

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Александар Ацо Марковић

**МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛОВАЊЕ И  
СУЗБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧКИХ  
ТАЛАСА У ВЕЛИКИМ  
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИМ СИСТЕМИМА**

докторска дисертација

Београд, 2024.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Aleksandar Aco Markovic

**MATHEMATICAL MODELING AND  
ATTENUATION OF POWER WAVES IN LARGE  
– SCALE POWER SYSTEMS**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024

**Ментор:**

академик, др Слободан Вукосавић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет  
Српска академија наука и уметности

**Чланови комисије:**

др Зоран Стојановић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Жељко Ђуровић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Жарко Јанда, виши научни сарадник  
Електротехнички институт Никола Тесла

**Датум одбране:** \_\_\_\_\_

## Захвалница

*Највећу захвалност за израду ове дисертације дугујем превасходно породици за подршку и пажњу коју су ми пружили током мог цјелокупног школовања. Нарочито се захваљујем супрузи за разумијевање и стрпљење током свих година докторских студија. Изузетну захвалност дугујем и куму Горану Никићу на издвојеном времену за сваки наш одлазак у Београд.*

*Ова докторска дисертација, као резултат вишегодишњег рада, не би била могућа без несебичне помоћи и залагања мог ментора, академика проф. др Слободана Вукосавића коме сам нарочито захвалан на корисним савјетима и сугестијама који су ми помогли да развијем другачији поглед на идентификацију и рјешавање техничких проблема што је допринијело мом бољем разумијевању науке уопште. Захвалио бих се на крају и мом ментору са основних и мастер студија, проф. др Петру Матићу који ме је у великој мјери увео у озбиљно бављење науком и на чију препоруку сам добио могућност да сарађујем са својим садашњим ментором. Стога је ова дисертација, индиректно, плод његове свеукупне помоћи и залагања.*

*Дисертацију посвећујем кћерки Наталији.*

**Наслов дисертације:** Математичко моделовање и сузбијање електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима

**Сажетак:** Предмет проучавања ове докторске дисертације су електромеханички таласи у великим електроенергетским системима. Када се у електроенергетском систему деси поремећај, долази до осциловања угла оптерећења синхроних генератора. Испоставља се да је ова појава таласне природе и шири се одговарајућом брзином кроз електроенергетски систем захватајући све генераторе. Овакав концепт анализе електроенергетских система је релативно нов и даје другачији поглед на функционисање система у односу на класичну теорију анализе електроенергетских система. Циљ дисертације је да се покуша дати одговор на два кључна питања. Прво питање односи се на принцип математичког моделовања електромеханичких таласа. Крајњи резултат овог дијела истраживања је адекватан математички модел којим би се на довољно једноставан и практично примјењив начин описало ширење електромеханичког таласа кроз систем, те помоћу којег би се идентификовали кључни параметри таласа, као што су брзина простирања, те коефицијенти рефлексије и трансмисије таласа. Друго питање односи се на истраживање могућности потискивања електромеханичких таласа у електроенергетском систему базираним на претходно изведеном математичком моделу. У склопу овог дијела истраживања идентификована је управљачка стратегија којом је могуће ефикасно и реално сузбијање електромеханичких таласа, те је на бази таласне једначине извршена синтеза одговарајућег регулатора за управљање радом уређаја задуженог за потискивање електромеханичког таