilnosti, našle primjenu u različitim domenima. U elektroenergetskim sistemima, neuralne mreže korišćene su za prognozu potrošnje, prognozu proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, estimaciju stanja, analizu statičke i tranzijentne stabilnosti, detekciju i identifikaciju sajber napada, kao i za brojne druge namjene [124]. Crpeći motivaciju iz uspješne primjene neuralnih mreža u različitim aspektima planiranja i eksploatacije elektroenergetskih sistema, u ovom poglavlju je predložen adaptivni sistem za prigušenje oscilacija na bazi neuralnih mreža i metode reziduuma.

U nastavku su predstavljene osnovni principi neuralnih mreža, uključujući njihovu strukturu, proces obučavanja i optimizacije hiperparametara. Nakon toga, predstavljena je struktura adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija i procedura pripreme podataka za obučavanje neuralne mreže.

4.6.1 Struktura neuralnih mreža

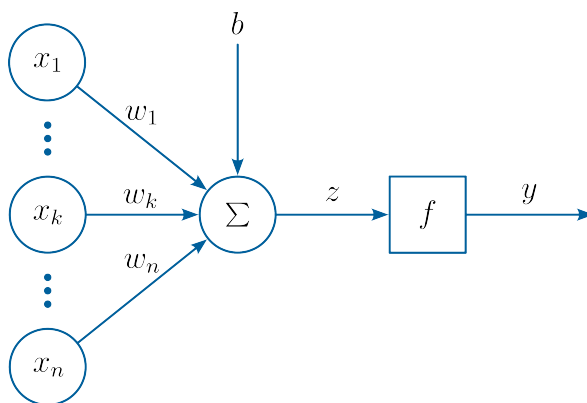
Vještačke neuralne mreže predstavljaju modele mašinskog učenja, čija su struktura i način funkcionisanja inspirisani biološkim neuralnim mrežama. Od njihovog razvoja četrdesetih godina prošlog vijeka [125], vještačke neuralne mreže doživjele su značajne promjene u odnosu na njihov biološki pandan, pa je stav velikog broja istraživača da analogija sa biološkim neuralnim mrežama više ne važi.

Osnovne proračunske jedinice neuralnih mreža nazivaju se neuronima. Kao što je prikazano na Slici 4.4, neuroni transformišu ulaze x_1, x_2, \dots, x_n u odgovarajući izlaz y . Matematički, funkcionisanje neurona može se opisati relacijom:

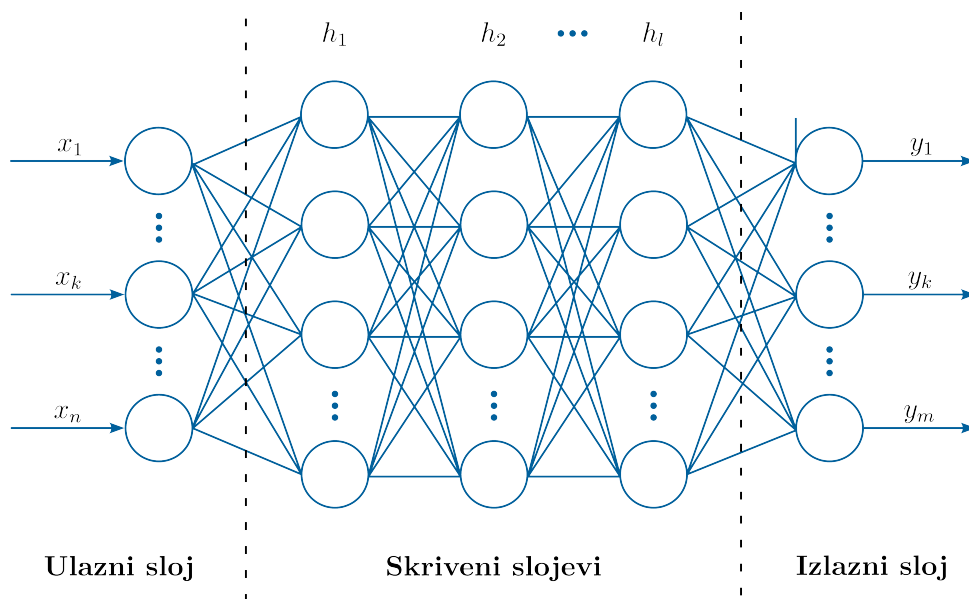
$$y = f(z) = f\left(b + \sum_{i=1}^n w_i x_i\right) \quad (4.17)$$

gdje w_1, w_2, \dots, w_n predstavljaju težinske koeficijente veza između neurona, b predstavlja *bias* neurona, a f predstavlja aktivacionu funkciju neurona.

Ako se za aktivacionu funkciju neurona usvoji step ili signum funkcija, struktura predstavljena na Slici 4.4 odgovara strukturi perceptrona, koji predstavlja preteču savremenih neuralnih mreža. Iako se od perceptrona očekivalo dosta u istraživačkim krugovima, 1969. godine je pokazano da se perceptron ne može koristiti ni za rješavanje najjednostavnijih problema, kao što je prepoznavanje binarne ekskluzivno Ili funkcije [126]. Ovaj problem je riješen kombinovanjem većeg broja perceptrona u mrežu kao na Slici 4.5, koja odgovara strukturi višeslojnog perceptrona.



Slika 4.4: Struktura neuralne mreže sa jednim neuronom



Slika 4.5: Struktura potpuno povezane neuralne mreže

Višeslojni perceptron sastoji se od jednog ulaznog sloja, jednog ili više skrivenih slojeva, kao i jednog izlaznog sloja. Osim izlaznog, svaki od slojeva sadrži i *bias* neuron koji se implicitno podrazumijeva. Takođe, svi slojevi osim izlaznog su potpuno povezani sa narednim slojem, pa ovakva struktura odgovara strukturi potpuno povezanih neuralnih mreža sa propagacijom unaprijed.

Potencijal za primjenu neuralnih mreža sa propagacijom unaprijed najbolje opisuje teorema univerzalne aproksimacije [127]. Prema ovoj teoremi, svaka funkcija koja je neprekidna na kompaktnom skupu može se proizvoljno dobro aproksimirati neuralnom mrežom sa jednim skrivenim slojem i dovoljnim brojem neurona. Ipak, važno je naglasiti da teorema univerzalne aproksimacije predstavlja graničnu teoremu koja ne garantuje da je dovoljan broj neurona konačan.

4.6.2 Obučavanje neuralnih mreža

Obučavanje neuralnih mreža predstavlja iterativni proces optimizacije parametara mreže s ciljem minimizacije greške predviđanja. Parametri neuralne mreže uključuju težinske koeficijente veza između neurona, kao i *bias* vrijednosti pojedinačnih neurona. Jedan od ključnih doprinosa obučavanju neuralnih mreža je algoritam propagacije unazad (eng. *backpropagation*) [128]. Algoritam propagacije unazad omogućava efikasno određivanje gradijenta funkcije gubitka po svim parametrima neuralne mreže sa samo dva prolaza kroz istu. Uz poznat gradijent funkcije gubitka, jednostavno se određuju promjene parametara neuralne mreže koje rezultiraju smanjenjem vrijednosti funkcije gubitka odnosno greške predviđanja.

Algoritam propagacije unazad primjenjuje se redom na podskupove ulaznih podataka (eng. *mini-batch*), pri čemu se jedan prolaz kroz cjelokupni skup podataka naziva epohom. U toku jedne epohe, svi podskupovi podataka sukcesivno se šalju ulaznom sloju neuralne mreže, koji ih prosljeđuje prvom skrivenom sloju. Algoritam zatim računa izlaze svih neurona u ovom sloju za sve uzorke iz podskupa podataka. Izlazi neurona prosljeđuju se sljedećem sloju, gdje se ponovo vrši proračun izlaza i njihovo prosljeđivanje dalje, sve do izlaznog sloja mreže. Opisana procedura predstavlja propagaciju unaprijed (eng. *forward pass*), koja je identična procesu predviđanja, osim što se izlazi svih neurona čuvaju za potrebe narednih koraka.

Nakon određivanja izlaza neuralne mreže, greška predviđanja kvantifikuje se proračunom funkcije gubitka. Dok se za probleme regresije kao funkcija gubitka najčešće koristi srednja kvadratna greška (eng. *Mean-Squared Error*, MSE), najčešće korišćena funkcija gubitka kod problema klasifikacije je binarna unakrsna entropija, poznatija kao logaritamski gubitak (eng. *logistic loss*).

Nakon određivanja greške predviđanja, naredni korak algoritma je sprovođenje propagacije unazad (eng. *backward pass*), kojom se određuje gradijent funkcije gubitka po svim parametrima neuralne mreže. Procedura automatskog određivanja gradijenta može se ilustrovati na primjeru prethodno razmatrane mreže sa jednim neuronom. Za posmatranu mrežu, funkcija gubitka ima oblik:

$$J = (y - \hat{y})^2 \quad (4.18)$$

Polazeći od jednačine (4.17), gradijent funkcije gubitka po težinskom koeficijentu w_k određuje se kao:

$$\frac{\partial J}{\partial w_k} = \frac{\partial J}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial w_k} \quad (4.19)$$

gdje je gradijent funkcije gubitka po izlazu neuralne mreže definisan kao:

$$\frac{\partial J}{\partial y} = 2(y - \hat{y}) \quad (4.20)$$

Sa druge strane, gradijent izlaza y po ponderisanoj sumi z predstavlja gradijent aktivacione funkcije f . Na kraju, gradijent ponderisane sume z po težinskom koeficijentu w_k određuje se kao:

$$\frac{\partial z}{\partial w_k} = x_k \quad (4.21)$$

U slučaju neuralne mreže sa jednim neuronom, x_k predstavlja ulaznu karakteristiku. Međutim, kod neuralnih mreža sa većim brojem slojeva, u jednačini (4.21) figuriše vrijednost izlaza k -tog neurona iz prethodnog sloja.

Opisana procedura se lako generalizuje na mreže sa više slojeva. Međutim, prednosti propagacije unazad je moguće identifikovati i na primjeru mreže sa jednim neuronom. Kao što se uočava, sve vrijednosti koje su potrebne za određivanje gradijenta funkcije gubitka, uključujući izlaz y , ponderisanu sumu z i ulaznu karakteristiku x_k , unaprijed su poznate ili određene prilikom propagacije unaprijed. Čuvanjem svih među-rezultata, propagacija unazad eliminiše redundantne proračune, čime se značajno smanjuje proračunska složenost obučavanja neuralnih mreža. Istina, bez adekvatnih računarskih resursa, proračunska složenost obučavanja je i dalje visoka.

Nakon određivanja gradijenta funkcije gubitka primjenom propagacije unazad, parametri neuralne mreže ažuriraju se korišćenjem metoda optimizacije kao što je gradijentni spust, stohastički gradijentni spust, ili adaptivnih metoda kao što su AdaGrad, RMSProp ili Adam.

Prethodno opisana procedura ponavlja se sukcesivno za sve podskupove ulaznih podataka tokom više epoha. Sa svakom iteracijom, parametri neuralne mreže prilagođavaju se tako da minimizuju funkciju gubitka, čime se poboljšava tačnost modela. Ipak, proces obučavanja je potrebno zaustaviti na vrijeme kako bi se spriječila pretjerana prilagođenost neuralne mreže podacima (eng. *overfitting*), o čemu će biti više riječi u nastavku.

4.6.3 Hiperparametri neuralnih mreža

Hiperparametri su unaprijed definisani parametri modela koji nijesu direktno naučeni iz podataka, već se podešavaju kako bi se optimizovao proces učenja. Najvažniji hiperparametri su broj skrivenih slojeva i broj neurona u njima, aktivaciona funkcija, stopa učenja, metod optimizacije parametara, veličina podskupa, kao i parametri primijenjenog metoda regularizacije. U nastavku je predstavljen kratak pregled najvažnijih hiperparametara i metoda za njihovu optimizaciju. Za više informacija, zainteresovani čitalac upućuje se na [129].

Broj skrivenih slojeva i broj neurona

Polazeći od teoreme univerzalne aproksimacije, neuralna mreža sa jednim skrivenim slojem i dovoljnim brojem neurona može proizvoljno dobro predstaviti svaku funkciju koja je neprekidna na kompaktnom skupu. Ipak, pokazuje se da, uz istu količinu podataka za obučavanje, duboke mreže imaju značajno bolje performanse od plitkih mreža na složenim problemima. Ovo je posljedica činjenice da su realni podaci najčešće hijerarhijski strukturirani, pa različiti slojevi neuralne mreže modeluju različite nivoe apstrakcije karakteristika.

Broj neurona u ulaznom i izlaznom sloju zavisi od broja ulaznih i izlaznih karakteristika. Što se tiče skrivenih slojeva, dugogodišnja praksa podrazumijevala je korišćenje piramidalnih struktura, kod kojih se broj neurona postepeno smanjuje od ulaznog ka izlaznom sloju. Ipak, ova praksa je većinski napuštena, jer se korišćenjem istog broja neurona u svim skrivenim slojevima postižu jednako dobre ili bolje performanse. Osim što se ovim pristupom pojednostavljuje arhitektura neuralne mreže, smanjuje se i broj hiperparametara koje je potrebno optimizovati, čime se olakšava proces obučavanja.

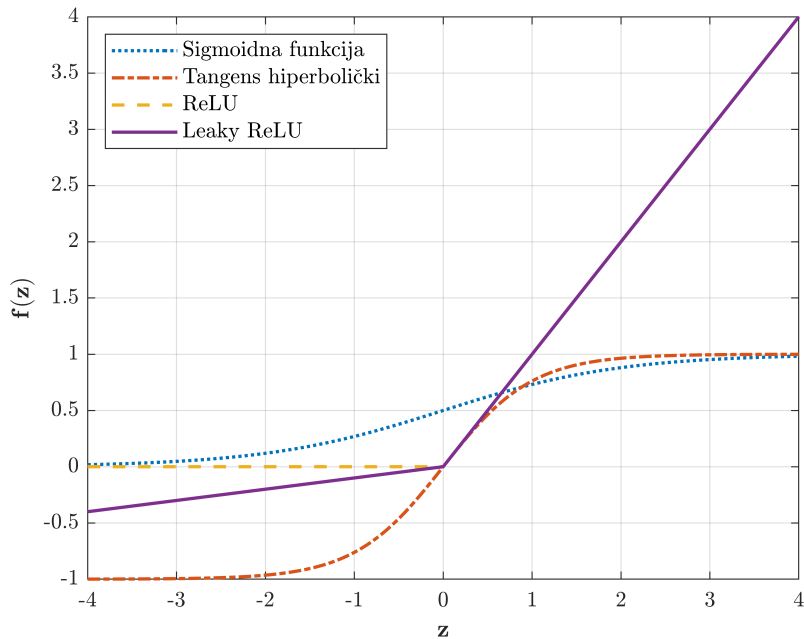
Generalno, bolje performanse postižu se povećavanjem broja skrivenih slojeva nego povećavanjem broja neurona. Međutim, važno je naglasiti da optimalna arhitektura u najvećoj mjeri zavisi od prirode problema koji se rješava. Prethodno iskustvo autora ove disertacije ukazuje da se, nakon određenog broja skrivenih slojeva, performanse neuralne mreže mogu efikasnije poboljšati povećanjem broja neurona u skrivenim slojevima [130, 131].

Aktivaciona funkcija

Kao što je ranije navedeno, perceptron, koji predstavlja preteču savremenih neuralnih mreža, kao aktivacionu funkciju koristio je step ili signum funkciju. Problem sa obje funkcije je što nijesu diferencijabilne u nuli, a za sve ostale vrijednosti imaju gradijent nula. Prema tome, ne mogu se koristiti sa *backpropagation* algoritmom i metodama optimizacije koje zahtijevaju poznavanje gradijenta. Step i signum funkcija zamijenjene su naprednijim aktivacionim funkcijama, od kojih su najčešće korišćene predstavljene na Slici 4.6.

Sigmoidna funkcija je dugo bila najčešće korišćena aktivaciona funkcija u neuralnim mrežama. Funkcija je glatka i diferencijabilna, pa je izuzetno pogodna za primjenu sa *backpropagation* algoritmom. Gradijent sigmoidne funkcije za velike pozitivne i negativne vrijednosti je veoma nizak, što značajno usporava proces obučavanja. Ovaj problem je poznat kao problem nestajanja gradijenta (eng. *vanishing gradient*). Iz tog razloga se sigmoidna funkcija danas najčešće koristi u izlaznom sloju neuralnih mreža za binarnu klasifikaciju.

Hiperbolički tangens je matematički sličan sigmoidnoj funkciji, uz razliku u opsegu vrijednosti funkcije. Kako funkcija uzima vrijednosti od -1 do 1, na početku treniranja su izlazi svih neurona centrirani oko nule, što najčešće ubrzava konvergenciju. Iz tog razloga se hiperbolički tangens često koristi kao aktivaciona funkcija u skrivenim slojevima. Međutim, važno je naglasiti da, kao i u slučaju sigmoidne funkcije, i ova aktivaciona funkcija unosi problem nestajanja gradijenta za velike pozitivne i negativne vrijednosti ulaza z .



Slika 4.6: Poređenje aktivacionih funkcija

Najčešće korišćena aktivaciona funkcija danas, posebno kod dubokih neuralnih mreža, je ispravljena linearna jedinica (eng. *Rectified Linear Unit*, ReLU). Kao što se uočava, dok je za $z < 0$ izlaz funkcije jednak nuli, za $z > 0$ je ReLU funkcija linearna, što rezultira najnižom proračunskom složenosti među aktivacionim funkcijama. ReLU funkcija izbjegava problem nestajanja gradijenta, međutim, moguće su situacije odumiranja neurona za velike negativne vrijednosti ulaza z . Ovaj problem se rješava korišćenjem nakošene ispravljene linearne jedinice (eng. *leaky rectified linear unit*, leaky ReLU), koja unosi nagib za $z < 0$, što omogućava postojanje gradijenta i na ovom opsegu. Ipak, nagib karakteristike je još jedan hiperparametar koji je potrebno optimizovati kako bi se riješio problem odumiranja neurona, a istovremeno izbjeglo ponašanje leaky ReLU funkcije kao linearne funkcije.

Stopa učenja

Stopa učenja (eng. *learning rate*) predstavlja jedan od najvažnijih hiperparametara u procesu obučavanja neuralnih mreža. Stopa učenja određuje veličinu koraka koji metoda optimizacije pravi prilikom ažuriranja parametara neuralne mreže. Previsoka vrijednost stope učenja može dovesti do oscilacija oko minimuma funkcije gubitka ili čak do divergencije procesa obučavanja. Sa druge strane, preniska vrijednost stope učenja može značajno usporiti konvergenciju, čime se produžava vrijeme obučavanja i povećava rizik od konvergencije ka lokalnom minimumu. Iz tog razloga je adekvatan izbor stope učenja od presudnog značaja za obučavanje neuralnih mreža.

Umjesto korišćenja konstantne vrijednosti, u praksi se stopa učenja često mijenja tokom procesa obučavanja u skladu sa unaprijed definisanim zakonom. Najčešće korišćena strategija podrazumijeva polinomijalno ili eksponencijalno smanjivanje stope učenja tokom procesa obučavanja. Sa druge strane, u [132] je pokazano da se periodičnim povećavanjem i smanjivanjem stope učenja tokom procesa obučavanja mogu postići bolje performanse i brža konvergencija.

Optimalan izbor početne vrijednosti i strategije upravljanja stopom učenja zavisi od prirode problema, arhitekture mreže i veličine skupa podataka. U praksi je najčešće potrebno eksperimentisanje sa različitim strategijama, pri čemu se početna vrijednost stope učenja obično postavlja na osnovu prethodnog iskustva.

Metoda optimizacije parametara

Parametri neuralne mreže se iterativno ažuriraju tokom procesa obučavanja kako bi se smanjila greška predviđanja. Za ažuriranje parametara neuralne mreže dostupan je veliki broj različitih metoda optimizacije. Najčešće korišćene metode predstavljaju modifikacije metode gradijentnog spusta.

Metoda gradijentnog spusta na skupu (eng. *Batch Gradient Descent*, BGD) iterativno ažurira parametre neuralne mreže u smjeru negativnog gradijenta funkcije gubitka. Iako jednostavna, BGD zahtijeva proračun gradijenta za sve uzorke u skupu podataka, što značajno povećava proračunsku složenost procesa obučavanja. Ovaj problem rješava se primjenom metode stohastičkog gradijentnog spusta (eng. *Stochastic Gradient Descent*, SGD). Za razliku od metode gradijentnog spusta na skupu, SGD zahtijeva proračun gradijenta samo na jednom slučajno odabranom uzorku. SGD značajno smanjuje proračunsku složenost, međutim, konvergencija metode je stohastična, pa proces obučavanja često može trajati duže u odnosu na BGD. Kompromis između dvije metode predstavlja metoda gradijentnog spusta na podskupu (eng. *Mini-Batch Gradient Descent*, MBGD), kod koje se gradijent računa na podskupu slučajno odabranih uzoraka. MBGD obezbjeđuje relativno brzu i stabilnu konvergenciju, što ga čini popularnim izborom za obučavanje neuralnih mreža.

Jedno od prvih unapređenja metode gradijentnog spusta je metoda inercije (eng. *momentum optimization*) [133]. Osnovna ideja metode inercije je da se, umjesto ažuriranja parametara isključivo u pravcu trenutnog gradijenta, koristi akumulirani gradijent koji uzima u obzir istorijske vrijednosti gradijenta. Akumulirani gradijent se definiše tako da značaj starijih gradijenata eksponencijalno opada tokom procesa obučavanja. Ova modifikacija ublažava oscilacije u kretanju parametara ka minimumu funkcije gubitka, čime se ubrzava proces konvergencije. U većini slučajeva, metoda inercije pruža značajno bolje performanse od klasičnog gradijentnog spusta.

Bolje rezultate od klasične metode inercije često pruža metoda Nesterovljevog ubrzanog gradijenta (eng. *Nesterov Accelerated Gradient*, NAG) [134]. NAG predstavlja unapređenje metode inercije u kojem se gradijent ne računa za trenutne vrijednosti parametara, već za predviđene vrijednosti koje bi se dobile daljim kretanjem u pravcu akumuliranog gradijenta. Ova modifikacija omogućava algoritmu da predvidi ponašanje funkcije gubitka, što rezultira bržom i stabilnijom konvergencijom, posebno kod složenijih problema.

Značajan napredak u optimizaciji parametara neuralnih mreža predstavljaju adaptivne metode optimizacije, kao što je AdaGrad [135]. AdaGrad omogućava nezavisno ažuriranje stope učenja za sve parametre neuralne mreže pojedinačno. Stopa učenja za pojedinačne parametre određuje se dijeljenjem početne vrijednosti stope učenja korijenom akumulirane vrijednosti kvadrata gradijenta. Ako je vrijednost akumuliranog gradijenta koja odgovara određenom parametru visoka, odgovarajuća vrijednost stope učenja će biti niska i obrnuto. Ovim se eliminiše potreba za primjenom strategija upravljanja stopom učenja i omogućava efikasnije usmjeravanje parametara ka globalnom minimumu.

Problem AdaGrad metode je činjenica da akumulacija kvadrata gradijenata dovodi do postepenog smanjenja stope učenja tokom procesa obučavanja, što može rezultirati preuranjenom konvergencijom. Ovaj problem rješava RMSProp metoda [136], koja koristi eksponencijalno opadajuću srednju vrijednost kvadrata gradijenta umjesto njihove sume. Na ovaj način se, kao i kod metode inercije, značaj starijih gradijenata eksponencijalno smanjuje tokom procesa obučavanja. Osim na veoma jednostavnim problemima, RMSProp pruža značajno bolje performanse od AdaGrad metode i dugo je predstavljao podrazumijevanu metodu optimizacije.

Adaptivna estimacija momenta (eng. *Adaptive moment estimation*, Adam) predstavlja jednu od najpopularnijih metoda optimizacije parametara neuralnih mreža, jer kombinuje prednosti RMSProp i metode inercije [137]. Adam koristi eksponencijalno opadajuće srednje vrijednosti gradijenta i kvadrata gradijenta za adaptivno prilagođavanje stope učenja pojedinačnih parametara tokom procesa obučavanja. Zahvaljujući ugrađenoj korekciji pristrasnosti, Adam osigurava pouzdane procjene gradijenta čak i u ranim fazama obučavanja, kada su akumulirane vrijednosti gradijenta još uvek niske. Zbog svoje efikasnosti i robusnosti, Adam najčešće predstavlja prvi izbor za optimizaciju u neuralnim mrežama.

Veličina podskupa

Veličina podskupa (eng. *batch size*) predstavlja broj uzoraka koji se koristi prilikom jednog prolaza kroz neuralnu mrežu u oba smjera tokom procesa obučavanja.

Veličina podskupa ima značajan uticaj kako na proces obučavanja, tako i na performanse modela na novim podacima. U velikom broju istraživačkih radova savjetuje se korišćenje što većeg podskupa. Glavni argument za ovo je maksimalno iskorišćavanje mogućnosti savremenih grafičkih procesorskih jedinica (eng. *Graphics Processing Unit*, GPU). Međutim, korišćenje velikih podskupova povećava rizik od preprilagođavanja, koje se manifestuje slabom sposobnošću generalizacije neuralne mreže. U [138] je pokazano da se ovaj problem može riješiti postepenim povećavanjem stope učenja tokom procesa obučavanja. Prema tome, jedna od strategija je korišćenje što većeg podskupa sa postepenim povećavanjem stope učenja. Ako je sposobnost generalizacije nakon obučavanja niska, preporučuje se ponovno obučavanje neuralne mreže sa manjim podskupovima.

Metode regularizacije

Metode regularizacije koriste se za smanjenje preprilagođavanja u modelima mašinskog učenja, uključujući neuralne mreže. Regularizacija pomaže modelima da nauče opšte obrasce u podacima, što povećava njihovu sposobnost generalizacije. Najčešće korišćene metode regularizacije su L_1 i L_2 regularizacija, slučajno isključivanje neurona i rano zaustavljanje.

L_1 regularizacija podrazumijeva dodavanje penalizacionog člana funkciji gubitka, koji predstavlja skaliranu sumu apsolutnih vrijednosti parametara neuralne mreže. Slično, kod L_2 regularizacije se funkciji gubitka dodaje skalirana suma kvadrata parametara neuralne mreže. Iako je princip L_1 i L_2 regularizacije identičan, njihov uticaj na proces obučavanja i performanse neuralne mreže se značajno razlikuje. L_1 regularizacija rezultira velikim brojem nultih parametara, čime se biraju najvažnije karakteristike podataka i smanjuje kompleksnost modela. Sa druge strane, L_2 regularizacija rezultira ravnomjernim smanjenjem parametara modela, što povećava stabilnost modela, posebno kada su karakteristike korelisane. Obje metode regularizacije uvode dodatni hiperparametar u vidu faktora penalizacije λ .

Slučajno isključivanje neurona (eng. *dropout*) predstavlja jednu od najpopularnijih metoda regularizacije. Kod ovog pristupa, u svakom koraku procesa obučavanja, svi neuroni osim neurona u izlaznom sloju mogu biti isključeni sa vjerovatnoćom p . U konkretnom koraku, isključeni neuroni se u potpunosti ignorišu, da bi se opet aktivirali u nekom od narednih koraka. Ova metoda sprečava stvaranje pretjerane zavisnosti između neurona i podstiče mrežu da nauči robusnije karakteristike podataka. Iako kontraintuitivan, ovaj pristup poboljšava performanse i najsavremenijih neuralnih mreža [139]. Kao i L_1 i L_2 regularizacija, i ovaj pristup uvodi dodatni hiperparametar u vidu stope slučajnog isključivanja neurona (eng. *dropout rate*).

Rano zaustavljanje (eng. *early stopping*) prati performanse modela na validacionom skupu podataka i zaustavlja proces obučavanja kada performanse na validacionom skupu počnu da opadaju, čak i ako gubitak na skupu za obučavanje nastavlja da se smanjuje. Obučavanje se najčešće ne zaustavlja neposredno nakon pogoršanja performansi na validacionom skupu podataka, već se dozvoljava pogoršanje performansi u nekoliko uzastopnih epoha. Ovaj broj epoha naziva se strpljenjem (eng. *patience*). Nakon pogoršanja performansi mreže u nekoliko uzastopnih epoha, obučavanje se zaustavlja, a vrijednosti parametara mreže postavljaju se na vrijednosti kojima odgovaraju najbolje performanse na validacionom skupu podataka. Ovaj pristup sprječava preprilagođavanje mreže i osigurava da se proces obučavanja zaustavi u trenutku kada su performanse na validacionom skupu optimalne.

Optimizacija hiperparametara

Optimizacija hiperparametara predstavlja ključni korak u procesu obučavanja, jer izbor odgovarajućih vrijednosti hiperparametara značajno utiče na performanse neuralne mreže. U literaturi je dostupan veliki broj različitih metoda za optimizaciju hiperparametara neuralnih mreža, od kojih su najčešće korišćene metode pretraživanje po mreži, slučajno pretraživanje i Bajesovska optimizacija.

Pretraživanje po mreži (eng. *grid search*) podrazumijeva sistematsko ispitivanje svih mogućih kombinacija hiperparametara čije su vrijednosti unaprijed definisane na diskretnom skupu. Pretraživanje po mreži garantuje pronalaženje globalnog optimuma unutar unaprijed definisanog diskretnog prostora pretraživanja. Međutim, proračunska složenost ovog pristupa je direktno proporcionalna veličini prostora pretraživanja i može predstavljati ograničavajući faktor kada je potrebno optimizovati veliki broj hiperparametara neuralne mreže.

Umjesto iscrpnog pretraživanja svih mogućih kombinacija hiperparametara, slučajno pretraživanje (eng. *random search*) podrazumijeva ispitivanje unaprijed definisanog broja kombinacija koje se slučajno uzorkuju iz prostora pretraživanja. Prostor pretraživanja može biti diskretan, kao u slučaju pretraživanja po mreži, ili kontinualan, gdje se vrijednosti hiperparametara uzorkuju iz odgovarajućih funkcija raspodjele. Slučajno pretraživanje omogućava ispitivanje značajno većeg broja vrijednosti kontinualnih hiperparametara, što teorijski omogućava postizanje boljih performansi od pretraživanja po mreži. Ipak, performanse slučajnog pretraživanja zavise od broja razmatranih kombinacija hiperparametara, čijim se podešavanjem pravi kompromis između performansi i proračunske složenosti.

Bajesovska optimizacija (eng. *Bayesian optimization*) je metoda namijenjena globalnoj optimizaciji *black-box* funkcija čiju evaluaciju karakteriše visoka proračun-

ska složenost. Kod problema optimizacije hiperparametara, Bajesovska optimizacija formira probabilistički model koji povezuje hiperparametre sa funkcijom gubitka. U jednoj iteraciji, Bajesovska optimizacija ispituje obećavajuću kombinaciju hiperparametara i ažurira probabilistički model na osnovu vrijednosti funkcije gubitka. Na ovaj način se, kroz više iteracija, utvrđuje optimalna kombinacija hiperparametara, koja minimizuje vrijednost funkcije gubitka na validacionom skupu podataka. U praksi, Bajesovska optimizacija ima superiorne performanse u odnosu na pretraživanje po mreži i slučajno pretraživanje, uz manju proračunsku složenost.

4.6.4 Struktura adaptivnog sistema

Kao što je ranije objašnjeno, kontrolabilnost i opservabilnost kritičnih oscilatornih modova, kao i uglovi reziduuma funkcije prenosa sistema u otvorenoj sprezi, variraju sa radnim uslovima u elektroenergetskom sistemu. Promjene ugla reziduuma zahtijevaju promjene fazne karakteristike kontrolera za prigušenje oscilacija, kako bi se kritične svojstvene vrijednosti pomjerile ka lijevoj poluravni. Sa druge strane, promjene kontrolabilnosti i opservabilnosti kritičnih oscilatornih modova zahtijevaju promjenu pojačanja kontrolera, kako bi se postigla zadovoljavajuća vrijednost faktora prigušenja.

U svakodnevnom pogonu, parametri dinamičkih modela elemenata elektroenergetskog sistema se mogu smatrati konstantnim. Prema tome, promjene modalne strukture elektroenergetskog sistema posljedica su promjena konfiguracije elektroenergetske mreže i promjena ukupne potrošnje i proizvodnje i njihove geografske raspodjele. Obje vrste promjena manifestuju se promjenama modula i faznih stavova napona u čvorovima sistema, kao i promjenama tokova aktivnih i reaktivnih snaga po granama mreže. Prema tome, iako nije moguće identifikovati jednostavnu zavisnost, intuitivno je jasno da se moduli i fazni stavovi napona u čvorovima sistema, odnosno tokovi aktivnih i reaktivnih snaga po granama mreže, mogu koristiti za predviđanje parametara kontrolera za prigušenje oscilacija.

Monitoring tokova snaga i naponskih prilika u elektroenergetskom sistemu moguće je zahvaljujući postojanju specijalizovanih sistema za daljinski nadzor i upravljanje (eng. *Supervisory Control and Data Acquisition*, SCADA). Iako se SCADA sistemi koriste još od šezdesetih godina prošlog vijeka, njihova primjena u monitoringu tokova snaga suočena je sa brojnim izazovima. Prije svega, mjerni uređaji unose mjerne greške slučajnog karaktera. Mjerne greške najčešće odgovaraju klasi tačnosti mjernog uređaja, međutim, u slučaju oštećenja mjernog uređaja ili njegovog inverznog priključka, mjerenja mogu biti praktično neupotrebljiva. Pored nesavršenosti mjernih uređaja, komunikacioni kanali kojima se mjerni signali prenose do centra

upravljanja unose komunikaciono kašnjenje i šum, a poseban problem nastaje u slučaju njihovog prekida. Na kraju, SCADA mjerenja nijesu vremenski sinhronizovana. Iako je pokrivenost prenosnih mreža uređajima za sinhronizovano mjerenje fazora sve veća, monitoring tokova snaga i naponskih prilika i dalje nije moguć samo na bazi fazorskih mjerenja. Zbog navedenih razloga, sirova SCADA mjerenja se ne mogu koristiti za predviđanje parametara kontrolera za prigušenje oscilacija.

Kako bi se obezbijedilo precizno praćenje njihovog fizičkog stanja u realnom vremenu, savremeni elektroenergetski sistemi opremljeni su estimatorom stanja. Estimator stanja je matematički algoritam koji se koristi za pretvaranje redundantnih mjernih podataka u pouzdanu procjenu vektora stanja. Matematički, model elektroenergetskog sistema za estimaciju stanja formuliše se preko modela mjerenja [140]:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (4.22)$$

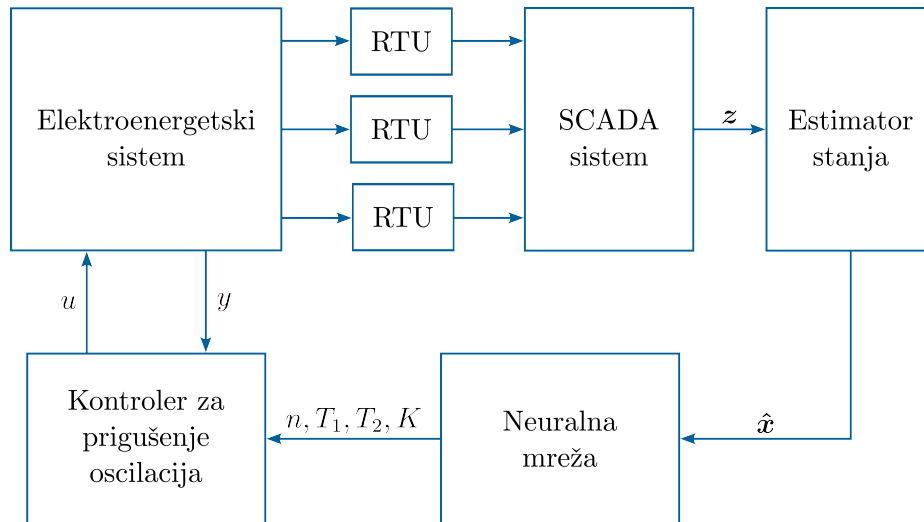
gdje $\mathbf{h}(\mathbf{x})$ predstavlja nelinearnu vektorsku funkciju koja povezuje vektor stanja $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ i vektor mjerenja $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$, a $\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)^T$ predstavlja vektor slučajnih grešaka mjerenja, za koji se pretpostavlja da podliježe normalnoj raspodjeli nulte srednje vrijednosti i odgovarajuće matrice kovarijansi $\mathbf{R} = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2)$. Problem estimacije stanja se tada formuliše kao optimizacioni problem:

$$\min_{\hat{\mathbf{x}}} J = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})] \quad (4.23)$$

čijim se rješavanjem određuje najbolja procjena vektora stanja $\hat{\mathbf{x}}$. Mada je implicitno podrazumijevano, ovakav model odgovara statičkoj estimaciji stanja, pa vektor stanja uključuje module i fazne stavove napona u svim čvorovima sistema.

Kao rezultat estimatora stanja, vektor stanja nosi značajno pouzdanije informacije o stanju sistema u odnosu na sirova SCADA mjerenja. Štaviše, što je broj redundantnih mjerenja veći, to je procjena vektora stanja bliža stvarnom stanju sistema. Rezolucija SCADA mjerenja se u savremenim elektroenergetskim sistemima obično kreće od 2 do 10 sekundi [141]. Ažuriranje vektora stanja je nešto sporije i, u zavisnosti od elektroenergetskog sistema, sprovodi se na svakih nekoliko sekundi do nekoliko minuta [142]. Prema tome, procjena vektora stanja se može koristiti za periodično ažuriranje parametara kontrolera za prigušenje oscilacija u skladu sa promjenama radnog režima u elektroenergetskom sistemu.

Struktura adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija predstavljena je na Slici 4.7. SCADA sistem pomoću jedinica udaljenih terminala (eng. *Remote Terminal Unit*, RTU) prikuplja podatke iz elektroenergetskog sistema i prenosi ih do centra upravljanja putem komunikacione infrastrukture. Estimator stanja obrađuje mjer-



Slika 4.7: Struktura adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija

ne podatke iz elektroenergetskog sistema z i daje pouzdanu procjenu vektora stanja. Na osnovu procijenjenog vektora stanja \hat{x} , neuralna mreža predviđa optimalne parametre kontrolera, koji rezultiraju adekvatnim prigušenjem kritičnih oscilatornih modova. Kontroler za prigušenje oscilacija ima strukturu klasičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema dizajniranog primjenom metode reziduuma. Zbog jednostavnosti, adaptivni kompenzator kašnjenja se implicitno podrazumijeva.

Prednost ovakvog pristupa je što kontroler za prigušenje oscilacija zadržava strukturu klasičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema, koji se uspješno koriste za prigušenje lokalnih oscilacija već više od šezdeset godina. Međutim, umjesto *fit and forget* pristupa kod kojeg se kontroler dizajnira primjenom metode reziduuma za jedan operativni scenario, neuralna mreža omogućava prilagođavanje parametara kontrolera aktuelnim radnim uslovima u elektroenergetskom sistemu. Kao što će biti pokazano u narednom poglavlju, ovim se postiže adekvatno prigušenje kritičnih oscilatornih modova na širem spektru operativnih scenarija.

Proširenje sistema za prigušenje oscilacija neuralnom mrežom za prilagođavanje parametara kontrolera povećava njegovu kompleksnost. Međutim, ovakav sistem se i dalje može smatrati decentralizovanim, jer rad pojedinačnih kontrolera nije koordinisan u realnom vremenu. Uz to, s obzirom na socio-ekonomske posljedice oscilatorne nestabilnosti, povećanje kompleksnosti uz poboljšanje performansi sistema za prigušenje oscilacija je više nego opravdano.

Na kraju, neuralne mreže u sistem za prigušenje oscilacija unose problem interpretabilnosti i visoke zahtjeve u pogledu podataka za obučavanje. Što se tiče problema interpretabilnosti, isti je manje izražen nego u slučaju ostalih inteligentnih pristupa u literaturi, jer kontroler za prigušenje oscilacija zadržava strukturu

klasičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema. Sa druge strane, kao što će biti pokazano u nastavku, skup podataka za obučavanje neuralne mreže se lako formira u simulacionom okruženju.

4.6.5 Priprema podataka za obučavanje

Kao što se uočava iz strukture inteligentnog sistema za za prigušenje oscilacija, ulazne karakteristike neuralne mreže predstavljaju estimirane promjenljive stanja elektroenergetskog sistema. Sa druge strane, izlazne karakteristike neuralne mreže predstavljaju parametre kontrolera za prigušenje oscilacija, uključujući broj *lead-lag* blokova n , vremenske konstante T_1 i T_2 , kao i pojačanje K . Prema tome, jedan uzorak za obučavanje neuralne mreže predstavlja kombinaciju modula i faznih stavova napona u čvorovima sistema sa jedne strane i parametara kontrolera za prigušenje oscilacija sa druge strane.

Kako bi se obezbijedile dobre performanse neuralne mreže u praksi, skup podataka treba da što bolje predstavi realne uslove rada. U tom kontekstu, podaci za obučavanje generisani su uzimajući u obzir različite operativne scenarije u elektroenergetskom sistemu, različite nivoe zašumljenosti mjerenja i prisustvo velikih mjernih grešaka. Procedura za generisanje podataka za obučavanje neuralne mreže sastoji se od šest koraka:

1. U prvom koraku se, u skladu sa odgovarajućim funkcijama raspodjele, slučajno generišu konfiguracija mreže, ukupna potrošnja, kao i raspodjela ukupne potrošnje i proizvodnje u elektroenergetskom sistemu. U situaciji kada postoje iscrpni istorijski podaci o elektroenergetskom sistemu, slučajno generisani scenariji mogu se zamijeniti realnim operativnim scenarijima.
2. U drugom koraku se, za prethodno generisan scenario elektroenergetskog sistema, sprovodi proračun tokova snaga. Koristeći rezultate proračuna tokova snaga, formira se vektor mjerenja \mathbf{z} , koji odgovara mjerenoj konfiguraciji u elektroenergetskom sistemu. Ako proračun tokova snaga ne konvergira, procedura se ponavlja od prvog koraka. U suprotnom se procedura nastavlja.
3. Zbog nesavršenosti mjernih uređaja i komunikacionih kanala između jedinica udaljenih terminala i centra upravljanja, SCADA mjerenja su u manjoj ili većoj mjeri zašumljena. Iz tog razloga se, u trećem koraku, vektoru mjerenja \mathbf{z} dodaje mjerni šum. Ustaljena pretpostavka je da mjerni šum prati normalnu raspodjelu. Međutim, u [81] je pokazano da je mjerni šum u elektroenergetskim sistemima bliži Laplasovoj ili Studentovoj raspodjeli. U skladu sa ovim, u ovoj disertaciji je mjerni šum predstavljen Studentovom raspodjelom.

4. Pored malih, slučajnih grešaka mjerenja, vrijednosti mjerenih veličina se mogu značajno razlikovati od njihovih stvarnih vrijednosti. Tipični razlozi za ovo su oštećenje mjernog uređaja, uticaji iz okoline, kao i ljudske greške. Velike mjerne greške mogu imati značajan uticaj na kvalitet estimacije stanja, posebno kada je broj redundantnih mjerenja nizak. Prema tome, u četvrtom koraku se slučajno odabranim mjerenjima unose velike mjerne greške, koje se slučajno uzorkuju u skladu sa uniformnom raspodjelom.
5. U petom koraku se, koristeći informacije o konfiguraciji mreže i parametrima mrežnih elemenata, kao i zašumljena mjerenja, rješava problem estimacije stanja. Određivanjem optimalne procjene vektora stanja $\hat{\mathbf{x}}$, određuju se ulazne karakteristike za konkretni uzorak iz skupa podataka za obučavanje neuralne mreže.
6. U šestom koraku se, za posmatrani scenario elektroenergetskog sistema, dizajnira kontroler za prigušenje oscilacija primjenom metode reziduuma. Podrazumijeva se da je prije početka procedure odabrana upravljačka petlja za prigušenje oscilacija, vodeći računa o robusnosti kontrolera i mogućnosti simultanog prigušenja više oscilatornih modova. Određivanjem parametara kontrolera za prigušenje oscilacija, određuju se izlazne karakteristike za konkretni uzorak iz skupa podataka za obučavanje neuralne mreže.

Ponavljanjem prethodne procedure u simulacionom okruženju, formira se skup podataka za obučavanje neuralne mreže. Broj potrebnih uzoraka zavisi od prirode samog problema. U opštem slučaju, povećavanjem broja uzoraka se poboljšavaju performanse neuralne mreže. Ipak, pri određenoj veličini skupa podataka za obučavanje, daljim povećavanjem broja uzoraka se degradiraju performanse neuralne mreže. Iz tog razloga, često se optimalan broj uzoraka utvrđuje eksperimentalnim putem.

Glava 5

Analiza performansi predloženih metoda

Ne traži da se stvari dešavaju onako kako želiš, već želi da se dešavaju onako kako se dešavaju i bićeš spokojan.

Epiktet, Priručnik, 8

U ovom poglavlju predstavljene su rezultati primjene predloženih metoda za dizajn sistema za prigušenje oscilacija. Zbog jednostavnosti, osnovni koncepti objašnjeni su na Kundurovom dvozonskom sistemu. Nakon toga, primjena predloženih metoda na realne elektroenergetske sisteme demonstrirana je na dinamičkom ekvivalentu elektroenergetskog sistema regije Nove Engleske i države Njujork.

5.1 Studija slučaja: Kundurov dvozonski sistem

Kundurov dvozonski sistem predstavlja jedan od najčešće korišćenih testnih elektroenergetskih sistema u oblasti stabilnosti. Struktura i karakteristike sistema opisane su u Poglavlju 2, gdje je isti korišćen za verifikaciju razvijenih metoda za proračun tokova snaga, analizu statičke i tranzijentne stabilnosti.

Podsjećanja radi, u testnom elektroenergetskom sistemu su svi sinhroni generatori opremljeni statičkim pobudnim sistemima sa visokom vrijednošću tranzijentnog pojačanja. Kao što je prikazano u Tabeli 5.1, ako pobudni sistemi nijesu opremljeni stabilizatorima elektroenergetskog sistema, lokalni modovi u sistemu su slabo prigušeni, dok je među-zonski mod nestabilan. Kako generatori 2 i 4 predstavljaju dominantne generatore u svojim oblastima, na njima će biti implementirani stabilizatori elektroenergetskog sistema s ciljem prigušenja lokalnih oscilacija.

Tabela 5.1: Modalna analiza dvozonkog sistema bez stabilizatora

Mod	Svojtvena vrijednost	Frekvencija [Hz]	Faktor prigušenja
1	$0,0150 \pm j3,8602$	0,6143	-0,0039
2	$-0,6009 \pm j7,2741$	1,1577	0,0823
3	$-0,5813 \pm j7,4747$	1,1896	0,0775

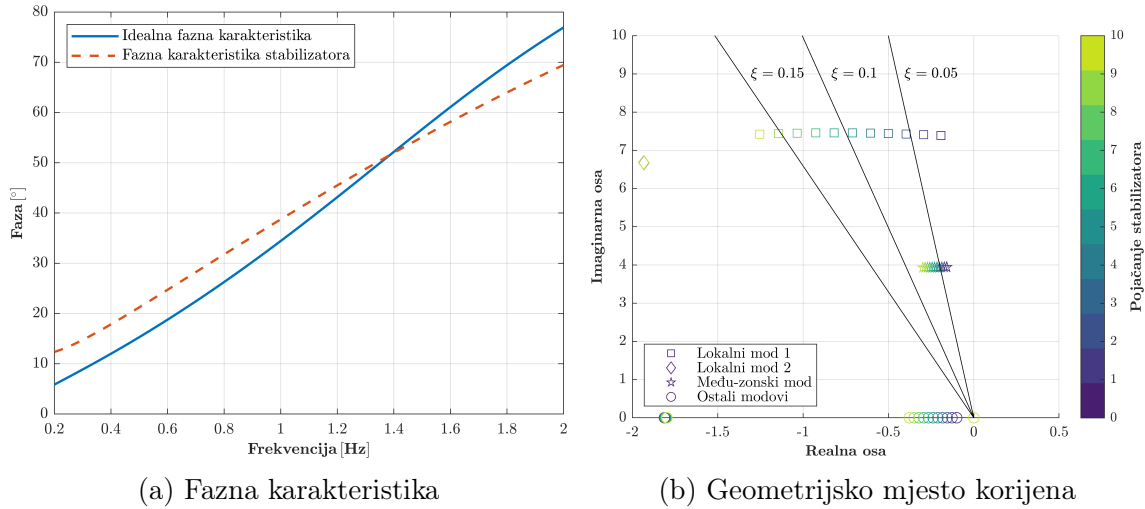
Metoda za dizajn stabilizatora elektroenergetskog sistema koja je našla najveću primjenu u praksi je metoda fazne kompenzacije [18]. Metoda fazne kompenzacije zasniva se na činjenici da djelovanje stabilizatora elektroenergetskog sistema mora rezultirati komponentom elektromagnetnog momenta na osovini rotora koja je u fazi sa odstupanjem brzine obrtanja rotora sinhronog generatora. Kako bi ovo bilo moguće, fazna karakteristika stabilizatora mora biti podešena tako da, u frekventnom opsegu od interesa, kompenzuje fazno kašnjenje funkcije prenosa između referentnog napona pobudnog sistema i elektromagnetog momenta na osovini rotora. Ovo se postiže rješavanjem optimizacionog problema:

$$\min_{T_1, T_2} \sum_{\omega} \left(H(j\omega) - \hat{H}(j\omega) \right)^2 \quad (5.1)$$

kojim se vremenske konstante stabilizatora T_1 i T_2 podešavaju tako da se minimizuje odstupanje fazne karakteristike stabilizatora $H(j\omega)$ od idealne karakteristike $\hat{H}(j\omega)$ u frekventnom opsegu od interesa za elektromehaničke oscilacije. Nakon određivanja fazne karakteristike stabilizatora, pojačanje stabilizatora određuje se formiranjem geometrijskog mjesta korijena sistema za različite vrijednosti pojačanja.

Primjena metode fazne kompenzacije biće demonstrirana na primjeru generatora 2. Idealna fazna karakteristika koju stabilizator treba da obezbijedi prikazana je na Slici 5.1a punom linijom. Rješavanjem optimizacionog problema opisanog jednačinom (5.1), dolazi se do vremenskih konstanti stabilizatora $T_1 = 0,0462$ s i $T_2 = 0,01$ s. Ovako određene vremenske konstante rezultiraju faznom karakteristikom koja je na Slici 5.1a prikazana isprekidanom linijom.

Geometrijsko mjesto korijena sistema za različite vrijednosti pojačanja stabilizatora prikazano je na Slici 5.1b. Kao što se uočava, povećanjem vrijednosti pojačanja, svojstvena vrijednost koja odgovara lokalnom modu oblasti 1 pomjera se dalje ka lijevoj poluravni. Pojačanje $K = 7$ rezultira adekvatnim prigušenjem lokalnog moda oblasti 1, uz rezervu na strani sigurnosti. Kao što se uočava, stabilizator u značajno manjoj mjeri utiče na među-zonski oscilatorni mod, što je posljedica niske opservabilnosti među-zonskih oscilacija u lokalnim mjerenjima.



Slika 5.1: Dizajn stabilizatora elektroenergetskog sistema za generator 2

Važno je naglasiti da se svojstvene vrijednosti sistema prikazane na Slici 5.1b za $K = 0$ razlikuju od onih prikazanih u Tabeli 5.1. Ovo je posljedica činjenice da se svojstvene vrijednosti prikazane u Tabeli 5.1 odnose na nominalni operativni scenario, koji je najčešće razmatran u literaturi. Nasuprot tome, dizajn stabilizatora sprovodi se uz pretpostavku kritičnog scenarija koji rezultira minimalnom vrijednošću prigušnog momenta, čime se proširuje margina stabilnosti sistema.

Primjenom iste metode na generator 4, dolazi se do parametara stabilizatora koji rezultiraju adekvatnim prigušenjem lokalnog moda oblasti 2. Dok vremenske konstante stabilizatora iznose $T_1 = 0,1091 s$ i $T_2 = 0,01 s$, potrebno pojačanje stabilizatora iznosi $K = 9$.

Rezultati modalne analize testnog sistema sa implementiranim stabilizatorima elektroenergetskog sistema na generatorima 2 i 4 predstavljeni su u Tabeli 5.2. Kao što se uočava, implementacija stabilizatora rezultirala je adekvatnim prigušenjem lokalnih oscilatornih modova. Sa druge strane, među-zonski oscilatorni mod je i dalje slabo prigušen. Prema tome, cilj razvoja sistema za prigušenje oscilacija u nastavku je prigušenje među-zonskih oscilacija u elektroenergetskom sistemu, uz minimalan uticaj na lokalne oscilatorne modove.

Tabela 5.2: Modalna analiza dvozonkog sistema sa stabilizatorima

Mod	Svojstvena vrijednost	Frekvencija [Hz]	Faktor prigušenja
1	$-0,1660 \pm j3,8511$	0,6129	0,0431
2	$-1,3040 \pm j7,4067$	1,1788	0,1734
3	$-1,4183 \pm j7,4632$	1,1878	0,1867

5.1.1 Izbor upravljačke petlje

Prvi korak kod izbora upravljačke petlje je definisanje skupa mjernih signala koji se mogu koristiti za monitoring oscilacija. Rezultati analiza sprovedenih tokom izrade ove disertacije ukazuju da brzine obrtanja rotora i razlike brzina obrtanja rotora generatora pružaju najveću opservabilnost među-zonskih oscilacija. Međutim, ovi signali takođe rezultiraju najvećom interakcijom upravljačke petlje sa ostalim modovima u sistemu. Dodatno, brzine obrtanja rotora generatora nijesu direktno dostupne, već zahtijevaju estimaciju na osnovu fazorskih mjerenja primjenom specijalnih metoda, kao što su metode predložene u [143] i [144]. Kako ovo značajno komplikuje strukturu sistema za prigušenje oscilacija, u ovoj disertaciji će kao mjerni signali biti razmatrani signali koji su direktno dostupni ili se lako određuju na osnovu fazorskih mjerenja. U skladu sa tim, skup potencijalnih mjernih signala obuhvata: struje i aktivne snage grana, module i fazne stavove napona u čvorovima, razlike faznih stavova napona u čvorovima, kao i aktivne snage generatora.

Nakon definisanja skupa potencijalnih mjernih signala, neophodno je odrediti i skup potencijalnih upravljačkih uređaja koji mogu djelovati na prigušenje oscilacija. U Kundurovom dvozonskom sistemu, jedini kontrolabilni uređaji su sinhroni generatori. S obzirom na brzinu djelovanja i širinu regulacionog opsega, pobudni sistemi sinhronih generatora predstavljaju bolji izbor za prigušenje oscilacija u odnosu na turbine i primarne turbinske regulatore. Prema tome, kao potencijalni aktuatori u sistemu za prigušenje oscilacija će biti razmotreni pobudni sistemi sinhronih generatora. Da bi se izbjegle potencijalne interakcije kontrolera za prigušenje oscilacija sa postojećim stabilizatorima elektroenergetskog sistema, za prigušenje među-zonskih oscilacija će biti razmotreni generatori 1 i 3.

Ispitivanjem svih mogućih kombinacija mjernih signala i aktuatora, određene su upravljačke petlje koje obezbjeđuju adekvatnu kontrolabilnost i opservabilnost među-zonskog oscilatornog moda, uz minimalnu interakciju sa ostalim modovima u sistemu. Najbolje upravljačke petlje za različite vrste mjernih signala prikazane su u Tabeli 5.3, zajedno sa pripadajućim vrijednostima kombinovane mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti te mjere modalne interakcije. Kao što se uočava, upravljačke petlje koje obezbjeđuju najveću kontrolabilnost i opservabilnost među-zonskog oscilatornog moda kao mjerni signal koriste struju i aktivnu snagu na interkonektivnim dalekovodima, kao i razliku faznih stavova napona na sabirnicama generatora u različitim oblastima. Preostale upravljačke petlje karakterišu niže vrijednosti kombinovane mjere, što ih čini manje efikasnim za prigušenje među-zonskih oscilacija. Ipak, važno je naglasiti da se, uz značajno veće vrijednosti pojačanja kontrolera, i ove upravljačke petlje mogu koristiti za prigušenje oscilacija.

Tabela 5.3: Potencijalne upravljačke petlje u dvozonskom sistemu

Upravljačka petlja	Kombinovana mjera	Mjera interakcije
$V_{REF3} \rightarrow I_{7-8}$	1	0,1747
$V_{REF3} \rightarrow P_{8-9}$	0,9838	0,1693
$V_{REF1} \rightarrow \theta_1 - \theta_3$	0,8737	1
$V_{REF1} \rightarrow \theta_3$	0,5325	0,1270
$V_{REF1} \rightarrow P_{G1}$	0,2964	0,2747
$V_{REF1} \rightarrow V_8$	0,1629	0,5676

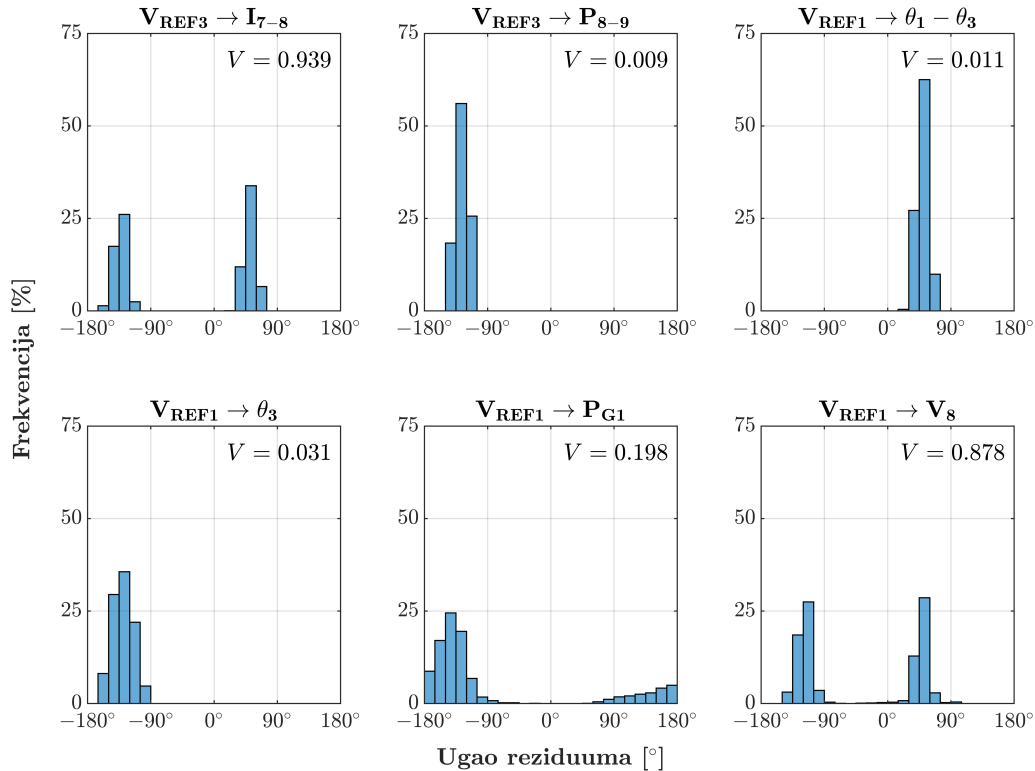
Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, pored visoke kontrolabilnosti i opservabilnosti kritičnog moda i niske interakcije sa ostalim modovima u sistemu, upravljačku petlju mora karakterisati i niska varijabilnost ugla reziduuma. Kako bi se ispitala varijabilnost ugla reziduuma za potencijalne upravljačke petlje u dvozonskom sistemu, modalna analiza sistema sprovedena je za 10.000 različitih operativnih scenarija. Operativni scenariji su slučajno generisani tako da obuhvate:

- Mrežne konfiguracije sa 2, 3 ili 4 interkonektivna dalekovoda u pogonu,
- Ukupnu potrošnju u sistemu u opsegu od 2.000 do 3.000 MW, kao i
- Različite raspodjele ukupne potrošnje i proizvodnje između oblasti, što rezultira različitim snagama razmjene na interkonektivnim dalekovodima.

Histogrami ugla reziduuma različitih upravljačkih petlji u različitim operativnim scenarijima dvozonskog sistema predstavljani su na Slici 5.2.

Kao što se može uočiti, uglovi reziduuma svih upravljačkih petlji pokazuju određeni nivo varijabilnosti. Upravljačke petlje koje koriste tok aktivne snage, fazni stav ili razlike faznih stavova napona u čvorovima sistema kao mjerni signal karakteriše relativno nizak nivo varijabilnosti ugla reziduuma. Sa druge strane, preostale upravljačke petlje karakteriše značajno veća varijabilnost ugla reziduuma, što ih čini neprikladnim za primjenu u sistemima za prigušenje oscilacija, ako se kontroleri za prigušenje oscilacija dizajniraju primjenom metode reziduuma.

Kako bi se ilustrovalo ovo ograničenje, detaljnije će biti razmotren histogram ugla reziduuma upravljačke petlje $V_{REF3} \rightarrow I_{7-8}$. Kao što se može uočiti, u većini operativnih scenarija ugao reziduuma uzima vrijednosti od 40° do 60° . Uz pretpostavku srednje vrijednosti od 50° , kontroler za prigušenje oscilacija mora obezbijediti fazni pomjeraj od 130° na učestanosti među-zonskog moda kako bi se pripadajuća svojstvena vrijednost pomjerila ka lijevoj poluravni. Međutim, u operativnim scenarijima u kojima ugao reziduuma uzima vrijednosti od -140° do -120° , ovako dizajniran kontroler rezultirao bi pomjeranjem svojstvene vrijednosti koja odgovara među-zonskom



Slika 5.2: Histogrami ugla reziduuma upravljačkih petlji u dvozonskom sistemu

oscilatornom modu ka desnoj poluravni. Drugim riječima, djelovanje ovako dizajniranog kontrolera bi u određenim operativnim scenarijima rezultiralo prigušenjem, a u drugim amplifikovanjem među-zonskih oscilacija. Prema tome, jasno je da upravljačke petlje sa visokom varijabilnošću ugla reziduuma ne predstavljaju dobar izbor za prigušenje među-zonskih oscilacija u različitim operativnim scenarijima.

S obzirom na vrijednosti kružne varijanse ugla reziduuma, upravljačke petlje $V_{REF3} \rightarrow P_{8-9}$, $V_{REF1} \rightarrow \theta_1 - \theta_3$ i $V_{REF1} \rightarrow \theta_3$ predstavljaju najbolji izbor za prigušenje među-zonskog oscilatornog moda. Među njima, upravljačka petlja $V_{REF3} \rightarrow P_{8-9}$ pruža najveću kontrolabilnost i opservabilnost posmatranog moda, uz relativno nisku interakciju sa ostalim modovima u sistemu. Iz tog razloga, ona će u nastavku biti korišćena za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija.

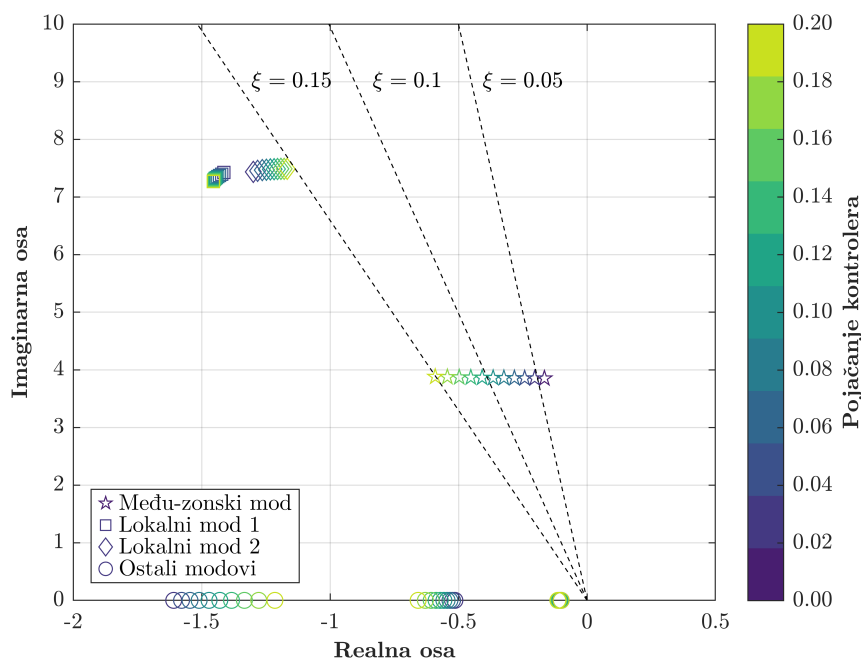
5.1.2 Dizajn kontrolera primjenom metode reziduuma

Nakon izbora upravljačke petlje, sljedeći korak u dizajnu sistema za prigušenje oscilacija je dizajn samog kontrolera. Na početku, fazna karakteristika kontrolera za prigušenje oscilacija podešava se na osnovu vrijednosti ugla reziduuma funkcije prenosa sistema u otvorenoj sprezi. Pri tom, prilikom formiranja funkcije prenosa sistema u otvorenoj sprezi, neophodno je uzeti u obzir adaptivni kompenzator kašnjenja.

U nominalnom operativnom scenariju, ugao reziduuma funkcije prenosa sistema u otvorenoj sprezi $V_{REF3} \rightarrow P_{8-9}$ iznosi $-137,55^\circ$. Kako bi se svojstvena vrijednost koja odgovara među-zonskom oscilatornom modu pomjerala ka lijevoj poluravni, kontroler za prigušenje oscilacija mora uvesti fazno kašnjenje od $42,45^\circ$ na učestanosti među-zonskog moda. Kako jedan *lead-lag* blok u praksi može obezbijediti do 45° fazne kompenzacije, kontroler za prigušenje oscilacija se u ovom slučaju sastoji od visokopropusnog filtra i jednog *lead-lag* bloka. Zamjenom vrijednosti $\psi = 42,45^\circ$ i $n = 1$ u jednačinu (4.15), određuju se vremenske konstante kontrolera za prigušenje oscilacija $T_1 = 0,1104 s$ i $T_2 = 0,6108 s$. Za vrijednost vremenske konstante visokopropusnog filtra usvojena je tipična vrijednost $T_W = 10 s$.

Nakon podešavanja fazne karakteristike kontrolera za prigušenje oscilacija, pojačanje kontrolera određuje se formiranjem geometrijskog mjesta korijena sistema za različite vrijednosti pojačanja. Kao što se uočava sa Slike 5.3, povećavanjem pojačanja kontrolera se svojstvena vrijednost koja odgovara među-zonskom oscilatornom modu pomjera dalje ka lijevoj poluravni. Za željenu vrijednost faktora prigušenja $\xi = 0,1$, potrebno pojačanje kontrolera iznosi $K = 0,14$.

Kao što se uočava, implementacija kontrolera u određenoj mjeri utiče na lokalne oscilatorne modove. Interakciju kontrolera sa lokalnim oscilatornim modovima moguće je spriječiti dodavanjem pojasno-propusnog filtra, koji se podešava na učestanosti među-zonskog moda [74]. Ipak, u ovom slučaju ne postoji potreba za implementacijom modalnog filtra, jer su oba lokalna moda i dalje više nego adekvatno prigušena.



Slika 5.3: Geometrijsko mjesto korijena sistema za različite vrijednosti pojačanja

Kako bi se demonstrirao značaj razmatranja varijabilnosti ugla reziduuma prilikom izbora upravljačke petlje, primjenom metode reziduuma dizajniran je kontroler za prigušenje oscilacija sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja za upravljačku petlju $V_{REF3} \rightarrow I_{7-8}$. Dok su vremenske konstante jednog *lead-lag* bloka $T_1 = 0,1084 s$ i $T_2 = 0,6219 s$, potrebno pojačanje kontrolera iznosi $K = 0,12$. Očekivano, kako upravljačku petlju $V_{REF3} \rightarrow I_{7-8}$ karakteriše viša vrijednost kombinovane mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti, to je i potrebna vrijednost pojačanja kontrolera niža u odnosu na upravljačku petlju $V_{REF3} \rightarrow P_{8-9}$. Važno je naglasiti da je geometrijsko mjesto korijena sistema u nominalnom operativnom scenariju gotovo identično za obje upravljačke petlje. Ipak, u nastavku će biti pokazano da se performanse ovih sistema za prigušenje oscilacija značajno razlikuju.

Kako bi se ispitala efikasnost kontrolera za prigušenje oscilacija sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, njegove performanse će biti upoređene sa performansama kontrolera dizajniranih korišćenjem drugih pristupa za tretiranje komunikacionog kašnjenja. U kombinaciji sa metodom reziduuma, najčešće zastupljeni pristupi za tretiranje komunikacionog kašnjenja podrazumijevaju:

- Zanemarivanje komunikacionog kašnjenja prilikom dizajna kontrolera [62, 75],
- Uključivanje komunikacionog kašnjenja predstavljenog Padeovom aproksimacijom drugog reda u funkciju prenosa sistema u otvorenoj sprezi [61, 60] i
- Kompenzaciju pojačanja i faznog kašnjenja koje unosi komunikaciono kašnjenje korišćenjem *lead-lag* kompenzatora [70].

Kako nijedan od ovih pristupa za tretiranje komunikacionog kašnjenja nije adaptivan, kontroleri za prigušenje oscilacija dizajnirani su za očekivano kašnjenje od 150 milisekundi. Parametri kontrolera za prigušenje oscilacija dizajniranih primjenom navedenih pristupa za tretiranje kašnjenja predstavljeni su u Tabeli 5.4. Uz to, parametri *lead-lag* kompenzatora, koji kompenzuju pojačanje i fazno kašnjenje uzrokovano komunikacionim kašnjenjem od 150 ms, imaju vrijednosti: $T_{C1} = 0,3464 s$, $T_{C2} = 0,1919 s$ i $K_C = 0,5376$.

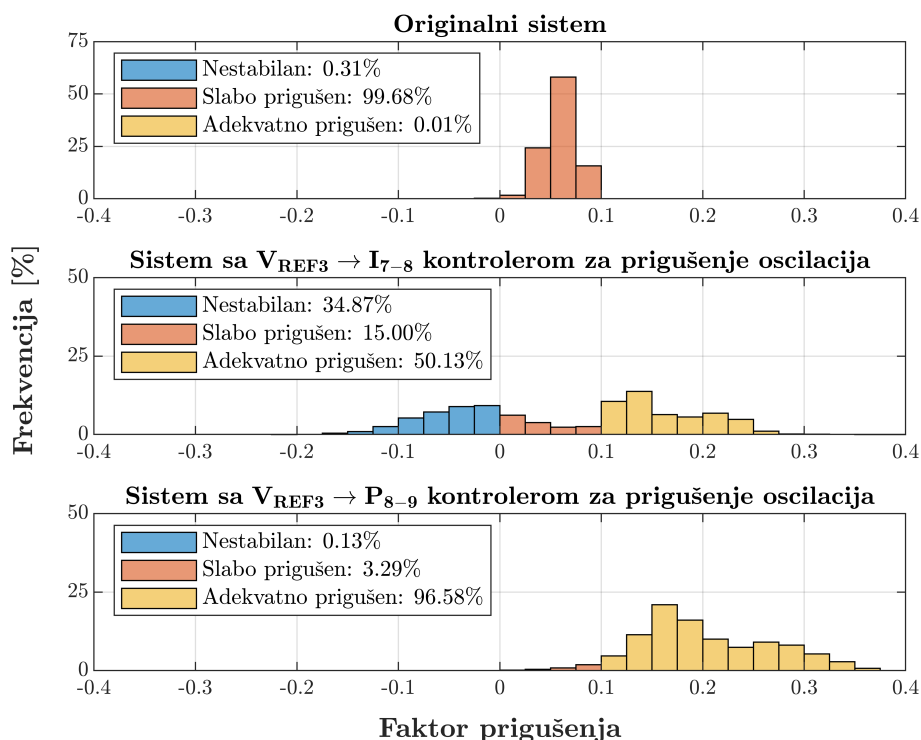
Tabela 5.4: Parametri kontrolera uz različite pristupe tretiranja kašnjenja

Parametar	Zanemareno kašnjenje	Padeova aproksimacija	Statička kompenzacija
n	3	2	3
T_1	0,1435	0,1445	0,1415
T_2	0,4700	0,4666	0,4764
K	0,34	0,17	0,32

5.1.3 Analiza statičke stabilnosti sistema

Da bi se ispitale performanse predloženog $V_{REF3} \rightarrow P_{8-9}$ kontrolera za prigušenje oscilacija, modalna analiza sprovedena je za 10.000 operativnih scenarija uvedenih u potpoglavlju 5.1.1. Prilikom analize, pretpostavljeno je prisustvo komunikacionog kašnjenja od 150 ms. Za potrebe poređenja, ista analiza sprovedena je i za testni sistem sa $V_{REF3} \rightarrow I_{7-8}$ kontrolerom za prigušenje oscilacija, kao i za originalni sistem sa lokalnim stabilizatorima elektroenergetskog sistema. Histogramski prikaz faktora prigušenja među-zonskog moda u 10.000 operativnih scenarija za posmatrane konfiguracije sistema predstavljen je na Slici 5.4.

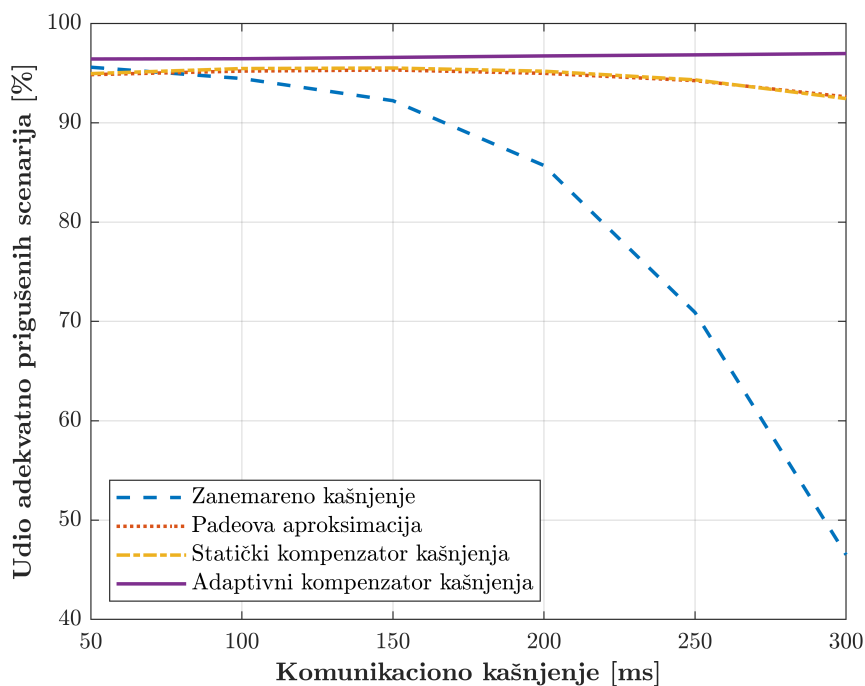
Kao što se uočava, u originalnom sistemu je među-zonski oscilatorni mod slabo prigušen u gotovo svim operativnim scenarijima. Nakon implementacije $V_{REF3} \rightarrow I_{7-8}$ kontrolera za prigušenje oscilacija, među-zonski mod je adekvatno prigušen u oko 50% operativnih scenarija. Međutim, u operativnim scenarijima u kojima je ugao reziduuma dijametralno suprotan uglu reziduuma korišćenom prilikom dizajna, djelovanje kontrolera za prigušenje oscilacija rezultira pomjeranjem svojstvene vrijednosti koja odgovara među-zonskom modu ka desnoj poluravni. Kao posljedica, među-zonski oscilatorni mod je nestabilan u oko 35% operativnih scenarija. Sa druge strane, među-zonski oscilatorni mod je adekvatno prigušen u oko 97% operativnih scenarija nakon implementacije predloženog kontrolera za prigušenje oscilacija.



Slika 5.4: Histogramski prikaz faktora prigušenja među-zonskog moda

Nakon implementacije predloženog kontrolera za prigušenje oscilacija, međuzonski oscilatorni mod je slabo prigušen u 3,29% i nestabilan u 0,13% operativnih scenarija. Kritične scenarije koji rezultiraju neadekvatnim prigušenjem međuzonskog oscilatornog moda karakteriše ekstremni deficit proizvodnje u zoni 1. Kako snaga razmjene od zone 2 ka zoni 1 raste, prigušenje kako lokalnih, tako i međuzonskog oscilatornog moda se smanjuje, što posebno dolazi do izražaja sa dva interkonektivna dalekovoda van pogona. Ovaj fenomen je posljedica dva ključna faktora. Prvo, stabilizator elektroenergetskog sistema na generatoru 2 dizajniran je za slučaj visoke proizvodnje u zoni 1 i visoke snage razmjene od zone 1 ka zoni 2. Deficit proizvodnje u zoni 1 i promjena smjera snage razmjene između zona negativno utiče na performanse stabilizatora, čak i u sistemu bez kontrolera za prigušenje oscilacija. Drugo, promjena smjera snage razmjene između zona u odnosu na nominalni operativni scenario rezultira promjenom ugla reziduuma, što u određenoj mjeri smanjuje efikasnost kontrolera za prigušenje oscilacija. Ipak, važno je naglasiti da svi kritični scenariji pripadaju ekstremnim scenarijima sa niskom vjerovatnoćom javljanja.

Kako bi se demonstrirala efikasnost predloženog $V_{REF3} \rightarrow P_{8-9}$ kontrolera za prigušenje oscilacija, modalna analiza je sprovedena za 10.000 operativnih scenarija, pri različitim nivoima komunikacionog kašnjenja. Ista analiza sprovedena je sa referentnim kontrolerima za prigušenje oscilacija dizajniranim primjenom metode reziduuma uz različito tretiranje komunikacionog kašnjenja. Performanse razvijenih kontrolera pri različitim nivoima komunikacionog kašnjenja prikazane su na Slici 5.5.

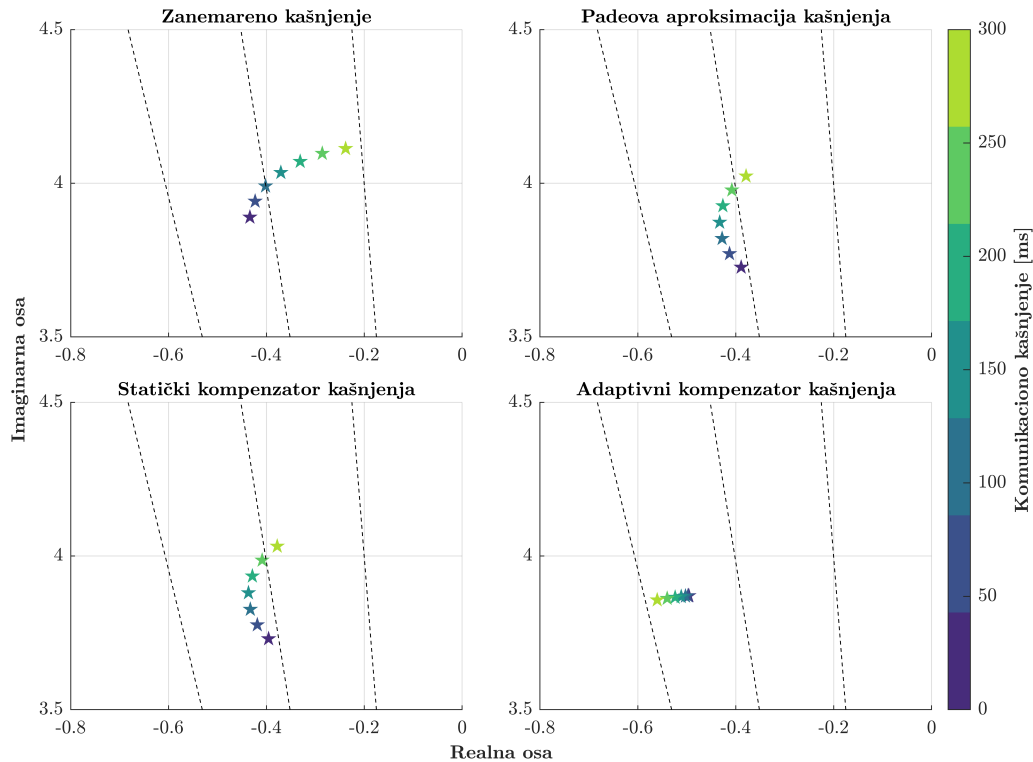


Slika 5.5: Performanse razvijenih kontrolera pri različitim nivoima kašnjenja

Kao što se uočava, kada je komunikaciono kašnjenje zanemareno prilikom dizajna, kontroler za prigušenje oscilacija rezultira adekvatnim prigušenjem oscilacija u većini scenarija pri komunikacionim kašnjenjima nižim od 100 ms. Međutim, dalji rast nivoa komunikacionog kašnjenja u značajnoj mjeri degradira performanse ovako razvijenog kontrolera za prigušenje oscilacija. Sa druge strane, ako je komunikaciono kašnjenje prilikom dizajna uključeno u funkciju prenosa sistema primjenom Padeove aproksimacije, kontroler rezultira adekvatnim prigušenjem oscilacija u najvećem broju scenarija kada nivo komunikacionog kašnjenja odgovara nivou korišćenom prilikom dizajna (u ovom slučaju 150 ms). Kako nivo komunikacionog kašnjenja odstupa od očekivanog, tako se broj adekvatno prigušenih scenarija smanjuje. Isti trend uočava se i kod kontrolera za prigušenje oscilacija sa statičkim kompenzatorom kašnjenja. I pored toga, oba pristupa rezultiraju adekvatnim prigušenjem oscilacija u više od 92,43% scenarija u posmatranom opsegu komunikacionog kašnjenja.

Za razliku od referentnih pristupa, kontroler za prigušenje oscilacija sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja pokazuje konzistentne performanse pri različitim nivoima komunikacionog kašnjenja. Štaviše, broj adekvatno prigušenih scenarija raste sa porastom komunikacionog kašnjenja. Razlog za ovaj trend leži u amplitudskoj karakteristici funkcije prenosa kompenzovanog kašnjenja, prikazanoj na Slici 4.2. Kao što je ranije objašnjeno, pojačanje funkcije prenosa kompenzovanog kašnjenja u frekventnom opsegu karakterističnom za elektromehaničke oscilatorne modove raste sa povećanjem komunikacionog kašnjenja. Kako kontroler za prigušenje oscilacija djeluje kroz funkciju prenosa kompenzovanog kašnjenja, povećanje komunikacionog kašnjenja pomjera svojstvenu vrijednost koja odgovara među-zonskom modu dalje ka lijevoj poluravni. Drugim riječima, povećanje komunikacionog kašnjenja ima sličan efekat na među-zonski mod kao i povećanje pojačanja kontrolera za prigušenje oscilacija. U konkretnom slučaju, povećanje komunikacionog kašnjenja sa 50 na 300 ms rezultira rastom udjela adekvatno prigušenih scenarija sa 96,42% na 96,97%.

Rezultati analize performansi kontrolera pri različitim nivoima komunikacionog kašnjenja saglasni su sa uticajem kašnjenja na položaj među-zonskog moda u kompleksnoj ravni, koji je prikazan na Slici 5.6. Kao što se uočava, kada je komunikaciono kašnjenje zanemareno prilikom dizajna, kritična svojstvena vrijednost pomjera se ka desnoj poluravni usljed rasta komunikacionog kašnjenja. Kada je komunikaciono kašnjenje statički kompenzovano ili uzeto u obzir primjenom Padeove aproksimacije, najveća vrijednost faktora prigušenja ostvaruje se za nivo komunikacionog kašnjenja koji je korišćen prilikom dizajna. Na kraju, kod kontrolera za prigušenje oscilacija sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, povećanje komunikacionog kašnjenja rezultira daljim pomjeranjem kritične svojstvene vrijednosti ka lijevoj poluravni.

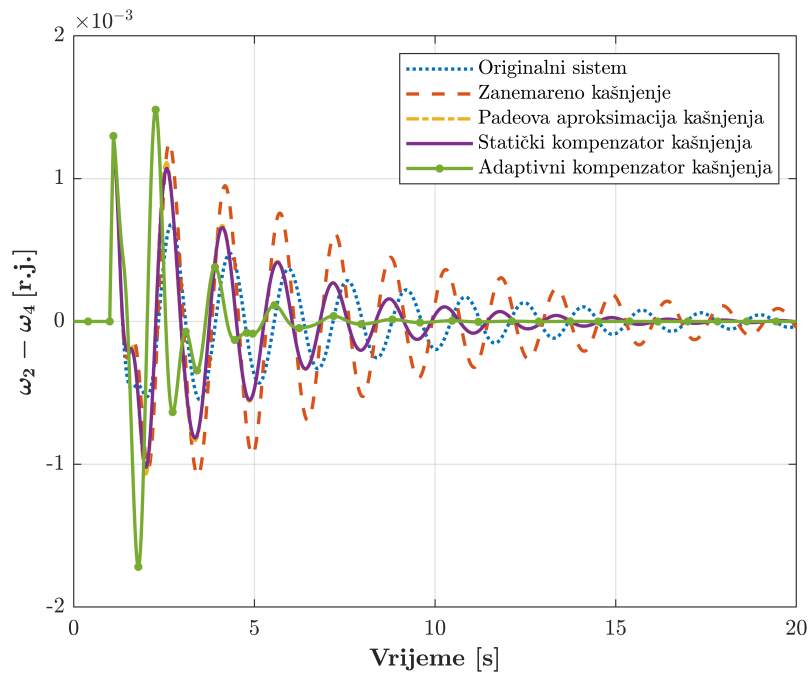


Slika 5.6: Poređenje uticaja komunikacionog kašnjenja na među-zonski mod

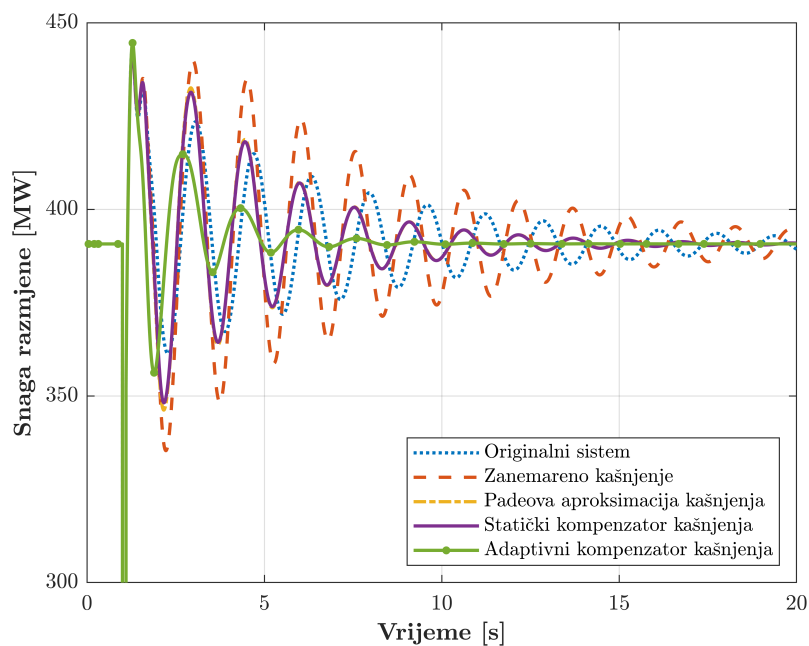
Uticaj komunikacionog kašnjenja na među-zonski oscilatorni mod pruža jasne smjernice o nivou komunikacionog kašnjenja koji je potrebno koristiti prilikom dizajna. Ako se uticaj komunikacionog kašnjenja uzima u obzir primjenom Padeove aproksimacije ili kompenzuje primjenom *lead-lag* kompenzatora, prilikom dizajna je potrebno koristiti očekivanu vrijednost komunikacionog kašnjenja. Sa druge strane, ako je kontroler za prigušenje oscilacija proširen adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, prilikom dizajna je potrebno koristiti najnižu očekivanu vrijednost komunikacionog kašnjenja.

5.1.4 Analiza tranzijentne stabilnosti sistema

Iako je primarni cilj sistema za prigušenje oscilacija unapređenje statičke stabilnosti, jednako je važno da djelovanje kontrolera za prigušenje oscilacija ne degradira dinamički odgovor sistema na velike poremećaje. Kako bi se ispitale performanse kontrolera za prigušenje oscilacija pri velikim poremećajima, simuliran je dinamički odgovor sistema na trolni kratki spoj u trajanju od 100 ms na sabirnicama 8. Tokom simulacije, komunikaciono kašnjenje stohastički varira između 100 i 300 ms, čime se simuliraju realni radni uslovi. Dinamički odgovor sistema na kratki spoj sa različitim kontrolerima za prigušenje oscilacija prikazan je na Slikama 5.7 i 5.8 kroz razliku brzine obrtanja rotora generatora 2 i 4, kao i snagu razmjene između zona.

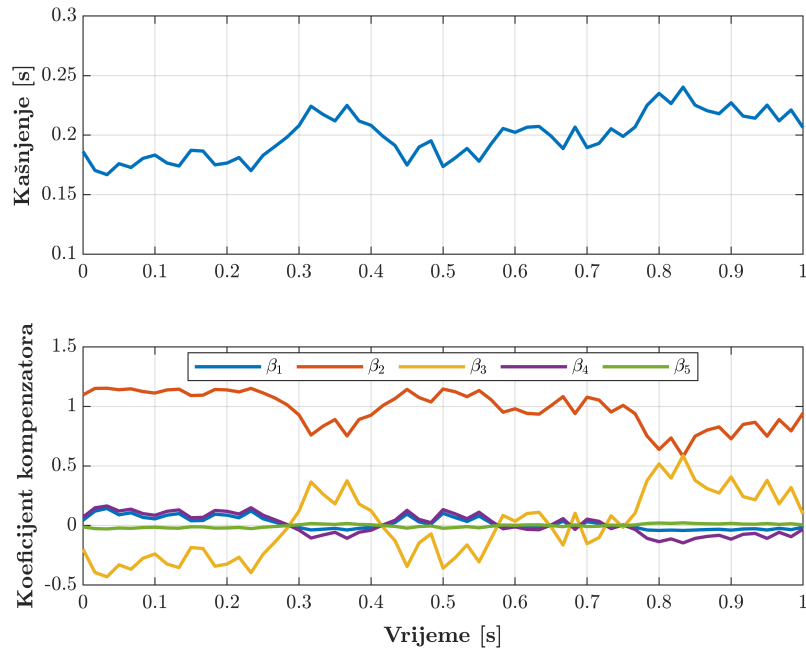


Slika 5.7: Razlika brzina obrtanja rotora generatora 2 i 4 nakon kvara



Slika 5.8: Varijacije snage razmjenjene između zona nakon kvara

Kao što se uočava, u originalnom sistemu su oscilacije slabo prigušene i opstaju tokom cijelog perioda posmatranja. Kada je komunikaciono kašnjenje zanemareno prilikom dizajna, kontroler za prigušenje oscilacija ih dodatno amplifikuje. Sa druge strane, kada je komunikaciono kašnjenje kompenzovano ili uzeto u obzir primjenom Padeove aproksimacije, oscilacije su adekvatno prigušene. Pri tom, predloženi kontroler rezultira značajno bržim prigušenjem oscilacija od referentnih kontrolera.

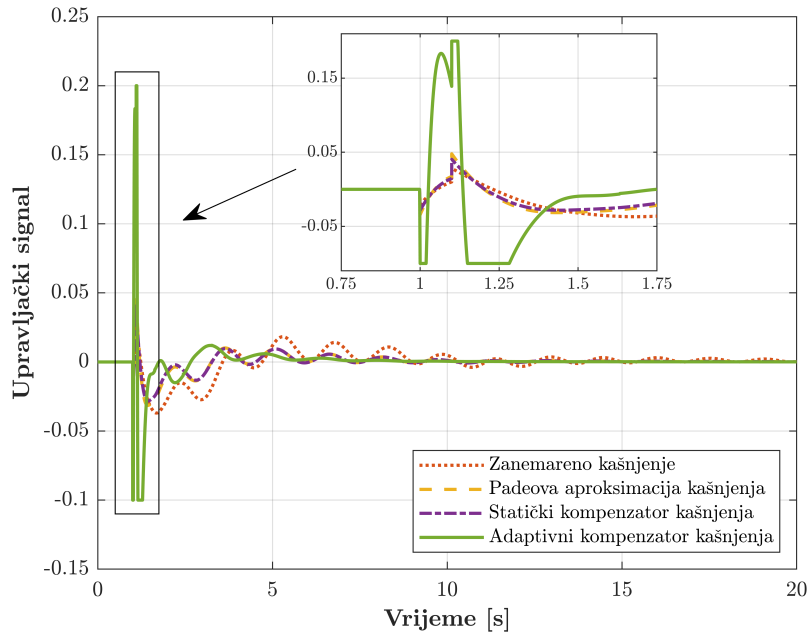


Slika 5.9: Prilagođavanje težinskih koeficijenata adaptivnog kompenzatora kašnjenja

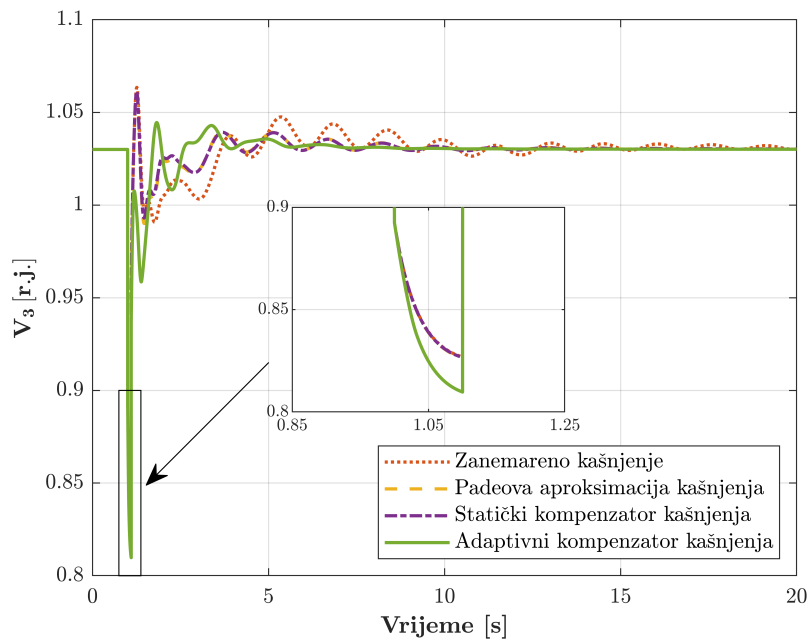
Bolje performanse predloženog kontrolera za prigušenje oscilacija rezultat su kontinuiranog prilagođavanja težinskih koeficijenata adaptivnog kompenzatora kašnjenja, kao što je prikazano na Slici 5.9. U konkretnom slučaju, pretpostavljeno je da se adaptivni kompenzator kašnjenja sastoji od pet jediničnih kompenzatora, čije vremenske konstante T_i uzimaju vrijednosti od 0,1 do 0,5 s, u diskretnim koracima od 0,1 s. Kako u toku prve sekunde simulacije komunikaciono kašnjenje varira između 150 i 250 ms, koeficijenti β_2 i β_3 očekivano doživljavaju najveće promjene.

Rezolucija prilagođavanja težinskih koeficijenata odgovara rezoluciji fazorskih mjerenja. U praksi, uređaji za sinhronizovano mjerenje fazora obično imaju rezoluciju između 30 i 240 mjerenja u sekundi [5]. U sprovedenim simulacijama, pretpostavljeno je da uređaji za sinhronizovano mjerenje fazora imaju rezoluciju od 60 mjerenja u sekundi. Međutim, važno je naglasiti da proračunska složenost adaptivnog kompenzatora kašnjenja ne ograničava njegovu primjenu sa uređajima za sinhronizovano mjerenje fazora veće rezolucije. Konkretno, srednje vrijeme ažuriranja težinskih koeficijenata adaptivnog kompenzatora kašnjenja određeno u 10.000 simulacija je manje od 10 μ s. Vrijeme izvršavanja je određeno na računaru opremljenom Intel Core i7-13700F procesorom i 32 GB RAM memorije.

Kao što je prikazano na Slici 5.10, zahvaljujući adaptivnoj kompenzaciji komunikacionog kašnjenja, predloženi kontroler karakteriše najbrži odziv nakon poremećaja. I pored burnijeg upravljanja, na Slici 5.11 je pokazano da predloženi kontroler ne rezultira nedozvoljenim odstupanjima napona na sabirnicama generatora 3.

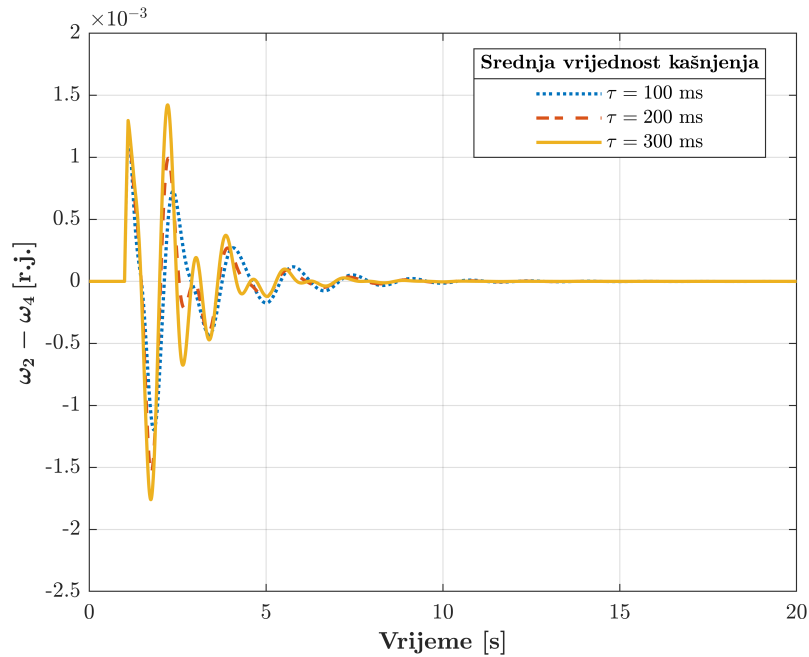


Slika 5.10: Poređenje upravljačkih signala različitih kontrolera u dvozonskom sistemu



Slika 5.11: Poređenje napona na sabirnicama generatora 3 sa različitim kontrolerima

Na kraju, kako bi se dodatno ispitala robusnost predloženog kontrolera za prigušenje oscilacija, sprovedene su simulacije trolnog kratkog spoja sa različitim nivoima komunikacionog kašnjenja. Odzivi sistema nakon poremećaja za različite nivoe komunikacionog kašnjenja prikazani su na Slici 5.12. Predstavljeni rezultati potvrđuju rezultate analiza statičke stabilnosti, pokazujući da, sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, povećanje nivoa komunikacionog kašnjenja rezultira dodatnim prigušenjem među-zonskih oscilacija.



Slika 5.12: Odziv dvozonskog sistema pri različitim nivoima kašnjenja

5.1.5 Adaptivni sistem za prigušenje oscilacija

Uz pravilan izbor upravljačke petlje, kontroler dizajniran primjenom metode reziduuma za Kundurov dvozonski sistem obezbjeđuje adekvatno prigušenje među-zonskih oscilacija u najvećem broju operativnih scenarija. Međutim, u određenim operativnim scenarijima, među-zonske oscilacije su slabo prigušene ili čak rastuće amplitude. Kao što je objašnjeno, ovo je posljedica promjena kontrolabilnosti i opservabilnosti kritičnog oscilatornog moda, kao i pripadajućeg ugla reziduuma. U ovom poglavlju ispitana je mogućnost unapređenja robusnosti kontrolera za prigušenje oscilacija, dizajniranog primjenom metode reziduuma, kroz adaptivno prilagođavanje njegovih parametara.

Priprema podataka za obučavanje neuralne mreže

Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, podaci za obučavanje neuralne mreže jednostavno se generišu u simulacionom okruženju. Za Kundurov dvozonski sistem, operativni scenariji od interesa generisani su slučajnim uzorkovanjem odgovarajućih funkcija raspodjele:

- Statusi interkonektivnih dalekovoda modelovani su Bernulijevom raspodjelom u odnosu na vjerovatnoću ispada 0,01.
- Ukupna potrošnja u elektroenergetskom sistemu modelovana je normalnom raspodjelom srednje vrijednosti 2.500 MW i standardne devijacije 375 MW.

- Ukupna potrošnja i proizvodnja se u ovako jednostavnom sistemu mogu podijeliti između zona u skladu sa uniformnom raspodjelom, vodeći računa o naznačenim snagama pojedinačnih generatora.

Za svaki od operativnih scenarija sprovodi se proračun tokova snaga, nakon čega se određuju mjerenja koja odgovaraju mjernoj konfiguraciji u elektroenergetskom sistemu. Mjerna konfiguracija je odabrana tako da obezbjeđuje opservabilnost elektroenergetskog sistema, odnosno rješivost problema statičke estimacije stanja. Stvarnim vrijednostima mjerenih veličina dodaje se mjerni šum predstavljen Studentovom raspodjelom stepena slobode 10. Uz to, u svakom scenariju se slučajno odabranim mjerenjima dodaju velike mjerne greške modelovane uniformnom raspodjelom. Zašumljena mjerenja zatim se obrađuju sprovođenjem estimacije stanja, čime se određuju ulazne karakteristike za obučavanje neuralne mreže. Sa druge strane, izlazne karakteristike određuju se dizajnom kontrolera za prigušenje oscilacija primjenom metode reziduuma za svaki od operativnih scenarija.

Prethodno opisanom procedurom generisano je 10.000 uzoraka, koji će biti korišćeni za obučavanje, validaciju i testiranje performansi neuralne mreže. Pri tom, 70% uzoraka koristi se za obučavanje, 15% za validaciju, dok se preostalih 15% koristi za analizu performansi neuralne mreže.

Struktura neuralne mreže

Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, za predviđanje parametara kontrolera za prigušenje oscilacija biće korišćene potpuno povezane neuralne mreže sa propagacijom unaprijed. Struktura neuralne mreže sastoji se od jednog ulaznog sloja, jednog ili više skrivenih slojeva, kao i jednog izlaznog sloja.

Broj neurona u ulaznom sloju odgovara broju ulaznih karakteristika. Budući da ulazne karakteristike predstavljaju module i fazne stavove napona u čvorovima sistema, za Kundurov dvozonski sistem broj neurona u ulaznom sloju iznosi 22.

Broj neurona u izlaznom sloju odgovara broju izlaznih karakteristika. Parametri kontrolera za prigušenje oscilacija su broj *lead-lag* blokova n , vremenske konstante T_1 i T_2 , kao i pojačanje kontrolera K . Kako n predstavlja cjelobrojnu promjenljivu sa vrijednostima u opsegu od 1 do 4, predviđanje broja *lead-lag* blokova predstavlja problem višeklasne klasifikacije. Sa druge strane, predviđanje vremenskih konstanti i pojačanja kontrolera predstavlja klasičan problem regresije. Shodno tome, neuralna mreža za predviđanje parametara kontrolera za prigušenje oscilacija ima dvije izlazne grane: jednu za višeklasnu klasifikaciju, a drugu za regresiju.

Što se tiče skrivenih slojeva, njihov broj i broj neurona u njima predstavljaju hiperparametre neuralne mreže čije je vrijednosti neophodno optimizovati.

Optimizacija hiperparametara i obučavanje neuralne mreže

Kao što je prethodno navedeno, osnovni hiperparametri neuralne mreže su broj skrivenih slojeva i broj neurona u njima. Zbog jednostavnosti procesa optimizacije, pretpostavlja se da svi skriveni slojevi imaju jednak broj neurona. Za aktivacionu funkciju neurona u skrivenim slojevima usvojena je ReLU funkcija. Parametri neuralne mreže optimizuju se primjenom Adam metode, pri čemu stopa učenja predstavlja jedan od hiperparametara neuralne mreže. Stopa učenja je konstantna tokom cijelog procesa obučavanja kako bi se izbjegla negativna interakcija sa njenim implicitnim podešavanjem od strane Adam metode. Za regularizaciju neuralne mreže koristi se nasumično isključivanje neurona i L_2 regularizacija. Prema tome, potrebno je optimizovati stopu nasumičnog isključivanja neurona i faktor penalizacije. Na kraju, veličina podskupa predstavlja još jedan od hiperparametara neuralne mreže.

Uz navedene hiperparametre, u konkretnom slučaju potrebno je optimizovati još dva hiperparametra, koji su posljedica strukture same neuralne mreže. U slučaju višeklasne klasifikacije, kao funkcija gubitka najčešće se koristi kategorička unakrsna entropija (eng. *categorical cross-entropy*), data izrazom:

$$J_C = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C y_{ij} \log(\hat{y}_{ij}) \quad (5.2)$$

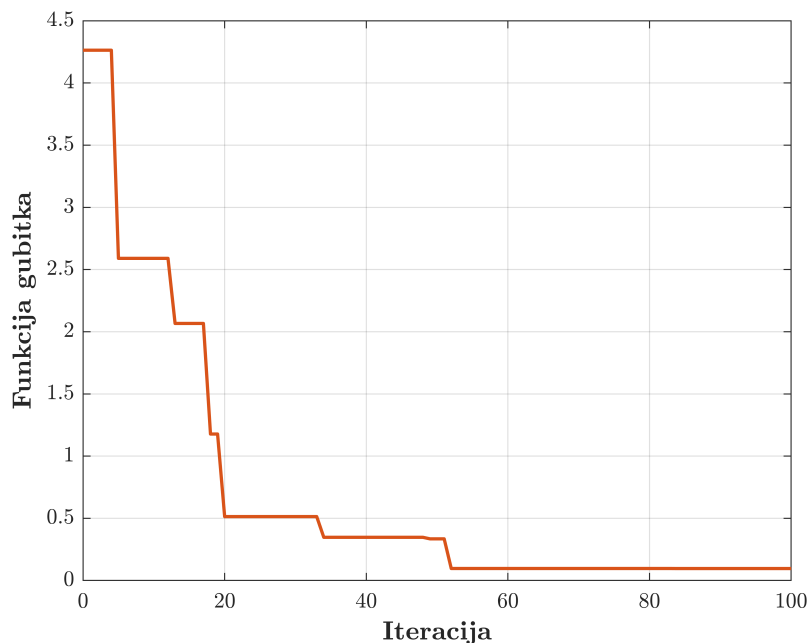
gdje su y_{ij} i \hat{y}_{ij} stvarna i predviđena vjerovatnoća j -te klase u i -tom uzorku, C predstavlja broj klasa, a N je broj uzoraka. Sa druge strane, kod problema regresije se kao funkcija gubitka najčešće koristi srednja kvadratna greška (eng. *Mean-Squared Error*), data izrazom:

$$J_R = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C (y_{ij} - \hat{y}_{ij})^2 \quad (5.3)$$

gdje su y_{ij} i \hat{y}_{ij} stvarna i predviđena vrijednost j -te karakteristike u i -tom uzorku, a C je broj izlaznih karakteristika. Kako se u konkretnom slučaju neuralna mreža istovremeno koristi za višeklasnu klasifikaciju i regresiju, funkcija gubitka predstavlja ponderisani zbir funkcija gubitka J_C i J_R :

$$J = w_C J_C + w_R J_R \quad (5.4)$$

gdje težinski koeficijenti w_C i w_R predstavljaju dodatne hiperparametre neuralne mreže. Skaliranje težinskim koeficijentima neophodno je kako tokom procesa obučavanja ne bi bio favorizovan jedan od zadataka usljed različitih razmjera pojedinačnih funkcija gubitaka.

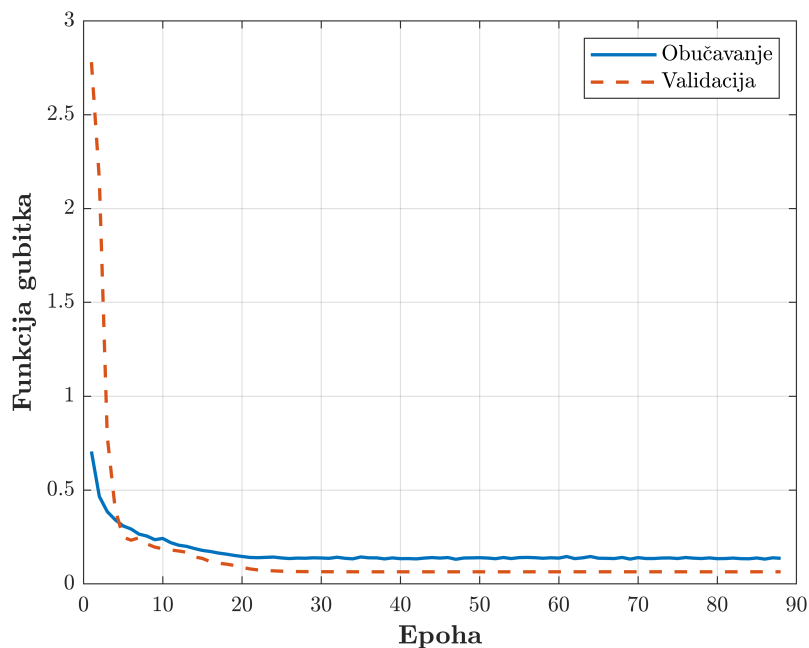


Slika 5.13: Konvergencija Bajesovske optimizacije za dvozonski sistem

Hiperparametri neuralne mreže optimizovani su primjenom Bajesovske optimizacije, gdje kriterijumska funkcija predstavlja funkciju gubitka na validacionom skupu. Kako bi se minimizovala proračunska složenost, u svakoj iteraciji se obučavanje neuralne mreže sprovodi 30 epoha. Kao što se uočava sa Slike 5.13, optimizacioni postupak je konvergirao nakon nešto više od 50 iteracija. Opseg i optimalne vrijednosti hiperparametara predstavljeni su u Tabeli 5.5. Kao što se uočava, Bajesovska optimizacija rezultirala je plitkom mrežom sa 2 skrivena sloja i 189 neurona po sloju. Dok je stopa učenja relativno visoka, parametri regularizacije nalaze se na donjim graničnim vrijednostima. Za obučavanje se koriste podskupovi umjerene veličine, čime se postiže balans između proračunske složenosti i stabilne procjene gradijenta.

Tabela 5.5: Optimizacija hiperparametara za dvozonski sistem

Hiperparametar	Opseg vrijednosti	Optimalna vrijednost
Broj skrivenih slojeva	1 – 10	2
Broj neurona	32 – 512	189
Stopa učenja	10^{-6} – 10^{-2}	10^{-2}
Stopa nasumičnog isključivanja	0,1 – 0,5	0,1
Faktor penalizacije	10^{-6} – 10^{-2}	10^{-6}
Veličina podskupa	4 – 1024	149
Težinski koeficijent klasifikacije	0,25 – 4	0,28
Težinski koeficijent regresije	0,25 – 4	0,25



Slika 5.14: Krive gubitka neuralne mreže za dvozonski sistem

Nakon optimizacije hiperparametara, sprovedeno je obučavanje neuralne mreže. Krive gubitka na skupovima podataka za obučavanje i validaciju predstavljene su na Slici 5.14. Kao što se uočava, krive gubitka pokazuju brzu konvergenciju u prvih 20 epoha, nakon čega slijedi stabilna faza obučavanja bez značajnih promjena. Strmi pad funkcije gubitka ukazuje da odabrana stopa učenja omogućava brzu optimizaciju parametara neuralne mreže bez izazivanja divergencije.

Zanimljivo je uočiti da vrijednost funkcije gubitka na validacionom skupu nakon nekoliko epoha postaje niža od njene vrijednosti na skupu podataka za obučavanje. Ovaj fenomen je posljedica regularizacije putem nasumičnog isključivanja neurona, koja se primjenjuje tokom procesa obučavanja, ali ne i tokom validacije.

Analiza performansi neuralne mreže

Kao što je ranije navedeno, predviđanje parametara kontrolera za prigušenje oscilacija predstavlja mješoviti problem višeklasne klasifikacije i regresije. Za ocjenu performansi neuralne mreže korišćeni su standardni pokazatelji, uključujući:

- preciznost, odziv i F_1 mjeru, za ocjenu performansi klasifikacije,
- srednju kvadratnu grešku (eng. *Mean Square Error*, MSE), srednju apsolutnu grešku (eng. *Mean Absolute Error*, MAE), srednju apsolutnu procentualnu grešku (eng. *Mean Absolute Percentage Error*, MAPE) i R^2 mjeru, za ocjenu performansi regresije.

Vrijednosti ključnih pokazatelja predstavljeni su u Tabelama 5.6 i 5.7.

Tabela 5.6: Pokazatelji performansi klasifikacije u dvozonskom sistemu

Klasa	Preciznost	Odziv	F ₁ mjera
$n = 1$	0,9920	1,0000	0,9960
$n = 2$	1,0000	0,9984	0,9992
Srednja vrijednost	0,9984	0,9987	0,9986

Tabela 5.7: Pokazatelji performansi regresije u dvozonskom sistemu

Parametar	MSE [$\times 10^{-4}$]	MAE [$\times 10^{-2}$]	MAPE [%]	R ²
T_1	0,49	0,36	2,21	0,9488
T_2	6,92	1,51	2,99	0,9332
K	1,38	0,87	7,32	0,9738
Srednja vrijednost	2,93	0,91	4,17	0,9519

U slučaju dvozonskog sistema, kontroler za prigušenje oscilacija ima jedan ili dva *lead-lag* bloka. Kao što se uočava iz Tabele 5.6, neuralna mreža idealno identifikuje scenarije u kojima je za prigušenje oscilacija potreban jedan *lead-lag* blok. Performanse neuralne mreže su nešto gore u scenarijima sa dva *lead-lag* bloka. Međutim, vrijednosti F₁ mjere, kako za pojedinačne klase, tako i srednja vrijednost na skupu podataka za testiranje, ukazuju da su performanse klasifikacije gotovo idealne.

Pokazatelji performansi regresije, predstavljeni u Tabeli 5.7, demonstriraju visoku preciznost neuralne mreže u predviđanju parametara kontrolera za prigušenje oscilacija. R² mjera, poznata i kao koeficijent determinacije, za sve parametre kontrolera prelazi vrijednost od 0,93. Ovo ukazuje da neuralna mreža uspješno objašnjava preko 93% varijanse optimalnih vrijednosti parametara kontrolera.

Srednja vrijednost MAPE u procjeni parametara kontrolera iznosi 4,17%. Kao što se uočava, neuralna mreža preciznije određuje parametre fazne karakteristike kontrolera u odnosu na njegovo pojačanje. Ova situacija je povoljnija od preciznije procjene pojačanja, jer neadekvatno podešavanje fazne karakteristike kontrolera može rezultirati dodatnim amplifikovanjem oscilacija. Sa druge strane, adekvatnim podešavanjem fazne karakteristike garantuje se pomjeranje kritične svojstvene vrijednosti ka lijevoj poluravni, čime se, zavisno od vrijednosti pojačanja, u manjoj ili većoj mjeri prigušuju oscilacije.

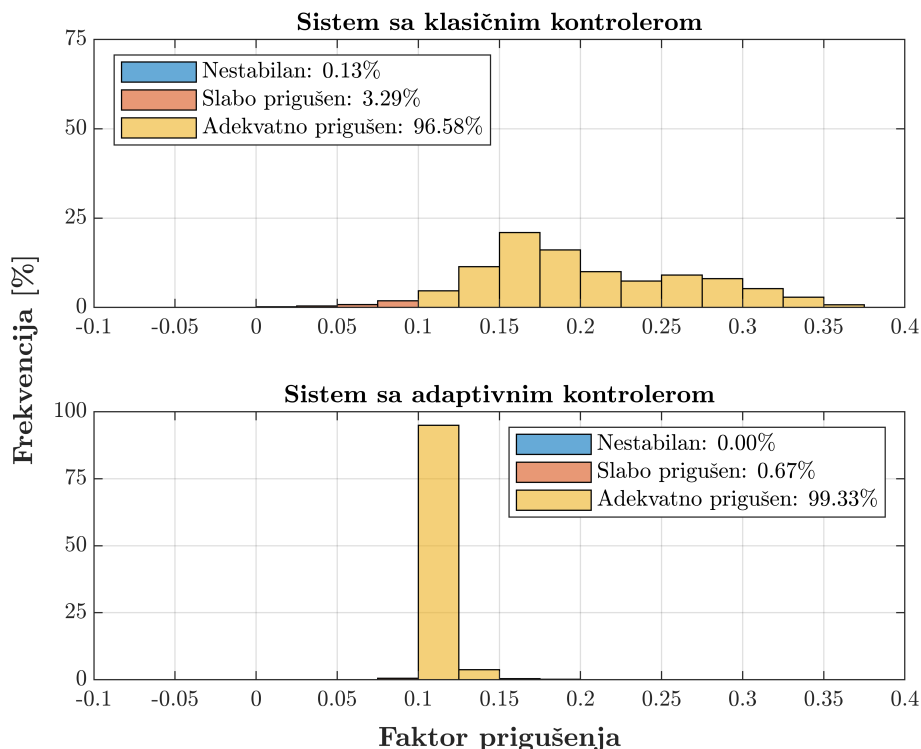
Na kraju, važno je istaći da su predstavljeni rezultati dobijeni ispitivanjem performansi neuralne mreže na skupu podataka za testiranje. Prema tome, jasno je da neuralna mreža ima visoku sposobnost generalizacije.

Analiza statičke stabilnosti sistema

Da bi se ispitala performanse adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija na bazi neuralne mreže i metode reziduuma, modalna analiza je sprovedena za 10.000 operativnih scenarija uvedenih u potpoglavljju 5.1.1. Za svaki od operativnih scenarija, pretpostavlja se da su parametri kontrolera za prigušenje oscilacija podešeni na osnovu estimiranih vrijednosti modula i faznih stavova napona u čvorovima sistema. Histogramski prikaz faktora prigušenja među-zonskog moda sa klasičnim i adaptivnim kontrolerom za prigušenje oscilacija predstavljen je na Slici 5.15.

Kao što se uočava, adaptivni kontroler za prigušenje oscilacija u potpunosti eliminiše scenarije u kojima je Kundurov dvozonski sistem oscilatorno nestabilan. Osim toga, udio slabo prigušenih scenarija je smanjen sa 3,29% sa klasičnim, na 0,67% sa adaptivnim kontrolerom za prigušenje oscilacija. Konačno, udio scenarija u kojima su među-zonske oscilacije adekvatno prigušene povećan je sa 96,58% na 99,33%. Prema tome, jasno je da se adaptivnim ažuriranjem parametara kontrolera primjenom predloženog pristupa povećava robusnost sistema za prigušenje oscilacija.

Važno je uočiti da je raspodjela faktora prigušenja sa adaptivnim kontrolerom za prigušenje oscilacija skoncentrisana oko vrijednosti od 0,1. Ovo je posljedica činjenice da su, prilikom pripreme skupa podataka za obučavanje, kontroleri dizajnirani tako da se postigne adekvatno prigušenje oscilacija uz minimalno pojačanje kontrolera.

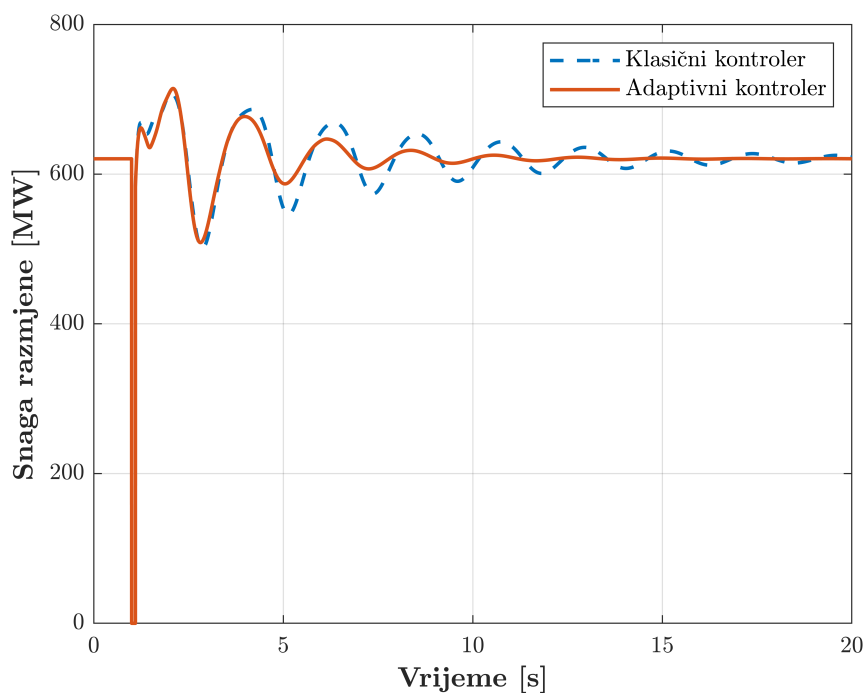


Slika 5.15: Raspodjela faktora prigušenja sa klasičnim i adaptivnim kontrolerom

Alternativni pristup podrazumijeva podešavanje pojačanja kontrolera tako da se postigne maksimalna moguća vrijednost faktora prigušenja. Iako se ovim pristupom smanjuje vrijeme smirenja među-zonskih oscilacija, istovremeno se povećava rizik od negativne interakcije kontrolera za prigušenje oscilacija sa drugim modovima u sistemu. U realnim elektroenergetskim sistemima sa velikim brojem oscilatornih modova, ovo može predstavljati značajan problem. Iz tog razloga, korišćeni pristup predstavlja optimalno rješenje koje ujedno olakšava monitoring oscilacija zbog manje varijabilnosti karakteristika oscilatornih modova.

Analiza tranzijentne stabilnosti sistema

Na kraju, potrebno je ispitati funkcionisanje adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija u slučaju velikih poremećaja u elektroenergetskom sistemu. Za tu svrhu je sprovedena simulacija trolnog kratkog spoja u trajanju od 100 ms na sabirnicama 8. Kao i ranije, komunikaciono kašnjenje tokom simulacije stohastički varira između 100 i 300 ms. Za operativni scenario sistema prije kvara odabran je scenario sa visokom snagom razmjene između zona. Dinamički odgovor sistema sa klasičnim i adaptivnim kontrolerom za prigušenje oscilacija predstavljen je na Slici 5.16 kroz varijacije snage razmjene između zona nakon kvara. Kao što se uočava, prilagođavanjem parametara kontrolera aktuelnim radnim uslovima u elektroenergetskom sistemu se značajno smanjuje vrijeme smirenja među-zonskih oscilacija.

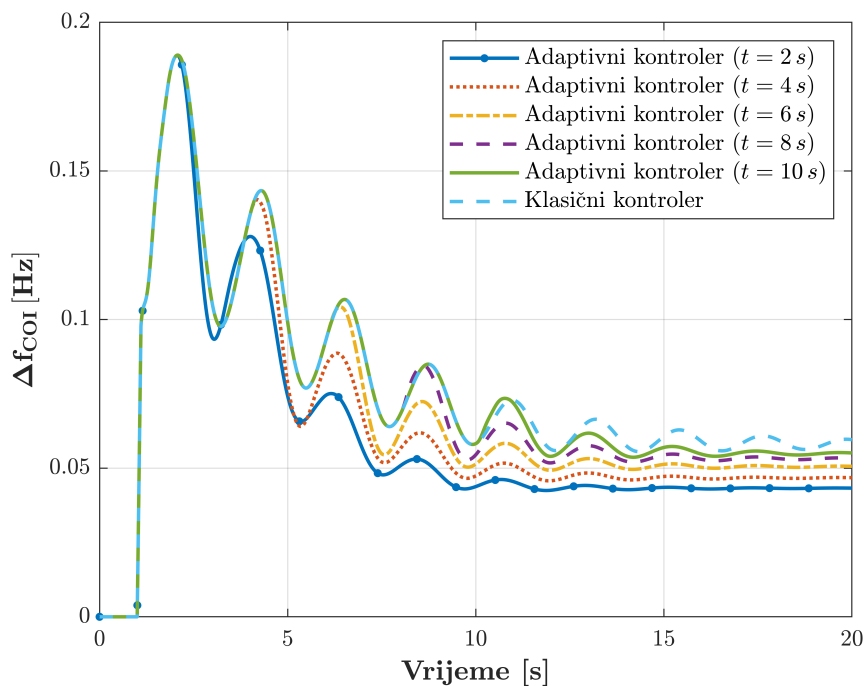


Slika 5.16: Odziv dvozonkog sistema sa klasičnim i adaptivnim kontrolerom

Razmatrani scenario predstavlja idealnu situaciju u kojoj su parametri kontrolera za prigušenje oscilacija unaprijed prilagođeni aktuelnim radnim uslovima prije poremećaja. U praksi, moguće su situacije u kojima se parametri kontrolera ažuriraju za vrijeme slobodne dinamike sistema nakon poremećaja. Tipičan primjer predstavlja situacije u kojima do velikog poremećaja dolazi neposredno nakon redišpečinga proizvodnih agregata ili promjene konfiguracije mreže. Iz tog razloga, neophodno je ispitati uticaj naknadnog ažuriranja parametara kontrolera na tok prelaznih procesa.

Kako bi se ispitao uticaj kašnjenja u ažuriranju parametara kontrolera na odziv elektroenergetskog sistema pri velikim poremećajima, ponovljene su simulacije tro-polnog kratkog spoja na sabirnicama 8. Pri tom, parametri kontrolera ažuriraju se 2, 4, 6, 8 ili 10 sekundi nakon početka perioda posmatranja. Prije ažuriranja, pretpostavlja se da parametri kontrolera odgovaraju parametrima klasičnog kontrolera dizajniranog primjenom metode reziduuma. Odziv sistema u različitim scenarijima predstavljen je na Slici 5.17 kroz odstupanje učestanosti u centru inercije.

Kao što se uočava, odzivi sistema sa adaptivnim kontrolerom za prigušenje oscilacija granaju se iz odziva sistema sa klasičnim kontrolerom u trenutku ažuriranja parametara. Bez obzira na kašnjenje u ažuriranju parametara, vrijeme smirenja oscilacija kraće je sa adaptivnim nego sa klasičnim kontrolerom za prigušenje oscilacija. Štaviše, brže ažuriranje parametara kontrolera nakon poremećaja rezultira bržim smirenjem oscilacija. Važno je naglasiti da su odstupanja učestanosti u posthavarijskom režimu posljedica zanemarivanja turbine i turbinskog regulatora.

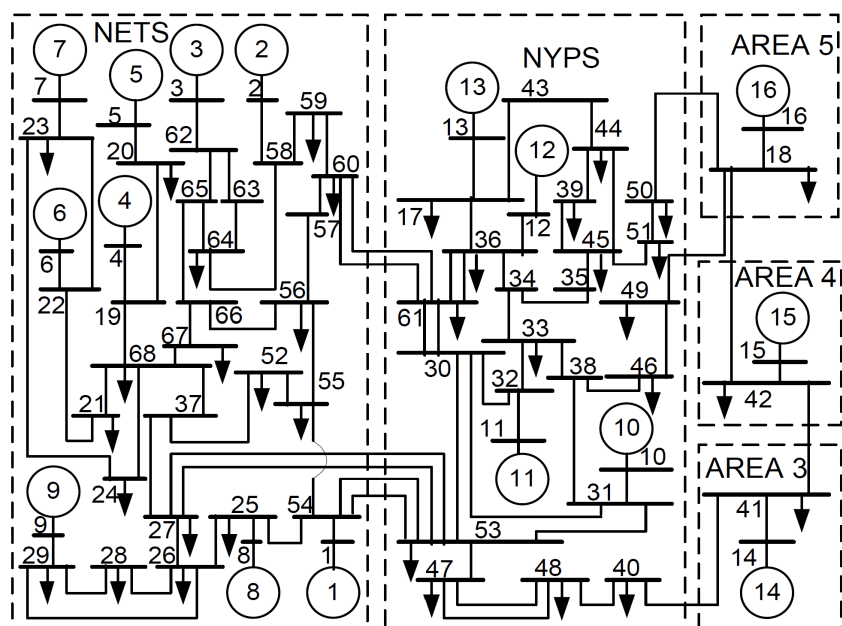


Slika 5.17: Uticaj kašnjenja u ažuriranju parametara na odziv dvozonkog sistema

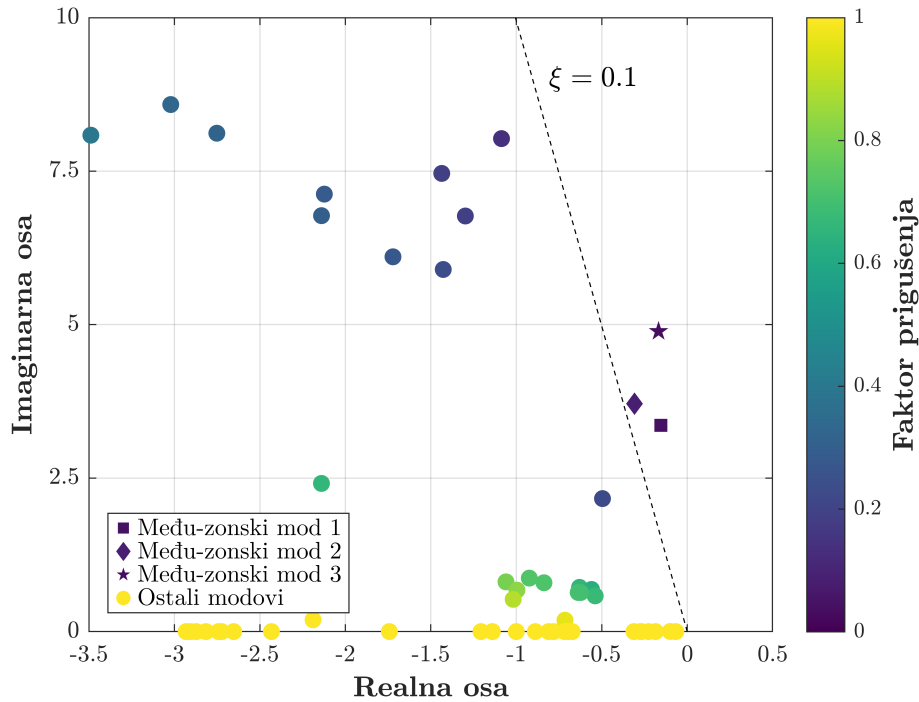
5.2 Studija slučaja: sistem regije Nove Engleske i države Njujork

Kako bi se ispitala mogućnost primjene predloženih metoda u realnim elektroenergetskim sistemima, sprovedena je studija slučaja na testnom sistemu sa 16 sinhronih generatora i 68 čvorova, čija je jednopolna šema prikazana na Slici 5.18. Testni sistem predstavlja dinamički ekvivalent elektroenergetskog sistema regije Nove Engleske i države Njujork, koji je u literaturi najčešće korišćen za koordinisan dizajn stabilizatora elektroenergetskog sistema i analize koherentnosti. Dodatno, sistem sa 16 sinhronih generatora i 68 čvorova predstavlja testni sistem najvećih dimenzija u oblasti stabilnosti elektroenergetskih sistema.

Svi sinhroni generatori u elektroenergetskom sistemu predstavljani su subtranzijentnim modelom šestog reda. Generatori G1 do G8 i G10 do G12 opremljeni su jednosmjernim pobudnim sistemima, koji se u analizama stabilnosti mogu predstaviti modelom DC4B. Sa druge strane, generator G9 opremljen je statičkim pobudnim sistemom bez kompaundacije, koji se može predstaviti modelom ST1A. Dodatno, generatori G1 do G12 opremljeni su stabilizatorima elektroenergetskog sistema na bazi brzine obrtanja rotora. Generatori G13 do G16 predstavljaju ekvivalente odgovarajućih oblasti, pa se njihovi pobudni sistemi nalaze u režimu ručnog upravljanja. Spora dinamika turbine i turbinskog regulatora je zanemarena, pa se mehanička snaga na osovini rotora sinhronih generatora može smatrati konstantnom.



Slika 5.18: Jednopolna šema sistema Nove Engleske i države Njujork



Slika 5.19: Svojevredne vrijednosti sistema od 68 čvorova

Modalna analiza, čiji su rezultati predstavljeni na Slici 5.19, ukazuje da su svi lokalni modovi u elektroenergetskom sistemu adekvatno prigušeni. Međutim, kao što se uočava, sistem ima tri slabo prigušena među-zonska moda. Generatori sa dominantnim učešćem u slabo prigušenim među-zonskim modovima su generatori G13 do G16. Kako ovi generatori predstavljaju ekvivalente različitih oblasti, a ne stvarne generatore, isti ne mogu biti opremljeni kontrolerima za prigušenje oscilacija. Umjesto njih, za prigušenje oscilacija će biti korišćeni FACTS uređaji.

Optimalna alokacija FACTS uređaja predstavlja temu velikog broja istraživačkih radova. Najčešće, alokacija FACTS uređaja sprovodi se s ciljem poboljšanja naponskih prilika, smanjenja gubitaka aktivne snage ili povećanja prenosnih kapaciteta. U konkretnom slučaju, cilj alokacije FACTS uređaja je olakšanje prenosa snage interkonektivnim dalekovodima između oblasti. U tom kontekstu, na dalekovodu između čvorova 41 i 42 postavljen je TCSC uređaj, koji u normalnom pogonu kompenzuje 10% reaktanse dalekovoda.

Sami po sebi, FACTS uređaji ne doprinose značajno prigušenju među-zonskih oscilacija. Ovo je evidentno i iz Tabele 5.8, u kojoj su prikazane karakteristike među-zonskih modova nakon integracije TCSC uređaja. Kao što se uočava, dok su prvi i treći mod slabo prigušeni, faktor prigušenja drugog moda je blizak željenoj vrijednosti od 0,1. Bez obzira na to, cilj dizajna sistema za prigušenje oscilacija je prigušenje sva tri među-zonska moda, bez negativnog uticaja na ostale modove u sistemu.

Tabela 5.8: Modalna analiza sistema od 68 čvorova sa FACTS uređajima

Mod	Svojstvena vrijednost	Frekvencija [Hz]	Faktor prigušenja
1	$-0,1718 \pm j3,3910$	0,5397	0,0506
2	$-0,2930 \pm j3,7245$	0,5928	0,0784
3	$-0,1775 \pm j5,0220$	0,7993	0,0353

5.2.1 Izbor upravljačke petlje

Kao što je objašnjeno u prethodnom poglavlju, uz pravilan izbor upravljačke petlje, jedan kontroler za prigušenje oscilacija može se koristiti za simultano prigušenje više oscilatornih modova. Prije izbora upravljačke petlje, neophodno je definisati prioritete i neprioritetne modove. Od tri kritična oscilatorna moda, treći mod karakteriše najniža vrijednost faktora prigušenja. Međutim, usljed značajno veće učestanosti, u dinamičkom odgovoru sistema na poremećaje treći mod iščezava brže od prvog i drugog moda. Iz tog razloga, prvi među-zonski mod se smatra prioritarnim modom, dok se drugi i treći mod smatraju neprioritetnim.

Nakon klasifikacije oscilatornih modova, primjenom procedure opisane u potpoglavlju 4.5, sprovodi se predselekcija upravljačkih petlji koje omogućavaju simultano prigušenje sva tri među-zonska moda. Kao i u slučaju dvozonkog sistema, potencijalni mjerni signali su moduli i fazni stavovi napona, razlike faznih stavova napona, struje i aktivne snage mrežnih elemenata, kao i aktivne snage generatora. U svim upravljačkim petljama, referentna vrijednost faktora kompenzacije TCSC uređaja predstavlja upravljački signal. Nakon sprovođenja predselekcije, broj potencijalnih upravljačkih petlji smanjen je sa 2.762 na 149. Za preostale upravljačke petlje proračunate su kombinovane mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti za kritične modove, kao i mjere interakcije sa ostalim modovima u sistemu. Najbolje upravljačke petlje sa mjernim signalima različitog tipa predstavljene su u Tabeli 5.9.

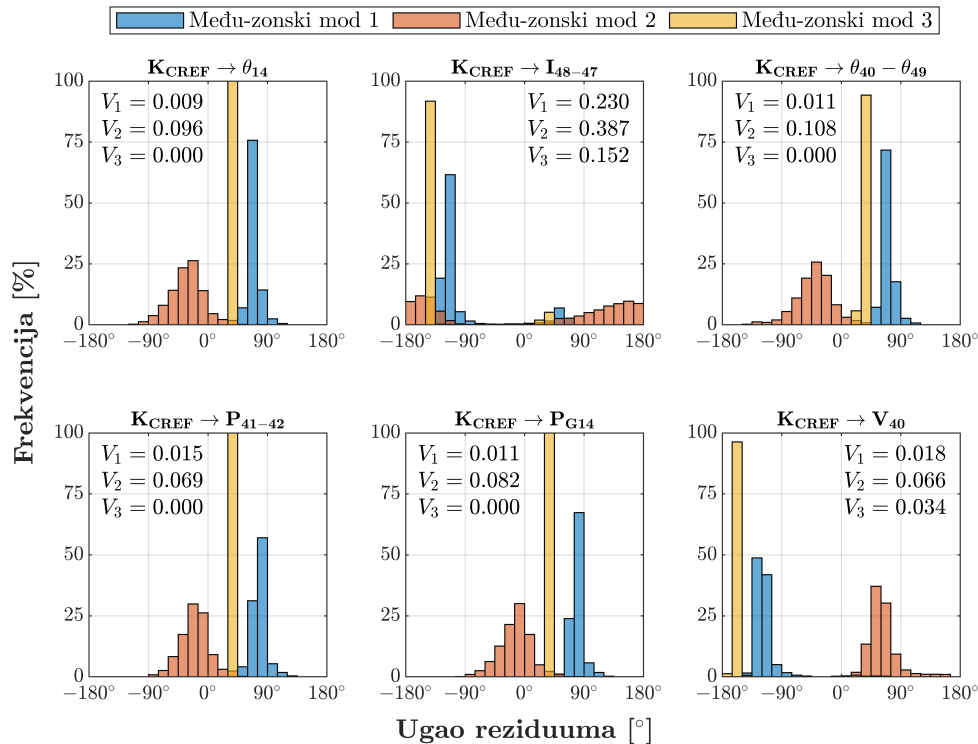
Tabela 5.9: Potencijalne upravljačke petlje u sistemu od 68 čvorova

Upravljačka petlja	Kombinovana mjera	Mjera interakcije
$K_{CREF} \rightarrow \theta_{14}$	1,0000	0,0616
$K_{CREF} \rightarrow I_{48-47}$	0,8249	0,0628
$K_{CREF} \rightarrow \theta_{40} - \theta_{49}$	0,3892	0,0795
$K_{CREF} \rightarrow P_{41-42}$	0,3612	0,6246
$K_{CREF} \rightarrow P_{G14}$	0,2401	1,0000
$K_{CREF} \rightarrow V_{40}$	0,1364	0,0246

Kao i u slučaju dvozonskog sistema, upravljačke petlje koje kao mjerne signale koriste struje ili aktivne snage mrežnih elemenata, kao i fazne stavove napona ili njihove razlike, pokazuju najveću kontrolabilnost i opservabilnost kritičnih oscilatornih modova. Prema tome, ove upravljačke petlje predstavljaju najbolji izbor za prigušenje među-zonskih oscilacija.

Kako bi se ispitala varijabilnost uglova reziduuma za svaku od upravljačkih petlji, sprovedena je modalna analiza sistema za 10.000 operativnih scenarija. Operativni scenariji su slučajno generisani tako da se uzmu u obzir različite konfiguracije mreže, različiti nivoi potrošnje u opsegu od 15 do 18 GW, kao i različite raspodjele potrošnje i proizvodnje između pojedinačnih oblasti. Histogramski prikaz uglova reziduuma za različite upravljačke petlje predstavljen je na Slici 5.20.

Kao što se uočava, uglove reziduuma koji odgovaraju prvom i drugom među-zonskom modu karakteriše određen nivo varijabilnosti. Ovakvo ponašanje je posljedica dominantnog učešća generatora G12 i G13. Kako se generatori G12 i G13 nalaze u čvrsto povezanom dijelu sistema, među-zonski modovi i pripadajući uglovi reziduuma su osjetljivi na varijacije u tokovima snaga. Ovo nije slučaj sa trećim oscilatornim modom u kojem generatori G14, G15 i G16 imaju dominantno učešće. Generatori G14, G15 i G16 su relativno slabo povezani sa ostatkom sistema, što efikasno izoluje treći među-zonski mod i pripadajući ugao reziduuma od varijacija u tokovima snaga.



Slika 5.20: Histogrami ugla reziduuma upravljačkih petlji u sistemu od 68 čvorova

Kao što se uočava, upravljačku petlju $K_{CREF} \rightarrow I_{48-47}$ karakteriše visoka varijabilnost uglova reziduuma koji odgovaraju među-zonskim oscilatornim modovima. Ostale upravljačke petlje karakteriše značajno niži nivo varijabilnosti uglova reziduuma, koji ne ograničava mogućnost primjene metode reziduuma za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija. Dok upravljačku petlju $K_{CREF} \rightarrow P_{G14}$ karakteriše izražena interakcija sa ostalim oscilatornim modovima, upravljačku petlju $K_{CREF} \rightarrow V_{40}$ karakteriše niska vrijednost kombinovane mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti kritičnih među-zonskih modova. Prema tome, izbor se svodi na upravljačke petlje zasnovane na mjerenjima θ_{40} , $\theta_{40} - \theta_{49}$ i P_{41-42} .

Preostale upravljačke petlje ispunjavaju sve neophodne kriterijume za dizajn efikasnog sistema za prigušenje oscilacija, uključujući visoku kontrolabilnost i opservabilnost kritičnih modova, nisku interakciju sa ostalim modovima u sistemu i prihvatljivu varijabilnost uglova reziduuma. Međutim, daljom analizom pokazuje se da jedino upravljačka petlja $K_{CREF} \rightarrow \theta_{40} - \theta_{49}$ omogućava adekvatno prigušenje svih kritičnih modova. Naime, tokom dizajna kontrolera za prigušenje oscilacija sa upravljačkim petljama $K_{CREF} \rightarrow \theta_{40}$ i $K_{CREF} \rightarrow P_{41-42}$, uočeno je da grane geometrijskog mjesta korijena sistema koje odgovaraju drugom i trećem među-zonskom modu mijenjaju smjer sa povećanjem pojačanja kontrolera. Preciznije, nakon određene vrijednosti pojačanja kontrolera, svojstvene vrijednosti koje odgovaraju drugom i trećem među-zonskom modu počinju da se pomjeraju ka desnoj poluravni. Do promjene smjera grana geometrijskog mjesta korijena dolazi prije postizanja adekvatnog prigušenja za sve kritične modove. Sa druge strane, sa upravljačkom petljom $K_{CREF} \rightarrow \theta_{40} - \theta_{49}$, ovaj fenomen dešava se pri značajno većim vrijednostima pojačanja kontrolera, što omogućava efikasno prigušenje svih među-zonskih modova. Iz tog razloga, upravljačka petlja $K_{CREF} \rightarrow \theta_{40} - \theta_{49}$ nameće se kao najbolji izbor za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija.

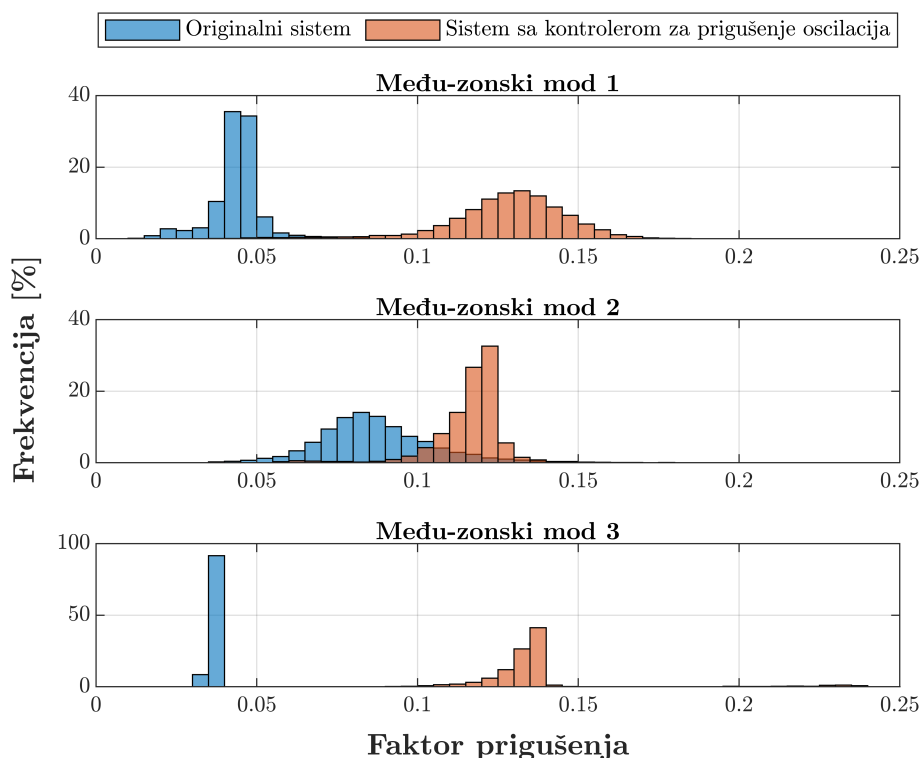
5.2.2 Dizajn kontrolera primjenom metode reziduuma

U nominalnom operativnom scenariju, ugao reziduuma funkcije prenosa sistema u otvorenoj sprezi $K_{CREF} \rightarrow \theta_{40} - \theta_{49}$, koji odgovara prvom među-zonskom modu, iznosi $73,47^\circ$. Kako bi se kritična svojstvena vrijednost pomjerila ka lijevoj poluravni, kontroler za prigušenje oscilacija mora unijeti fazni pomak od $106,53^\circ$ na učestanosti kritičnog moda. Kako jedan *lead-lag* blok može obezbijediti do 45° fazne kompenzacije, u ovom slučaju su potrebna tri *lead-lag* bloka. Zamjenom vrijednosti $\psi = 106,53^\circ$ i $n = 3$ u jednačinu (4.15), određuju se vremenske konstante kontrolera za prigušenje oscilacija $T_1 = 0,5659 s$ i $T_2 = 0,1537 s$. Za vrijednost vremenske konstante visokopropusnog filtra usvojena je tipična vrijednost $T_W = 10 s$.

5.2.3 Analiza statičke stabilnosti sistema

Kako bi se ispitale performanse predloženog kontrolera za prigušenje oscilacija, modalna analiza je sprovedena za 10.000 operativnih scenarija uvedenih u potpoglavlju 5.2.1. Prilikom analize, pretpostavljeno je prisustvo komunikacionog kašnjenja od 150 ms, čiji uticaj kompenzuje adaptivni kompenzator kašnjenja. Za potrebe poređenja, ista analiza sprovedena je i za originalni sistem sa TCSC uređajem bez kontrolera za prigušenje oscilacija. Histogramski prikaz faktora prigušenja kritičnih među-zonskih modova u 10.000 operativnih scenarija testnog elektroenergetskog sistema sa i bez kontrolera za prigušenje oscilacija predstavljen je na Slici 5.22. Kao što se može uočiti, raspodjele faktora prigušenja svih među-zonskih modova pomjeraju se udesno nakon implementacije kontrolera za prigušenje oscilacija, što ukazuje na njegovu efikasnost u prigušenju među-zonskih oscilacija.

Numerički rezultati modalne analize u 10.000 operativnih scenarija predstavljeni su u Tabeli 5.11. Kao što se može uočiti, svi među-zonski modovi su adekvatno prigušeni u više od 93% operativnih scenarija. Očekivano, prvi i drugi među-zonski mod postavljaju najveće izazove zbog umjerene varijabilnosti pripadajućih uglova reziduuma. Sa druge strane, zahvaljujući zanemarljivim varijacijama pripadajućeg ugla reziduuma, treći među-zonski mod je adekvatno prigušen u gotovo svim operativnim scenarijima.



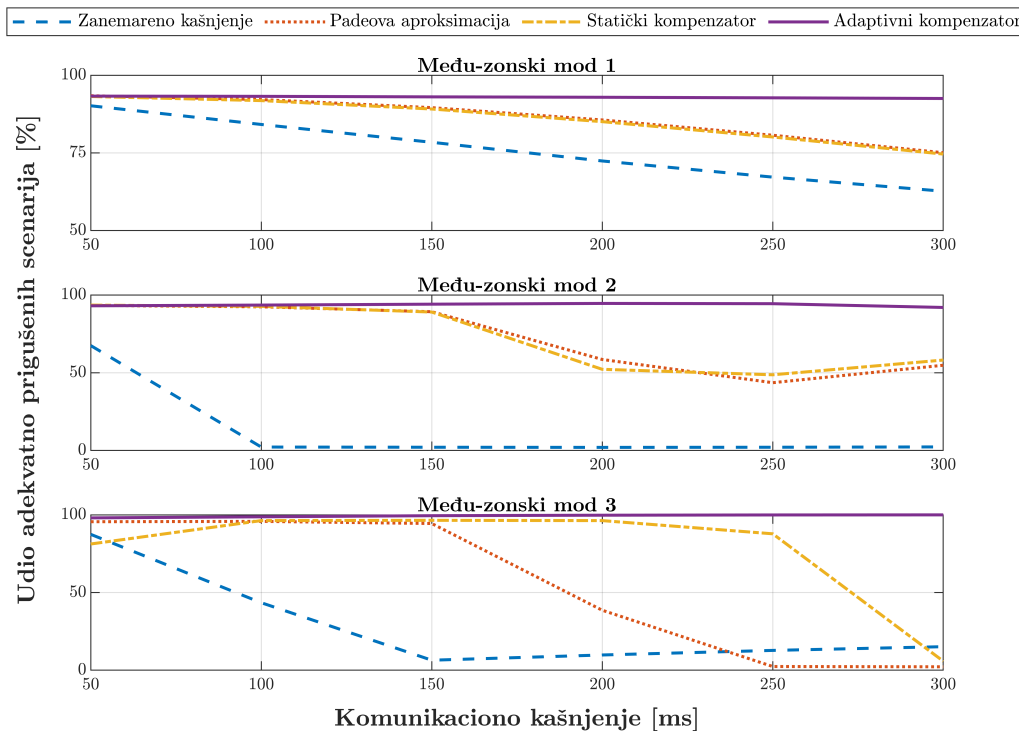
Slika 5.22: Histogramski prikaz faktora prigušenja među-zonskih modova

Tabela 5.11: Udio adekvatno prigušenih scenarija u sistemu od 68 čvorova

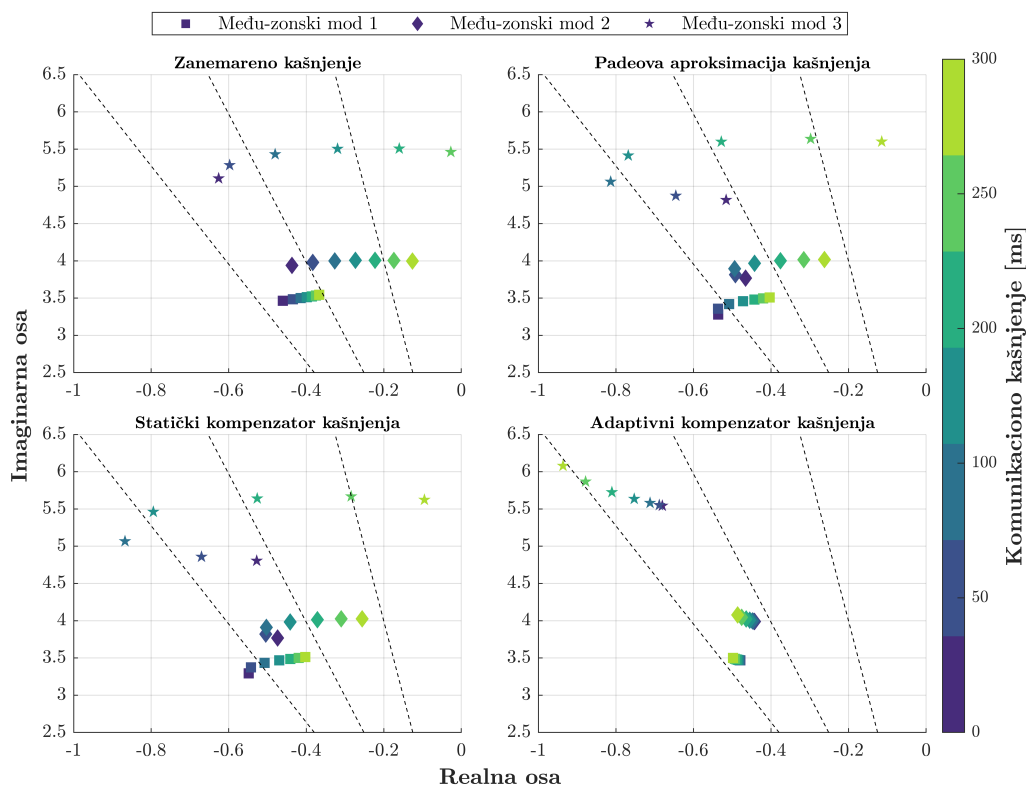
Među-zonski mod	Udio adekvatno prigušenih scenarija [%]	
	Bez kontrolera	Sa kontrolerom
1	0,01	93,48
2	20,14	94,56
3	0,01	99,46

Kako bi se demonstrirala efikasnost razvijenog kontrolera za prigušenje oscilacija sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, modalna analiza je sprovedena za 10.000 operativnih scenarija. Pri tom, razmotrene su performanse kontrolera pri različitim nivoima konstantnog komunikacionog kašnjenja u opsegu od 50 do 300 ms. Ista analiza sprovedena je i sa referentnim kontrolerima za prigušenje oscilacija dizajniranim u prethodnom potpoglavlju.

Na Slici 5.23 prikazan je udio adekvatno prigušenih scenarija u testnom elektroenergetskom sistemu sa različitim kontrolerima za prigušenje oscilacija pri različitim nivoima komunikacionog kašnjenja. Uticaj komunikacionog kašnjenja na performanse različitih kontrolera za prigušenje oscilacija može se bolje razumjeti posmatrajući ga zajedno sa geometrijskim mjestima korijena sistema prikazanim na Slici 5.24.



Slika 5.23: Performanse razvijenih kontrolera pri različitim nivoima kašnjenja



Slika 5.24: Poređenje uticaja komunikacionog kašnjenja na međuzonske modove

U slučaju prvog međuzonskog moda, povećanje komunikacionog kašnjenja rezultira degradacijom performansi referentnih kontrolera za prigušenje oscilacija. Sa druge strane, u sistemu sa predloženim kontrolerom za prigušenje oscilacija, broj adekvatno prigušenih scenarija raste sa povećanjem komunikacionog kašnjenja. Ovo je u skladu sa geometrijskim mjestima korijena, jer se svojstvena vrijednost koja odgovara prvom međuzonskom modu pomjera ka lijevoj poluravni samo u slučaju sistema sa predloženim kontrolerom. Za referentne kontrolere, povećanje komunikacionog kašnjenja rezultira pomjeranjem svojstvene vrijednosti ka desnoj poluravni.

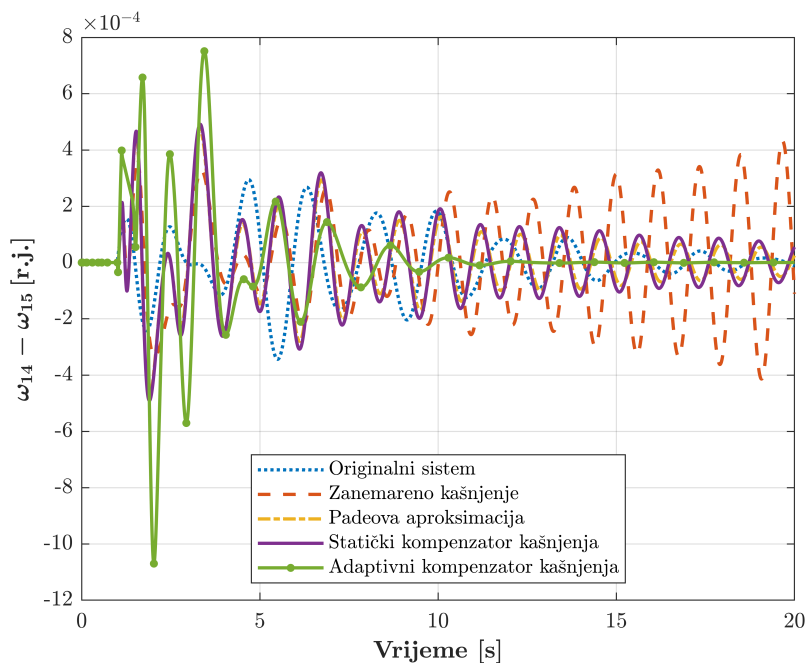
Ako je komunikaciono kašnjenje zanemareno prilikom dizajna, komunikaciona kašnjenja veća od 100 ms pomjeraju svojstvenu vrijednost koja odgovara drugom međuzonskom modu u slabo prigušenu regiju kompleksne ravni u gotovo svim operativnim scenarijima. Kada je komunikaciono kašnjenje uključeno u model sistema primjenom Padeove aproksimacije ili kompenzovano primjenom *lead-lag* kompenzatora, male vrijednosti komunikacionog kašnjenja rezultiraju dodatnim prigušenjem drugog međuzonskog moda. Međutim, pri komunikacionom kašnjenju od 150 ms, grane geometrijskog mjesta korijena koje odgovaraju drugom međuzonskom modu mijenjaju smjer, tako da dalje povećanje komunikacionog kašnjenja rezultira smanjenjem faktora prigušenja drugog međuzonskog moda. Nasuprot tome, povećanje komunikacionog kašnjenja pozitivno utiče na performanse predloženog kontrolera.

U slučaju trećeg među-zonskog moda, pri određenom pragu komunikacionog kašnjenja, grana geometrijskog mjesta korijena mijenja smjer ka desnoj poluravni. Ovaj prag iznosi 50 ms ako je komunikaciono kašnjenje zanemareno, 150 ms ako je komunikaciono kašnjenje uključeno u funkciju prenosa sistema primjenom Padeove aproksimacije, odnosno 200 ms za kontroler sa statičkim kompenzatorom kašnjenja. Sa druge strane, povećanje komunikacionog kašnjenja rezultira poboljšanjem faktora prigušenja kada je sistem opremljen predloženim kontrolerom.

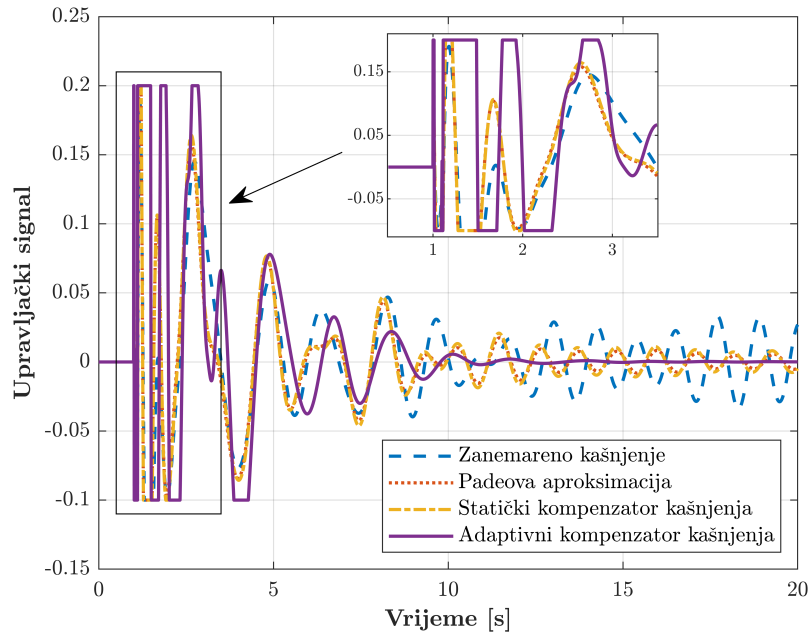
5.2.4 Analiza tranzijentne stabilnosti

Kako bi se ispitale performanse predloženog kontrolera u slučaju velikih poremećaja, sprovedena je simulacija trolnog kratkog spoja na sabirnicama 34 u trajanju od 100 ms. Tokom simulacije, komunikaciono kašnjenje stohastički varira između 100 i 300 ms. Dinamički odgovor sistema prikazan je na Slici 5.25 kroz odstupanje brzine obrtanja rotora generatora 14 i 15.

Kao što se uočava, u originalnom sistemu su među-zonske oscilacije slabo prigušene i traju tokom cijelog perioda simulacije. Ako je komunikaciono kašnjenje zanemareno prilikom dizajna, kontroler za prigušenje oscilacija dodatno amplifikuje među-zonske oscilacije. Sličan uticaj može se uočiti kod kontrolera dizajniranih uz Padeovu aproksimaciju komunikacionog kašnjenja ili njegovu statičku kompenzaciju. Sa druge strane, kada je sistem opremljen predloženim kontrolerom sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, vrijeme smirenja oscilacija je kraće od 10 sekundi.



Slika 5.25: Razlika brzina obrtanja rotora generatora 14 i 15 nakon kvara



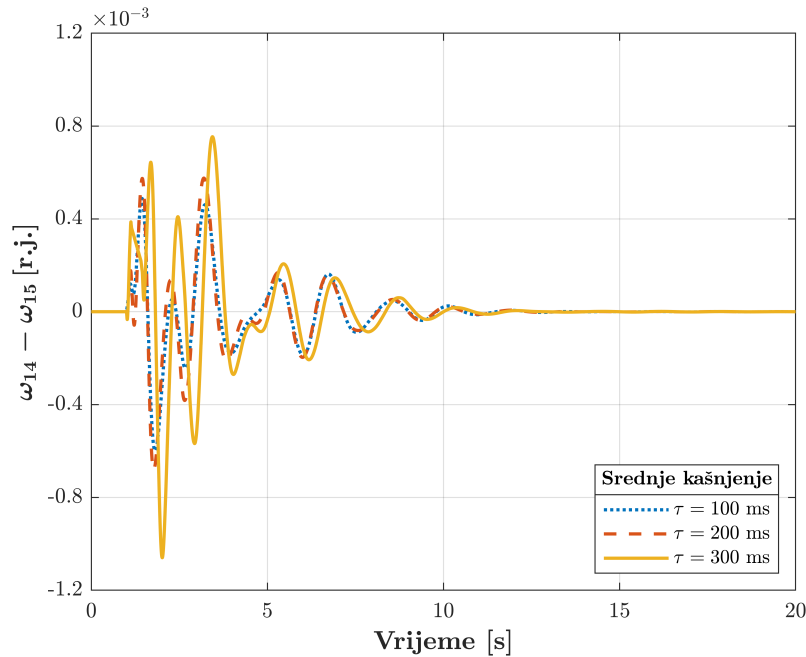
Slika 5.26: Upravljački signali različitih kontrolera za prigušenje oscilacija

Upravljački signali različitih kontrolera za prigušenje oscilacija prikazani su na Slici 5.26. Kako se komunikaciono kašnjenje adaptivno kompenzuje, predloženi kontroler za prigušenje oscilacija karakteriše brže djelovanje od referentnih kontrolera, što rezultira superiornijim performansama. Kvantitativni pokazatelji performansi različitih kontrolera predstavljeni su u Tabeli 5.12. Energija upravljačkog signala, koja predstavlja integral njegovog kvadrata, normalizovana je u odnosu na kontroler razvijen uz Padeovu aproksimaciju komunikacionog kašnjenja. Pokazatelji performansi kontrolera dizajniranog uz zanemareno komunikaciono kašnjenje su izostavljeni, jer je sa istim kontrolerom elektroenergetski sistem oscilatorno nestabilan.

Kao što se uočava, energija upravljačkog signala predloženog kontrolera sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja je gotovo dvostruko veća od referentnih kontrolera za prigušenje oscilacija. Međutim, predloženi kontroler rezultira gotovo dvostruko kraćim vremenom smirenja oscilacija u odnosu na referentne kontrolere. Ovaj kompromis je više nego opravdan s obzirom da je brzo prigušenje među-zonskih oscilacija od kritične važnosti za očuvanje stabilnosti elektroenergetskih sistema.

Tabela 5.12: Poređenje performansi kontrolera za prigušenje oscilacija

Tip kontrolera	Energija upravljanja [%]	Vrijeme smirenja [s]
Padeova aproksimacija	100	19,86
Statički kompenzator	106,32	21,47
Adaptivni kompenzator	197,87	10,74



Slika 5.27: Odziv sistema od 68 čvorova pri različitim nivoima kašnjenja

Kako bi se dodatno ispitala robusnost predloženog kontrolera sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, sprovedene su simulacije trolejnog kratkog spoja sa različitim nivoima komunikacionog kašnjenja. Odzivi sistema nakon poremećaja za različite nivoe komunikacionog kašnjenja prikazani su na Slici 5.27. Predstavljeni rezultati potvrđuju da, sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, povećanje nivoa komunikacionog kašnjenja rezultira dodatnim prigušenjem među-zonskih oscilacija.

5.2.5 Adaptivni sistem za prigušenje oscilacija

U ovom potpoglavlju predstavljena je procedura razvoja i analiza performansi adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija za sistem od 16 mašina i 68 čvorova.

Priprema podataka za obučavanje neuralne mreže

Za pripremu podataka za obučavanje korišćena je ista procedura kao i u slučaju dvozonskog sistema. Konkretno, operativni scenariji od interesa generisani su slučajnim uzorkovanjem odgovarajućih funkcija raspodjele. Jedina razlika u odnosu na dvozonski sistem jeste modelovanje potrošnje normalnom raspodjelom srednje vrijednosti 16,5 GW i standardne devijacije 500 MW. Za svaki od operativnih scenarija sprovedena je estimacija stanja i dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija primjenom metode reziduuma. Na ovaj način generisano je 10.000 uzoraka koji se koriste za obučavanje, validaciju i testiranje neuralne mreže u razmjeri 70-15-15, respektivno.

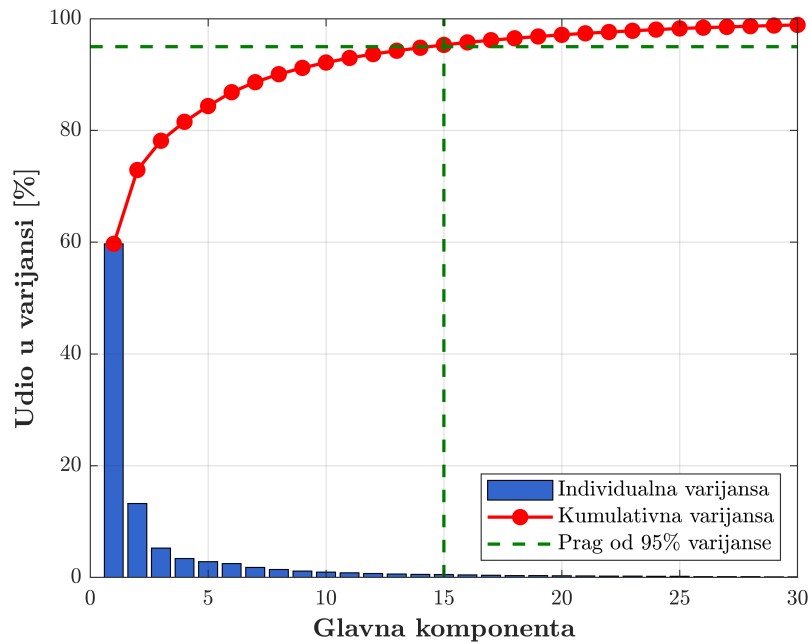
Struktura neuralne mreže

Kao što je ranije objašnjeno, broj neurona u ulaznom sloju neuralne mreže odgovara broju ulaznih karakteristika. U konkretnom slučaju, ulazne karakteristike predstavljaju estimirane vrijednosti modula i faznih stavova napona u čvorovima sistema. Prema tome, ako bi za predviđanje parametara kontrolera za prigušenje oscilacija bio korišćen cijeli vektor stanja, broj ulaznih karakteristika u slučaju sistema regije Nove Engleske i države Njujork iznosio bi 136.

Obučavanje modela mašinskog učenja sa velikim brojem ulaznih karakteristika suočeno je sa problemom poznatim kao prokletstvo dimenzionalnosti (eng. *curse of dimensionality*). Ovaj problem je posljedica činjenice da, sa povećanjem broja ulaznih karakteristika, raspodjela uzoraka u višedimenzionalnom prostoru postaje sve rjeđa. Kako bi se osigurala sposobnost generalizacije modela, obično je neophodno proširivanje skupa podataka za obučavanje dodatnim uzorcima, pri čemu broj potrebnih uzoraka eksponencijalno raste s brojem novih karakteristika. Ovim se takođe sprečava preprilagođavanje modela nepoželjnim obrascima, kao što je mjerni šum. Iako su neuralne mreže, pogotovo duboke, u određenoj mjeri otporne na prokletstvo dimenzionalnosti, povećanje broja ulaznih karakteristika rezultira povećanjem složenosti same neuralne mreže i povećanjem proračunske složenosti procesa obučavanja. Iz tog razloga se neuralne mreže često koriste u kombinaciji sa metodama za smanjenje dimenzionalnosti podataka.

Jedna od najpopularnijih metoda za smanjenje dimenzionalnosti je analiza glavnih komponenti (eng. *Principal Component Analysis*, PCA), koja pripada klasi metoda za izdvajanje karakteristika [145]. PCA transformiše originalni skup korelisanih karakteristika u skup linearno nekorelisanih promjenljivih koje se nazivaju glavnim komponentama. Glavne komponente su međusobno ortogonalne i opisuju različite djelove varijanse u ulaznim podacima. U praktičnim primjenama, obično je najveći dio varijanse u ulaznim podacima moguće opisati sa relativno malim brojem glavnih komponenti. Rezultati primjene analize glavnih komponenti na skupu podataka za obučavanje neuralne mreže predstavljeni su na Slici 5.28. Kao što se uočava, već 15 glavnih komponenti opisuje više od 95% varijanse ulaznih karakteristika. Ove glavne komponente će biti korišćene za obučavanje neuralne mreže umjesto 136 originalnih karakteristika, čime se broj ulaznih karakteristika smanjuje približno 90%.

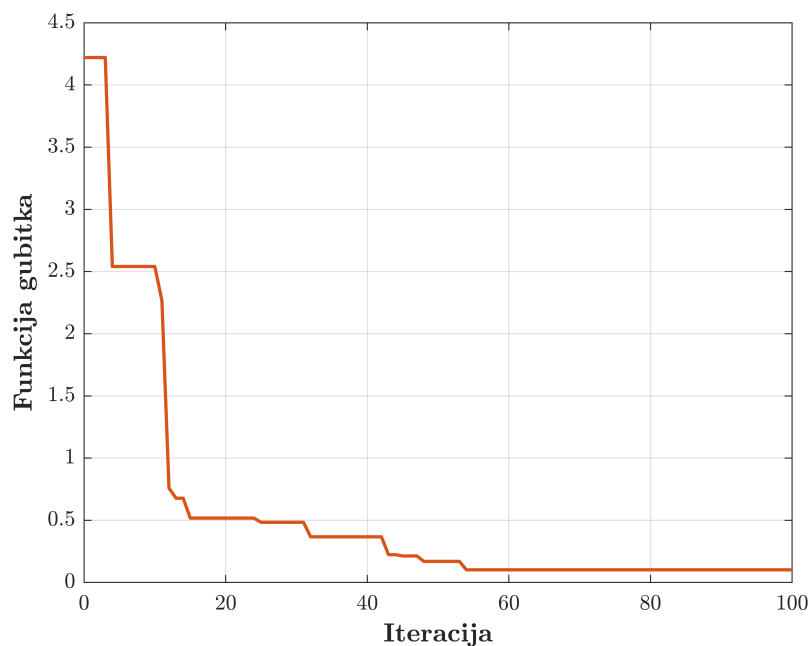
Broj neurona u izlaznom sloju odgovara broju izlaznih karakteristika. U konkretnom slučaju, izlazne karakteristike predstavljaju parametre kontrolera za prigušenje oscilacija, uključujući broj *lead-lag* blokova, vremenske konstante T_1 i T_2 , kao i pojačanje kontrolera K . Na kraju, broj skrivenih slojeva i broj neurona u njima određuje se tokom procesa optimizacije hiperparametara.



Slika 5.28: Rezultati primjene analize glavnih komponenti

Optimizacija hiperparametara i obučavanje neuralne mreže

Za optimizaciju hiperparametara i obučavanje neuralne mreže primijenjen je isti pristup kao i u slučaju Kundurovog dvoznoskog sistema. Hiperparametri neuralne mreže određeni su primjenom Bajesovske optimizacije, čija je kriva konvergencije predstavljena na Slici 5.29. Kao što se uočava, optimizacioni postupak je konvergirao nakon nešto više od 50 iteracija, kao i u slučaju dvoznoskog sistema.



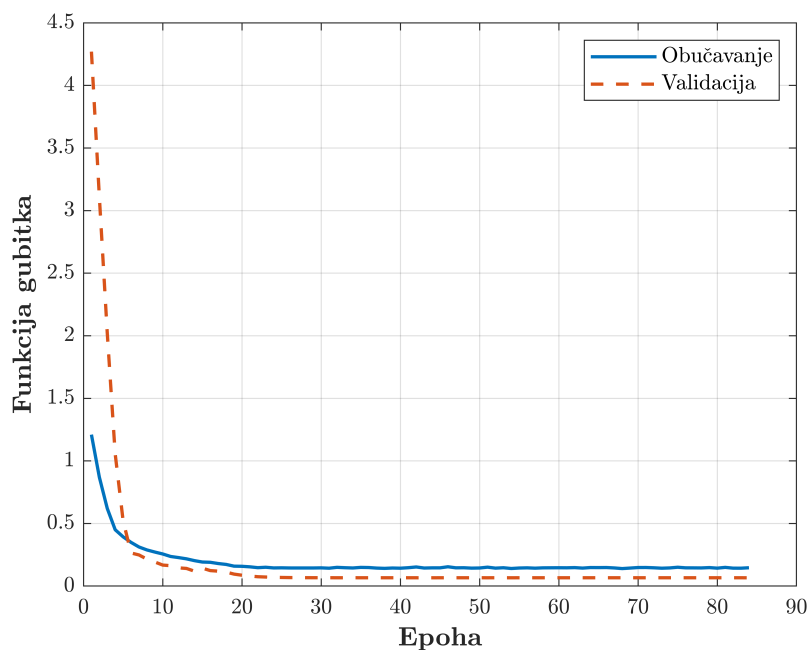
Slika 5.29: Konvergencija Bajesovske optimizacije za sistem od 68 čvorova

Tabela 5.13: Optimizacija hiperparametara za sistem od 68 čvorova

Hiperparametar	Opseg vrijednosti	Optimalna vrijednost
Broj skrivenih slojeva	1 – 10	3
Broj neurona	32 – 512	68
Stopa učenja	10^{-6} – 10^{-2}	10^{-2}
Stopa nasumičnog isključivanja	0,1 – 0,5	0,1
Faktor penalizacije	10^{-6} – 10^{-2}	10^{-6}
Veličina podskupa	4 – 1024	32
Težinski koeficijent klasifikacije	0,25 – 4	0,28
Težinski koeficijent regresije	0,25 – 4	0,25

Opseg i optimalne vrijednosti hiperparametara određene primjenom Bajesovske optimizacije predstavljene su u Tabeli 5.13. Za razliku od dvozonkog sistema, Bajesovska optimizacija je u slučaju sistema od 68 čvorova rezultirala dubljom mrežom sa manjim brojem neurona u skrivenim slojevima, dok se za obučavanje neuralne mreže koriste podskupovi sa manjim brojem uzoraka. Vrijednosti ostalih hiperparametara su iste kao u slučaju dvozonkog sistema.

Nakon optimizacije hiperparametara, sprovedeno je obučavanje neuralne mreže. Krive gubitka na skupovima podataka za obučavanje i validaciju prikazane su na Slici 5.30. Kao što se uočava, proces obučavanja karakteriše brza i stabilna konvergencija, bez znakova preprilagođavanja skupu podataka za obučavanje.



Slika 5.30: Krive gubitka neuralne mreže za sistem od 68 čvorova

Analiza performansi neuralne mreže

Za ocjenu performansi neuralne mreže u zadacima klasifikacije i regresije primijenjeni su isti pokazatelji kao u slučaju dvozonskog sistema. Konkretno, dok se za ocjenu performansi klasifikacije koriste preciznost, odziv i F_1 mjera, za ocjenu performansi regresije koriste se MSE, MAE, MAPE i R^2 mjera. Vrijednosti ključnih pokazatelja performansi na skupu podataka za testiranje date su u Tabelama 5.14 i 5.15.

Kontroler za prigušenje oscilacija za sistem od 68 čvorova ima tri ili četiri *lead-lag* bloka. Kao što se uočava, neuralna mreža pokazuje visoku preciznost za obje klase. Vrijednosti svih pokazatelja ukazuju na blagu pristrasnost neuralne mreže ka uzorcima $n = 3$ klase, što je posljedica umjerene neizbalansiranosti podataka. Međutim, kako su ponderisane srednje vrijednosti svih pokazatelja izuzetno visoke, nije razmatrana primjena metoda balansiranja podataka.

Pokazatelji performansi regresije ukazuju na visoku preciznost neuralne mreže u predviđanju parametara kontrolera za prigušenje oscilacija. Performanse neuralne mreže posebno dolaze do izražaja u slučaju vremenskih konstanti T_1 i T_2 , kod kojih je srednja procentualna greška predviđanja manja od 1%. Greška u predviđanju pojačanja kontrolera je nešto veća, međutim, ovo predstavlja povoljniji slučaj od nepreciznog predviđanja vremenskih konstanti. R^2 mjere za sve parametre kontrolera ukazuju da neuralna mreža objašnjava više od 80% varijanse izlaznih karakteristika. Zanimljivo, tokom izrade ove disertacije ustanovljeno je da se srednja vrijednost R^2 mjere povećava oko 5% kada se neuralna mreža obučava na glavnim komponentama.

Tabela 5.14: Pokazatelji performansi klasifikacije u sistemu od 68 čvorova

Klasa	Preciznost	Odziv	F_1 mjera
$n = 3$	0,9988	0,9943	0,9965
$n = 4$	0,9735	0,9942	0,9838
Srednja vrijednost	0,9944	0,9943	0,9943

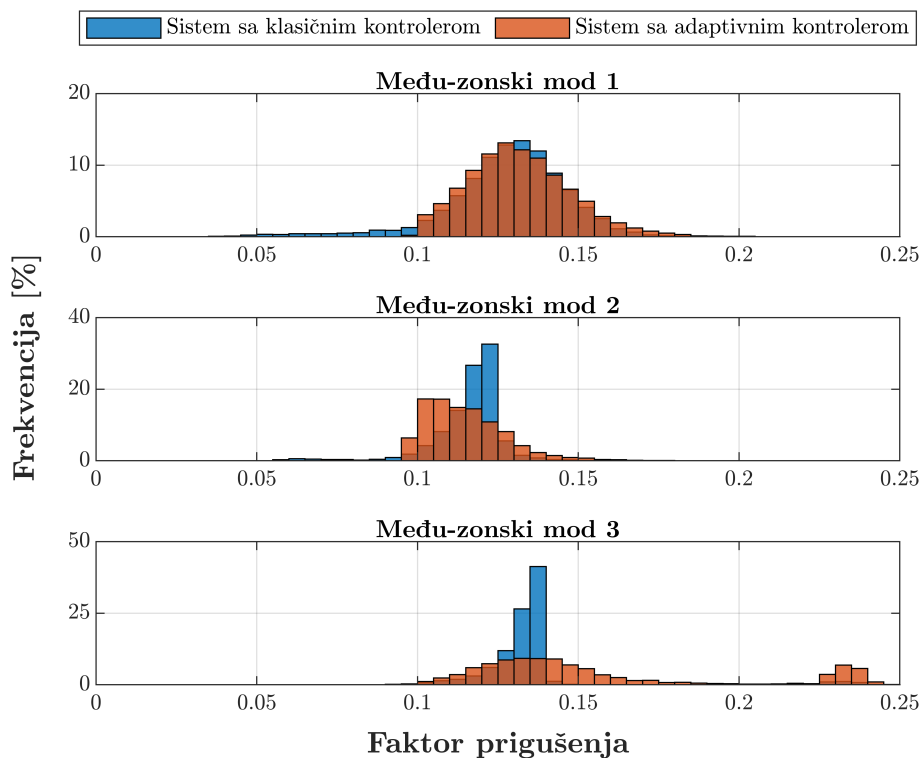
Tabela 5.15: Pokazatelji performansi regresije u sistemu od 68 čvorova

Parametar	MSE [$\times 10^{-4}$]	MAE [$\times 10^{-2}$]	MAPE [%]	R^2
T_1	0,91	0,51	0,86	0,8852
T_2	0,07	0,14	0,98	0,8160
K	89,05	5,53	5,99	0,8406
Srednja vrijednost	30,01	2,06	2,61	0,8473

Analiza statičke stabilnosti

Kako bi se ispitale performanse adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija, modalna analiza je sprovedena za 10.000 operativnih scenarija uvedenih u potpoglavlju 5.2.1. Pri tom, za svaki od operativnih scenarija su parametri kontrolera za prigušenje oscilacija podešeni na osnovu estimiranih vrijednosti modula i faznih stavova napona u čvorovima sistema. Histogramski prikaz faktora prigušenja kritičnih među-zonskih modova sa klasičnim i adaptivnim sistemom za prigušenje oscilacija predstavljen je na Slici 5.31. Numerički rezultati predstavljeni su Tabeli 5.16.

Kao što se uočava, doprinos adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija je najevidentniji u slučaju prvog među-zonskog moda koji je sa adaptivnim sistemom adekvatno prigušen u gotovo svim operativnim scenarijima. Ovo je očekivano s obzirom da se, prilikom pripreme podataka za obučavanje neuralne mreže, prvi među-zonski mod smatra kritičnim. Doprinos adaptivnog sistema prigušenju trećeg među-zonskog moda je zanemarljiv s obzirom da je ovaj mod adekvatno prigušen u gotovo svim operativnim scenarijima i sa klasičnim sistemom sa prigušenje oscilacija. Na kraju, adaptivno ažuriranje parametara kontrolera rezultira blagom degradacijom performansi sistema za prigušenje oscilacija kada je u pitanju drugi među-zonski mod. Ovo je posljedica činjenice da je drugi među-zonski mod najmanje kontrolabilan i opservabilan u usvojenoj upravljačkoj petlji, pa njegovo prigušenje zahtijeva najveće



Slika 5.31: Raspodjela faktora prigušenja sa klasičnim i adaptivnim kontrolerom

Tabela 5.16: Poređenje performansi klasičnog i adaptivnog sistema

Među-zonski mod	Udio adekvatno prigušenih scenarija [%]	
	Klasični sistem	Adaptivni sistem
1	93,48	99,78
2	94,56	93,57
3	99,46	99,73

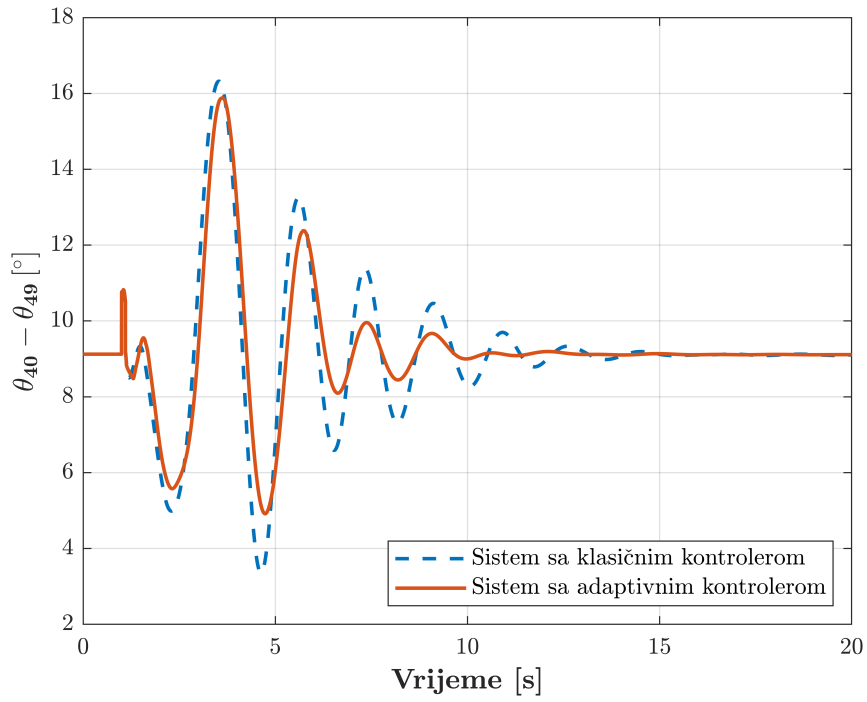
vrijednosti pojačanja, pri kojoj su ostali među-zonski modovi više nego adekvatno prigušeni. Iz tog razloga, greške predviđanja pojačanja kontrolera, čija srednja procentualna vrijednost iznosi približno 6%, negativno utiču na drugi među-zonski mod, dok je uticaj na ostale među-zonske modove zanemarljiv.

Iako adaptivni sistem za prigušenje oscilacija rezultira blagim smanjenjem udjela adekvatno prigušenih scenarija za drugi među-zonski mod, sa Slike 5.16 je jasno da je u slabo prigušenim operativnim scenarijima faktor prigušenja drugog među-zonskog moda veoma blizak željenoj vrijednosti. Konkretno, minimalna vrijednost faktora prigušenja drugog među-zonskog moda u svim operativnim scenarijima iznosi 0,0939. Prema tome, jasno je da je ovaj pristup povoljniji u odnosu na klasični sistem za prigušenje oscilacija kod kojeg faktor prigušenja drugog među-zonskog moda u određenim operativnim scenarijima dostiže minimalnu vrijednost od 0,0527. Drugim riječima, adaptivni sistem za prigušenje oscilacija garantuje bolje performanse od klasičnog sistema u najgorem mogućem slučaju.

Analiza tranzijentne stabilnosti

Na kraju, kako bi se ispitala performanse adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija pri velikim poremećajima, simuliran je trolejni kratki spoj u trajanju od 100 ms na sabirnicama 34. Za operativni scenario prije kvara odabran je jedan od operativnih scenarija u kojem klasični sistem za prigušenje oscilacija ne rezultira adekvatnim prigušenjem sva tri među-zonska moda. Kao i ranije, komunikaciono kašnjenje stohastički varira između 100 i 300 ms tokom trajanja simulacije.

Dinamički odgovor elektroenergetskog sistema na trolejni kratki spoj predstavljen je na Slici 5.32 kroz vremensku promjenu razlike faznih stavova napona u čvorovima 40 i 49. Kao što je ranije objašnjeno, ova razlika faznih stavova koristi se za monitoring oscilacija i predstavlja ulazni signal kontrolera za prigušenje oscilacija. Kao što se uočava, u konkretnom operativnom scenariju se vrijeme smirenja oscilacija smanjuje za oko 5 sekundi kada je elektroenergetski sistem opremljen adaptivnim sistemom za prigušenje oscilacija.



Slika 5.32: Odziv sistema od 68 čvorova sa klasičnim i adaptivnim sistemom

Glava 6

Zaključak

Treba učiti sve dotle, dok još nešto ne znaš: ili, ako vjerujemo poslovcu, sve dotle dok si živ.

Seneka, Pisma prijatelju, 76:3

Kao posljedica kontinuiranog rasta potrošnje, ubrzane integracije obnovljivih izvora energije, postepenog gašenja konvencionalnih proizvodnih kapaciteta na fosilna goriva i povećanja prekograničnih razmjena, očuvanje stabilnosti elektroenergetskih sistema predstavlja sve veći izazov. Jedan od najvažnijih problema stabilnosti predstavlja problem slabo prigušenih među-zonskih oscilacija.

Jedini praktičan pristup za rješavanje problema među-zonskih oscilacija je implementacija sistema za prigušenje oscilacija. Sistemi za prigušenje oscilacija predstavljaju specijalizovane sisteme koji podrazumijevaju modulišuće djelovanje na sinhronne generatore, FACTS uređaje ili druge elemente elektroenergetskog sistema s ciljem prigušenja među-zonskih oscilacija.

Dizajn sistema za prigušenje oscilacija predstavlja izuzetno složen problem, čije rješavanje zahtijeva izbor arhitekture sistema, izbor mjernih i upravljačkih signala, tretiranje komunikacionog kašnjenja i dizajn samog kontrolera za prigušenje oscilacija. U skladu sa ovim, opšti cilj ove disertacije bio je razvoj novih pristupa dizajnu sistema za prigušenje oscilacija.

Dizajn sistema za prigušenje oscilacija nemoguć je bez softverskog alata za analizu statičke i tranzijentne stabilnosti elektroenergetskih sistema. Umjesto korišćenja komercijalnih softvera, u okviru ove disertacije razvijen je softverski alat za analizu stabilnosti elektroenergetskih sistema u programskim jezicima MATLAB i Python. U disertaciji su predstavljeni rezultati verifikacije razvijenog alata u odnosu na referentni industrijski softver, koji potvrđuju mogućnost njegove primjene.

Tokom izrade ove disertacije, sprovedena je detaljna analiza postojećih pristupa dizajnu sistema za prigušenje oscilacija. Najvažniji zaključci pregleda literature su:

- U zavisnosti od organizacije, stepena autonomije i načina komunikacije između pojedinačnih kontrolera, razlikuju se decentralizovane, centralizovane, distribuirane i hijerarhijske arhitekture sistema za prigušenje oscilacija. Centralizovane, distribuirane i hijerarhijske arhitekture po pravilu karakterišu bolje performanse od decentralizovanih, međutim, decentralizovane arhitekture nude brojne prednosti s aspekta praktične implementacije. Konkretno, decentralizovane sisteme karakteriše najniža kompleksnost i najniži troškovi implementacije, najveća pouzdanost i skalabilnost, kao i najveća brzina odziva.
- Za izbor mjernih i upravljačkih signala u sistemima za prigušenje oscilacija najčešće se koriste reziduurne funkcije prenosa, kao i modalne i geometrijske mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti. Geometrijske mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti predstavljaju najbolji pristup, jer omogućavaju poređenje upravljačkih petlji sa različitim vrstama mjernih signala.
- Postojeće metode za dizajn kontrolera za prigušenje oscilacija mogu se svrstati u jednu od pet kategorija, uključujući: klasične metode kao što je metoda reziduuma, metode optimalnog upravljanja, metode robusnog upravljanja, optimizacione metode i inteligentne metode. Metoda reziduuma predstavlja najintuitivniji pristup sa snažnim teorijskim utemeljenjem i najnižom proračunskom složenošću. Uz to, kontroleri dizajnirani primjenom metode reziduuma imaju strukturu klasičnog stabilizatora elektroenergetskog sistema. Prema tome, metoda reziduuma ima najveći potencijal za praktične primjene.

U skladu sa izloženim pregledom, u ovoj disertaciji je poseban fokus stavljen na razvoj decentralizovanih sistema za prigušenje oscilacija. Kontroleri za prigušenje oscilacija dizajniraju se primjenom metode reziduuma, dok se robusnost kontrolera teži postići kroz adekvatan izbor upravljačke petlje i adekvatno tretiranje komunikacionog kašnjenja u prenosu mjernih i upravljačkih signala.

Uvažavajući činjenicu da upravljačka petlja treba da obezbijedi minimalnu interakciju kontrolera za prigušenje oscilacija sa ostalim modovima u sistemu, u ovoj disertaciji je za ovu namjenu predložena mjera modalne interakcije na bazi geometrijskih mjera kontrolabilnosti i opservabilnosti. Optimalna upravljačka petlja određuje se na osnovu kompromisa između kombinovane mjere kontrolabilnosti i opservabilnosti kritičnih oscilatornih modova i mjere modalne interakcije. Predstavljeni rezultati ukazuju da se ovakvim izborom upravljačke petlje omogućava adekvatno prigušenje među-zonskih oscilacija, uz zanemarljiv uticaj na ostale modove u sistemu.

Iako visoka kontrolabilnost i opservabilnost kritičnih oscilatornih modova i niska interakcija sa ostalim modovima u sistemu predstavljaju potrebne uslove, u ovoj disertaciji je pokazano da isti nijesu dovoljni kada se kontroler za prigušenje oscilacija dizajnira primjenom metode reziduuma. Predstavljani rezultati ukazuju da robusnost kontrolera za prigušenje oscilacija dizajniranih primjenom metode reziduuma zavisi od varijabilnosti ugla reziduuma u različitim operativnim scenarijima. Konkretno, što je varijabilnost ugla reziduuma veća, to je rezultujući kontroler manje robusan na promjene radnih uslova u elektroenergetskom sistemu. Prema tome, prilikom izbora upravljačke petlje neophodno je uzeti u obzir varijabilnost ugla reziduuma, za šta je u ovoj disertaciji predložena mjera kružne varijanse.

Metoda reziduuma je u dostupnim istraživanjima korišćena za dizajn kontrolera čiji je cilj prigušenje samo jednog oscilatornog moda. Problem ovog pristupa je što broj potrebnih kontrolera za prigušenje oscilacija odgovara broju slabo prigušenih modova. U ovoj disertaciji je pokazano da se adekvatno prigušenje više oscilatornih modova može ostvariti jednim kontrolerom za prigušenje oscilacija dizajniranim primjenom metode reziduuma. Ovo je moguće ako se rezultujući uglovi pomjeraja kritičnih svojstvenih vrijednosti nalaze u uskom opsegu oko 180° . Primjenom ovog uslova moguće je izvršiti predselekciju upravljačkih petlji koje omogućavaju simultano prigušenje više kritičnih oscilatornih modova.

Kod primjene metode reziduuma u literaturi, komunikaciono kašnjenje se najčešće zanemaruje ili smatra fiksnim. U ovoj disertaciji je pokazano da u uslovima realnog komunikacionog kašnjenja dolazi do ozbiljne degradacije performansi ovako dizajniranih kontrolera. Kako bi se povećala robusnost na varijabilno komunikaciono kašnjenje, u ovoj disertaciji je kontroler za prigušenje oscilacija, dizajniran primjenom metode reziduuma, proširen adaptivnim kompenzatorom kašnjenja. Primjena adaptivnog kompenzatora kašnjenja pogoduje primjeni metode reziduuma, jer u potpunosti eliminiše fazni pomak koji je posljedica komunikacionog kašnjenja iz upravljačke petlje. Štaviše, predstavljani rezultati ukazuju da, sa adaptivnim kompenzatorom kašnjenja, povećanje komunikacionog kašnjenja ima isti efekat na kritične modove kao i povećanje pojačanja kontrolera za prigušenje oscilacija.

U dostupnoj literaturi nije pronađena detaljna analiza robusnosti sistema za prigušenje oscilacija sa kontrolerima dizajniranim primjenom metode reziduuma. Iz tog razloga su performanse razvijenih kontrolera u ovoj disertaciji ispitane u 10.000 operativnih scenarija, uzimajući u obzir različite nivoe komunikacionog kašnjenja. Predstavljani rezultati ukazuju da su, kada se sistem za prigušenje oscilacija dizajnira primjenom metoda predloženih u ovoj disertaciji, među-zonske oscilacije adekvatno prigušene u više od 90% scenarija.

Kontroleri dizajnirani primjenom metode reziduuma ne mogu obezbijediti adekvatno prigušenje oscilacija u svim operativnim scenarijima zbog varijacija kontrolabilnosti i opservabilnosti kritičnih oscilatornih modova, kao i pripadajućih uglova reziduuma. Dok promjene kontrolabilnosti i opservabilnosti zahtijevaju promjene pojačanja, promjene ugla reziduuma zahtijevaju promjenu fazne karakteristike kontrolera za prigušenje oscilacija. U ovoj disertaciji je predložen adaptivni sistem za prigušenje oscilacija u kojem se parametri kontrolera ažuriraju primjenom neuralne mreže na osnovu estimiranih vrijednosti modula i faznih stavova napona u čvorovima sistema. Prilikom formiranja skupa podataka za obučavanje, za svaki operativni scenario elektroenergetskog sistema se optimalne vrijednosti parametara kontrolera određuju primjenom metode reziduuma. Rezultati predviđanja na skupu podataka za testiranje ukazuju da neuralna mreža uspješno objašnjava preko 80% varijanse optimalnih vrijednosti parametara kontrolera. Zahvaljujući tome, adaptivni sistem za prigušenje oscilacija obezbjeđuje adekvatno prigušenje oscilacija na značajno širem spektru operativnih scenarija.

Uprkos obećavajućim rezultatima, pristupi predloženi u ovoj disertaciji podliježu određenim ograničenjima. Prije svega, fokus na decentralizovane arhitekture, iako opravdan s aspekta praktične implementacije, potencijalno ograničava performanse i robusnost sistema za prigušenje oscilacija u poređenju sa centralizovanim, distribuiranim i hijerarhijskim arhitekturama. Uz to, performanse dizajniranih sistema za prigušenje oscilacija ispitane su isključivo u simulacionom okruženju, dok je verifikacija na digitalnim simulatorima u realnom vremenu izostala zbog finansijskih ograničenja. Ovakva verifikacija, koja bi uključila testiranje sa hardverom u petlji i komunikacionom infrastrukturu, predstavlja neophodni korak prije praktične implementacije i mogla bi otkriti dodatne izazove u funkcionisanju sistema za prigušenje oscilacija. Na kraju, performanse adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija zavise od kvaliteta estimacije stanja. U ovoj disertaciji je usvojena pretpostavka da u elektroenergetskom sistemu postoji visoka redudansa mjerenja, pa su rezultujuće procjene vektora stanja pouzdane. Prema tome, performanse adaptivnog sistema za prigušenje oscilacija je neophodno ispitati u elektroenergetskim sistemima sa niskom redudansom mjerenja, gdje velike mjerne greške ili sajber napadi mogu rezultirati degradacijom performansi estimacije stanja. Navedena ograničenja predstavljaju jasne smjernice za buduća istraživanja u oblasti prigušenja među-zonskih oscilacija.

Literatura

- [1] J. E. Maruyama Rentschler, M. G. M. Kornejew, S. Hallegatte, J. M. Braese, and M. A. B. Obolensky, “Underutilized potential: The business costs of unreliable infrastructure in developing countries,” *World Bank policy research working paper*, no. 8899, 2019.
- [2] CIGRE Task Force 38.01.07 on Analysis and Control of Power System Oscillations, “Analysis and control of power system oscillations,” tech. rep., CIGRE, 1996.
- [3] ENTSO-E SG SPD, “Analysis of CE inter-area oscillations of 1st december 2016,” tech. rep., ENTSO-E, 2017.
- [4] System Protection and Dynamics WG, “Oscillation event 03.12.2017,” tech. rep., ENTSO-E, 2018.
- [5] J. Zhao, A. Gómez-Expósito, M. Netto, L. Mili, A. Abur, V. Terzija, I. Kamwa, B. Pal, A. K. Singh, J. Qi, Z. Huang, and A. P. S. Meliopoulos, “Power system dynamic state estimation: Motivations, definitions, methodologies, and future work,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 3188–3198, 2019.
- [6] C. Lu, X. Wu, J. Wu, P. Li, Y. Han, and L. Li, “Implementations and experiences of wide-area HVDC damping control in China southern power grid,” in *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1–7, IEEE, 2012.
- [7] B. J. Pierre, F. Wilches-Bernal, D. A. Schoenwald, R. T. Elliott, D. J. Trudnowski, R. H. Byrne, and J. C. Neely, “Design of the pacific DC intertie wide area damping controller,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 5, pp. 3594–3604, 2019.
- [8] “WebPower: Unlock the Future of Power System Analysis,” 2024. Pristupljeno: 16. februar 2025.

- [9] P. S. Kundur and O. P. Malik, *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill Education, 2nd ed., 2022.
- [10] P. W. Sauer, M. A. Pai, and J. H. Chow, *Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox*. John Wiley & Sons Ltd, 2018.
- [11] R. H. Park, “Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis - part I,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 48, no. 3, pp. 716–727, 1929.
- [12] A. W. Rankin, “Per-unit impedances of synchronous machines,” *Electrical Engineering*, vol. 64, no. 8, pp. 569–573, 1945.
- [13] “IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines,” *IEEE Std 421.1-2007 (Revision of IEEE Std 421.1-1986)*, pp. 1–33, 2007.
- [14] F. Peneder and R. Bertschi, “Static excitation systems with and without a compounding ancillary,” *Brown Boveri Review*, no. 7, pp. 343–348, 1985.
- [15] L. Pereira, J. Undrill, D. Kosterev, D. Davies, and S. Patterson, “A new thermal governor modeling approach in the WECC,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 2, pp. 819–829, 2003.
- [16] “IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies,” *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)*, pp. 1–207, 2016.
- [17] R. L. Witzke, J. V. Kresser, and J. K. Dillard, “Influence of AC reactance on voltage regulation of 6-phase rectifiers,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, vol. 72, no. 3, pp. 244–253, 1953.
- [18] G. Rogers, *Power System Oscillations*. Springer US, 2000.
- [19] E. V. Larsen and D. A. Swann, “Applying Power System Stabilizers Part I: General Concepts,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, no. 6, pp. 3017–3024, 1981.
- [20] M. Čalović, *Regulacija elektroenergetskih sistema*. Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, 1997.

- [21] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, “Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1387–1401, 2004.
- [22] F. R. Schleif, G. E. Martin, and R. R. Angell, “Damping of system oscillations with a hydrogenerating unit,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-86, no. 4, pp. 438–442, 1967.
- [23] F. Milano, *Power System Modelling and Scripting*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [24] IEEE Power & Energy Society, “Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies,” Tech. Rep. PES-TR1, IEEE Power System Dynamic Performance Committee, 2013.
- [25] A. Semerow, S. Höhn, M. Luther, W. Sattinger, H. Abildgaard, A. D. Garcia, and G. Giannuzzi, “Dynamic Study Model for the interconnected power system of Continental Europe in different simulation tools,” in *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*, pp. 1–6, 2015.
- [26] North American Electric Reliability Corporation, “MOD-033-1: Steady-State and Dynamic System Model Validation,” 2015.
- [27] A. Arif, Z. Wang, J. Wang, B. Mather, H. Bashualdo, and D. Zhao, “Load modeling—a review,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 5986–5999, 2018.
- [28] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, and M. E. El-Hawary, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 2000.
- [29] B. Pal and B. Chaudhuri, *Robust Control in Power Systems*. Springer New York, 2006.
- [30] R. H. Park and E. H. Bancker, “System stability as a design problem,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 48, no. 1, pp. 170–193, 1929.
- [31] H. L. Hazen, O. R. Schurig, and M. F. Gardner, “The M.I.T. Network Analyzer Design and Application to Power System Problems,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 49, no. 3, pp. 1102–1113, 1930.

- [32] I. V. Vuckovic, P. Miljanic, and I. Obradovic, “Solving power system problems by means of the AC network analyzer with current sources,” *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 2, no. 4, pp. 190–197, 1960.
- [33] D. L. Johnson and J. B. Ward, “The solution of power system stability problems by means of digital computers [includes discussion],” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 75, no. 3, pp. 1321–1329, 1956.
- [34] G. W. Stagg, A. F. Gabrielle, D. R. Moore, and J. F. Hohenstein, “Calculation of transient stability problems using a high-speed digital computer,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems*, vol. 78, no. 3, pp. 566–572, 1959.
- [35] M. Pai and P. Sauer, “Stability analysis of power systems by Lyapunov’s direct method,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 23–27, 1989.
- [36] P. Varaiya, F. Wu, and R.-L. Chen, “Direct methods for transient stability analysis of power systems: Recent results,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, no. 12, pp. 1703–1715, 1985.
- [37] M. Ribbens-Pavella and F. Evans, “Direct methods for studying dynamics of large-scale electric power systems—a survey,” *Automatica*, vol. 21, no. 1, pp. 1–21, 1985.
- [38] G. G. Dahlquist, “A special stability problem for linear multistep methods,” *BIT Numerical Mathematics*, vol. 3, pp. 27–43, Mar. 1963.
- [39] K. E. Atkinson, W. Han, and D. Stewart, *Numerical Solution of Ordinary Differential Equations*. Wiley, Jan. 2009.
- [40] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and R. J. Thomas, “MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, 2011.
- [41] J. Chow and K. Cheung, “A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 1559–1564, 1992.
- [42] B. Buchberger, G. E. Collins, and R. Loos, eds., *Computer algebra*. Computing Supplementa, Vienna, Austria: Springer, 2 ed., Oct. 1983.

- [43] Y. Saad, *Iterative Methods for Sparse Linear Systems*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Jan. 2003.
- [44] Siemens AG, “PSS/E – High-Performance Transmission Planning and Analysis Software,” 2025.
- [45] P. S. D. P. Committee, P. S. S. C. Subcommittee, and B. S. for Stability Controls Task Force, “Benchmark systems for small-signal stability analysis and control,” Tech. Rep. PES-TR18, IEEE Power & Energy Society, August 2015.
- [46] P. Zhang and A. Coonick, “Coordinated synthesis of pss parameters in multi-machine power systems using the method of inequalities applied to genetic algorithms,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 811–816, 2000.
- [47] R. Jabr, B. Pal, N. Martins, and J. Ferraz, “Robust and coordinated tuning of power system stabiliser gains using sequential linear programming,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 4, pp. 893–904, 2010.
- [48] R. A. Jabr, B. C. Pal, and N. Martins, “A sequential conic programming approach for the coordinated and robust design of power system stabilizers,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 3, pp. 1627–1637, 2010.
- [49] M. Saejia and I. Ngamroo, “A robust centralized SMES controller design based on wams considering system and communication delay uncertainties,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 4, pp. 846–852, 2011.
- [50] B. P. Padhy, S. C. Srivastava, and N. K. Verma, “A wide-area damping controller considering network input and output delays and packet drop,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 166–176, 2017.
- [51] D. Wang, M. Glavic, and L. Wehenkel, “Comparison of centralized, distributed and hierarchical model predictive control schemes for electromechanical oscillations damping in large-scale power systems,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 58, pp. 32–41, 2014.
- [52] N. Mira-Gebauer, C. Rahmann, R. Álvarez Malebrán, and V. Vittal, “Review of wide-area controllers for supporting power system stability,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 8073–8095, 2023.

- [53] I. Kamwa, R. Grondin, and Y. Hebert, "Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems—a decentralized/hierarchical approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 136–153, 2001.
- [54] T. Surinkaew and I. Ngamroo, "Hierarchical Coordinated Wide Area and Local Controls of DFIG Wind Turbine and PSS for Robust Power Oscillation Damping," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 943–955, 2016.
- [55] T. Surinkaew and I. Ngamroo, "Two-level coordinated controllers for robust inter-area oscillation damping considering impact of local latency," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 18, pp. 4520–4530, 2017.
- [56] M. Klein, G. Rogers, and P. Kundur, "A fundamental study of inter-area oscillations in power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 6, no. 3, pp. 914–921, 1991.
- [57] R. Eriksson and L. Söder, "Wide-area measurement system-based subspace identification for obtaining linear models to centrally coordinate controllable devices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 988–997, 2011.
- [58] M. Klein, G. Rogers, S. Moorthy, and P. Kundur, "Analytical investigation of factors influencing power system stabilizers performance," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, no. 3, pp. 382–390, 1992.
- [59] J. Chow, J. Sanchez-Gasca, H. Ren, and S. Wang, "Power system damping controller design—using multiple input signals," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 20, no. 4, pp. 82–90, 2000.
- [60] S. Zhang and V. Vittal, "Design of wide-area power system damping controllers resilient to communication failures," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 4, pp. 4292–4300, 2013.
- [61] S. Zhang and V. Vittal, "Wide-area control resiliency using redundant communication paths," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 5, pp. 2189–2199, 2014.
- [62] M. Aboul-Ela, A. Sallam, J. McCalley, and A. Fouad, "Damping controller design for power system oscillations using global signals," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 2, pp. 767–773, 1996.

- [63] B. Chaudhuri and B. Pal, “Robust damping of multiple swing modes employing global stabilizing signals with a TCSC,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 499–506, 2004.
- [64] B. Chaudhuri, R. Majumder, and B. Pal, “Wide-area measurement-based stabilizing control of power system considering signal transmission delay,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 1971–1979, 2004.
- [65] I. Kamwa, R. Grondin, and Y. Hebert, “Wide-area measurement based stabilizing control of large power systems - a decentralized/hierarchical approach,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 1, pp. 136–153, 2001.
- [66] A. Hamdan and A. Elabdalla, “Geometric measures of modal controllability and observability of power system models,” *Electric Power Systems Research*, vol. 15, no. 2, pp. 147–155, 1988.
- [67] A. Heniche and I. Kamwa, “Assessment of two methods to select wide-area signals for power system damping control,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 2, pp. 572–581, 2008.
- [68] J. Milanovic and A. Duque, “Identification of electromechanical modes and placement of PSSs using relative gain array,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 410–417, 2004.
- [69] M. Farsangi, Y. Song, and K. Lee, “Choice of facts device control inputs for damping interarea oscillations,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 1135–1143, 2004.
- [70] Y. Yuan, G. Li, L. Cheng, Y. Sun, J. Zhang, and P. Wang, “A phase compensator for SVC supplementary control to eliminate time delay by wide area signal input,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 163–169, 2010.
- [71] J. Qi, Q. Wu, Y. Zhang, G. Weng, and D. Zhou, “Unified residue method for design of compact wide-area damping controller based on power system stabilizer,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 367–376, 2020.
- [72] W. Yao, L. Jiang, J. Wen, Q. H. Wu, and S. Cheng, “Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communication time delays,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 1, pp. 318–329, 2014.

- [73] W. Yao, L. Jiang, Q. H. Wu, J. Y. Wen, and S. J. Cheng, “Delay-dependent stability analysis of the power system with a wide-area damping controller embedded,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 233–240, 2011.
- [74] J. Zhang, C. Y. Chung, and Y. Han, “A novel modal decomposition control and its application to pss design for damping interarea oscillations in power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 2015–2025, 2012.
- [75] M. Weiss, B. N. Abu-Jaradeh, A. Chakraborty, A. Jamehbozorg, F. Habibi-Ashrafi, and A. Salazar, “A wide-area SVC controller design for inter-area oscillation damping in WECC based on a structured dynamic equivalent model,” *Electric Power Systems Research*, vol. 133, pp. 1–11, 2016.
- [76] J. Sanchez-Gasca and J. Chow, “Power system reduction to simplify the design of damping controllers for interarea oscillations,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1342–1349, 1996.
- [77] D. Dotta, A. S. e Silva, and I. C. Decker, “Wide-area measurements-based two-level control design considering signal transmission delay,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 208–216, 2009.
- [78] A. E. Leon and J. A. Solsona, “Power oscillation damping improvement by adding multiple wind farms to wide-area coordinating controls,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1356–1364, 2014.
- [79] A. E. Leon, G. Revel, D. M. Alonso, and G. E. Alonso, “Wind power converters improving the power system stability,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 7, pp. 1622–1633, 2016.
- [80] J. M. Mauricio and A. E. Leon, “Improving small-signal stability of power systems with significant converter-interfaced generation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 2904–2914, 2020.
- [81] S. Wang, J. Zhao, Z. Huang, and R. Diao, “Assessing Gaussian assumption of PMU measurement error using field data,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 33, no. 6, pp. 3233–3236, 2018.
- [82] R. Shah, N. Mithulananthan, and K. Y. Lee, “Large-scale PV plant with a robust controller considering power oscillation damping,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 1, pp. 106–116, 2013.

- [83] R. Shah, N. Mithulananthan, K. Y. Lee, and R. C. Bansal, "Wide-area measurement signal-based stabiliser for large-scale photovoltaic plants with high variability and uncertainty," *IET Renewable Power Generation*, vol. 7, no. 6, pp. 614–622, 2013.
- [84] A. Simoes Costa, F. Freitas, and A. e Silva, "Design of decentralized controllers for large power systems considering sparsity," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 12, no. 1, pp. 144–152, 1997.
- [85] R. Preece, J. V. Milanović, A. M. Almutairi, and O. Marjanovic, "Damping of inter-area oscillations in mixed AC/DC networks using WAMS based supplementary controller," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1160–1169, 2013.
- [86] R. Preece, J. V. Milanovic, A. M. Almutairi, and O. Marjanovic, "Probabilistic evaluation of damping controller in networks with multiple VSC-HVDC lines," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 1, pp. 367–376, 2013.
- [87] T. Short, D. Pierre, and J. Smith, "Self-tuning generalized predictive control for switched capacitor damping of power system oscillations," in *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 1847–1852 vol.2, 1989.
- [88] D. Clarke, C. Mohtadi, and P. Tuffs, "Generalized predictive control — part I. the basic algorithm," *Automatica*, vol. 23, no. 2, pp. 137–148, 1987.
- [89] J. Barreiros, A. e Silva, and A. Simões Costa, "A self-tuning generalized predictive power system stabilizer," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 20, no. 3, pp. 213–219, 1998.
- [90] B. Chaudhuri, R. Majumder, and B. Pal, "Application of multiple-model adaptive control strategy for robust damping of interarea oscillations in power system," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 5, pp. 727–736, 2004.
- [91] R. Majumder, B. Chaudhuri, and B. Pal, "A probabilistic approach to model-based adaptive control for damping of interarea oscillations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 367–374, 2005.
- [92] W. Yao, L. Jiang, J. Wen, Q. Wu, and S. Cheng, "Wide-area damping controller for power system interarea oscillations: A networked predictive control

- approach,” *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 1, pp. 27–36, 2015.
- [93] K. Watanabe and M. Ito, “A process-model control for linear systems with delay,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 26, no. 6, pp. 1261–1269, 1981.
- [94] Q.-C. Zhong, “ H_∞ control of dead-time systems based on a transformation,” *Automatica*, vol. 39, no. 2, pp. 361–366, 2003.
- [95] M. Safonov and R. Chiang, “A Schur method for balanced-truncation model reduction,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 34, no. 7, pp. 729–733, 1989.
- [96] M. Sarkar and B. Subudhi, “Fixed low-order synchronized and non-synchronized wide-area damping controllers for inter-area oscillation in power system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 113, pp. 582–596, 2019.
- [97] J. Burke, D. Henrion, A. Lewis, and M. Overton, “HIFOO - A MATLAB package for fixed-order controller design and H_∞ optimization,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, no. 9, pp. 339–344, 2006. 5th IFAC Symposium on Robust Control Design.
- [98] M. Djukanovic, M. Khammash, and V. Vittal, “Sequential synthesis of structured singular value based decentralized controllers in power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 635–641, 1999.
- [99] X. Yu, M. Khammash, and V. Vittal, “Robust design of a damping controller for static VAR compensators in power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 456–462, 2001.
- [100] S. Zhang and V. Vittal, “Design of wide-area damping control robust to transmission delay using μ -synthesis approach,” in *2014 IEEE PES General Meeting / Conference & Exposition*, pp. 1–5, 2014.
- [101] X. Xie and C. Lu, “Optimization and coordination of wide-area damping controls for enhancing the transfer capability of interconnected power systems,” *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 6, pp. 1099–1108, 2008.
- [102] X. Mao, Y. Zhang, L. Guan, X. Wu, and N. Zhang, “Improving power system dynamic performance using wide-area high-voltage direct current damping

- control,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 2, pp. 245–251, 2008.
- [103] X. Lei, E. Lerch, and D. Povh, “Optimization and coordination of damping controls for improving system dynamic performance,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 3, pp. 473–480, 2001.
- [104] L. Simon, K. S. Swarup, and J. Ravishankar, “Wide area oscillation damping controller for DFIG using WAMS with delay compensation,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 1, pp. 128–137, 2019.
- [105] M. Mokhtari and F. Aminifar, “Toward wide-area oscillation control through doubly-fed induction generator wind farms,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 2985–2992, 2014.
- [106] Y. Nie, P. Zhang, G. Cai, Y. Zhao, and M. Xu, “Unified Smith predictor compensation and optimal damping control for time-delay power system,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 117, p. 105670, 2020.
- [107] M. Shakarami and I. Faraji Davoudkhani, “Wide-area power system stabilizer design based on grey wolf optimization algorithm considering the time delay,” *Electric Power Systems Research*, vol. 133, pp. 149–159, 2016.
- [108] H. Setiadi, N. Mithulananthan, R. Shah, T. Raghunathan, and T. Jayabarathi, “Enabling resilient wide-area POD at BESS in Java, Indonesia 500 kV power grid,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, pp. 3734–3744, 2019.
- [109] D. Ke and C. Y. Chung, “Design of probabilistically-robust wide-area power system stabilizers to suppress inter-area oscillations of wind integrated power systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 4297–4309, 2016.
- [110] S.-K. Wang, “Coordinated parameter design of power system stabilizers and static synchronous compensator using gradual hybrid differential evaluation,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 81, pp. 165–174, 2016.
- [111] M. Mokhtari, F. Aminifar, D. Nazarpour, and S. Golshannavaz, “Wide-area power oscillation damping with a fuzzy controller compensating the continuous

- communication delays,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 1997–2005, 2013.
- [112] B. P. Padhy, S. C. Srivastava, and N. K. Verma, “Robust wide-area TS fuzzy output feedback controller for enhancement of stability in multimachine power system,” *IEEE Systems Journal*, vol. 6, no. 3, pp. 426–435, 2012.
- [113] C. xia Dou, X. zhong Zhang, S. liang Guo, and C.-C. Mao, “Delay-independent excitation control for uncertain large power systems using wide-area measurement signals,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 32, no. 3, pp. 210–217, 2010.
- [114] I. Abdulrahman and G. Radman, “Wide-area-based adaptive neuro-fuzzy SVC controller for damping interarea oscillations,” *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 41, no. 3, pp. 133–144, 2018.
- [115] J.-S. Jang, “ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, 1993.
- [116] H. Wu, Q. Wang, and X. Li, “PMU-based wide area damping control of power systems,” in *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*, pp. 1–4, 2008.
- [117] X. Zhong, Z. Ni, and H. He, “A theoretical foundation of goal representation heuristic dynamic programming,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 27, no. 12, pp. 2513–2525, 2016.
- [118] Y. Shen, W. Yao, J. Wen, and H. He, “Adaptive wide-area power oscillation damper design for photovoltaic plant considering delay compensation,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 18, pp. 4511–4519, 2017.
- [119] Y. Shen, W. Yao, J. Wen, H. He, and L. Jiang, “Resilient wide-area damping control using GrHDP to tolerate communication failures,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2547–2557, 2019.
- [120] L. Zeng, W. Yao, Q. Zeng, D. Li, J. Fang, X. Ai, J. Wen, and H. He, “Design and real-time implementation of data-driven adaptive wide-area damping controller for back-to-back VSC-HVDC,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 109, pp. 558–574, 2019.

- [121] M. Beiraghi and A. M. Ranjbar, “Adaptive delay compensator for the robust wide-area damping controller design,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, no. 6, pp. 4966–4976, 2016.
- [122] B. Naduvathuparambil, M. Valenti, and A. Feliachi, “Communication delays in wide area measurement systems,” in *Proceedings of the Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory (Cat. No.02EX540)*, pp. 118–122, 2002.
- [123] K. Mardia and P. Jupp, *Directional Statistics*. Wiley Series in Probability and Statistics, Wiley, 2009.
- [124] L. H. Hassan, M. Moghavvemi, H. A. Almurib, and O. Steinmayer, “Current state of neural networks applications in power system monitoring and control,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 51, pp. 134–144, 2013.
- [125] W. S. McCulloch and W. Pitts, “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity,” *The bulletin of mathematical biophysics*, vol. 5, pp. 115–133, 1943.
- [126] M. Minsky and S. Papert, “An introduction to computational geometry,” *Cambridge tiass., HIT*, vol. 479, no. 480, p. 104, 1969.
- [127] K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White, “Multilayer feedforward networks are universal approximators,” *Neural Networks*, vol. 2, no. 5, pp. 359–366, 1989.
- [128] D. E. Rumelhart, G. E. Hinton, and R. J. Williams, “Learning representations by back-propagating errors,” *Nature*, vol. 323, no. 6088, pp. 533–536, 1986.
- [129] A. Géron, *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: Concepts, tools, and techniques to build intelligent systems*. O’Reilly Media, Inc., 2022.
- [130] F. Almutairy, L. Scekcic, R. Elmoudi, and S. Wshah, “Accurate detection of false data injection attacks in renewable power systems using deep learning,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 135774–135789, 2021.
- [131] F. Almutairy, L. Scekcic, M. Matar, R. Elmoudi, and S. Wshah, “Detection and mitigation of GPS spoofing attacks on phasor measurement units using deep learning,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 151, p. 109160, 2023.

- [132] L. N. Smith, “Cyclical learning rates for training neural networks,” in *2017 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*, pp. 464–472, 2017.
- [133] B. Polyak, “Some methods of speeding up the convergence of iteration methods,” *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 4, no. 5, pp. 1–17, 1964.
- [134] Y. Nesterov, “A method for solving the convex programming problem with convergence rate $O(1/k^2)$,” in *Dokl akad nauk Sssr*, vol. 269, p. 543, 1983.
- [135] J. Duchi, E. Hazan, and Y. Singer, “Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization,” *Journal of machine learning research*, vol. 12, no. 7, 2011.
- [136] G. Hinton, N. Srivastava, and K. Swersky, “Neural networks for machine learning lecture 6a overview of mini-batch gradient descent,” *Cited on*, vol. 14, no. 8, p. 2, 2012.
- [137] D. P. Kingma and J. Ba, “Adam: A method for stochastic optimization,” 2017.
- [138] P. Goyal, P. Dollár, R. Girshick, P. Noordhuis, L. Wesolowski, A. Kyrola, A. Tulloch, Y. Jia, and K. He, “Accurate, large minibatch SGD: Training ImageNet in 1 hour,” 2018.
- [139] G. E. Hinton, N. Srivastava, A. Krizhevsky, I. Sutskever, and R. R. Salakhutdinov, “Improving neural networks by preventing co-adaptation of feature detectors,” 2012.
- [140] A. Abur and A. G. Exposito, *Power system state estimation: theory and implementation*. CRC press, 2004.
- [141] J. Zhao, M. Netto, Z. Huang, S. S. Yu, A. Gómez-Expósito, S. Wang, I. Kamwa, S. Akhlaghi, L. Mili, V. Terzija, A. P. S. Meliopoulos, B. Pal, A. K. Singh, A. Abur, T. Bi, and A. Rouhani, “Roles of dynamic state estimation in power system modeling, monitoring and operation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 36, no. 3, pp. 2462–2472, 2021.
- [142] J. Zhao, A. Gómez-Expósito, M. Netto, L. Mili, A. Abur, V. Terzija, I. Kamwa, B. Pal, A. K. Singh, J. Qi, Z. Huang, and A. P. S. Meliopoulos, “Power system dynamic state estimation: Motivations, definitions, methodologies, and future work,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 3188–3198, 2019.

- [143] P. Tripathy, S. C. Srivastava, and S. N. Singh, "A divide-by-difference-filter based algorithm for estimation of generator rotor angle utilizing synchrophasor measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 6, pp. 1562–1570, 2010.
- [144] E. Ghahremani and I. Kamwa, "Dynamic state estimation in power system by applying the extended kalman filter with unknown inputs to phasor measurements," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, pp. 2556–2566, 2011.
- [145] K. Pearson, "Liii. on lines and planes of closest fit to systems of points in space," *The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science*, vol. 2, no. 11, pp. 559–572, 1901.

BIOGRAFIJA AUTORA

Lazar Šćekić je rođen 1. februara 1998. godine u Nikšiću, gdje je završio osnovnu i srednju školu. Na Elektrotehnički fakultet u Podgorici, odsjek Energetika i automatika, upisao se 2016. godine. Nakon završenih osnovnih studija, upisao se na specijalističke studije na smjeru Elektroenergetski sistemi i iste završio 2020. godine odbranom specijalističkog rada „Komparativna analiza metoda za proračun tokova snaga u elektrodistributivnoj mreži“. Iste godine se upisao na magistarske studije na smjeru Elektroenergetski sistemi, koje je završio 2022. godine odbranom magistarskog rada "Procjena maksimalne sposobnosti niskonaponske elektrodistributivne mreže za priključenje distribuirane proizvodnje na bazi metoda za proračun tokova snaga za neizbalansirane mreže". Doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta Crne Gore upisao je 2022. godine.

Nakon završenog stručnog osposobljavanja, angažovan je u svojstvu honorarnog saradnika u nastavi na smjeru Elektroenergetski sistemi, a radni angažman na Elektrotehničkom fakultetu započinje 2021. godine. Od tada, izvodi računske i laboratorijske vježbe na više predmeta iz oblasti elektroenergetskih sistema.

U svojstvu autora ili koautora učestvovao je u izradi 5 naučnih radova objavljenih u međunarodnim časopisima, od čega 3 u kategoriji Q1 i 2 u kategoriji Q2. Takođe, u svojstvu autora ili koautora učestvovao je u izradi 6 konferencijskih radova. Recenzent je u brojnim međunarodnim časopisima. Tokom dosadašnjeg rada učestvovao je u realizaciji dva međunarodna projekta u svojstvu istraživača i dva nacionalna projekta u svojstvu rukovodioca.

Tokom doktorskih studija boravio je mjesec dana na Fakultetu primijenjenih nauka u Bonu, gdje se bavio istraživanjem u oblasti sajber bezbjednosti.

Član je međunarodnog udruženja inženjera elektrotehnike i elektronike IEEE.

IZJAVA O AUTORSTVU

Ime i prezime autora: Lazar Šćekić

Broj indeksa/upisa: 1/22

IZJAVLJUJEM

da je doktorska disertacija pod naslovom:

**Dizajn sistema za prigušenje nisko-frekventnih među-zonskih oscilacija
u elektroenergetskim sistemima**

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predložena disertacija ni u cjelini ni u djelovima nije bila predložena za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedio autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

Podgorica,
maj, 2025. godine

Lazar Šćekić

IZJAVA O ISTOVJETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA

Ime i prezime autora: Lazar Šćekić

Broj indeksa/upisa: 1/22

Studijski program: Doktorske studije elektrotehnike

Naslov rada: Dizajn sistema za prigušenje nisko-frekventnih među-zonskih oscilacija u elektroenergetskim sistemima

Mentor: Prof. dr Zoran Miljanić

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predao za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva doktora nauka, odnosno zvanja doktora umjetnosti, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naziv disertacije i datum odbrane rada.

Podgorica,
maj, 2025. godine

Lazar Šćekić

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku da u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore pohrani moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

Dizajn sistema za prigušenje nisko-frekventnih među-zonskih oscilacija u elektroenergetskim sistemima

koja je moje autorsko djelo.

Disertaciju sa svim prilogima predao sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučio.

1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade**
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

Podgorica,
maj, 2025. godine

Lazar Šćekić

1. **Autorstvo.** Licenca sa najširim obimom prava korišćenja. Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se može koristiti i u komercijalne svrhe.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavaju se prerade, umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade.** Licenca kojom se u najvećoj mjeri ograničavaju prava korišćenja djela. Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu. Komercijalna upotreba djela nije dozvoljena.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima.** Dozvoljava se umnožavanje, distribucija, javno saopštavanje i prerada djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerada se mora distribuirati pod istim ili sličnom licencom. Djelo i prerade se ne mogu koristiti u komercijalne svrhe.
5. **Autorstvo – bez prerade.** Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Djelo se ne može mijenjati, preoblikovati ili koristiti u drugom djelu. Licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
6. **Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima.** Dozvoljava se umnožavanje, distribucija i javno saopštavanje djela, pod uslovom da se navede ime izvornog autora (onako kako je izvorni autor ili davalac licence odredio). Ukoliko se djelo mijenja, preoblikuje ili koristi u drugom djelu, prerade se moraju distribuirati pod istim ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.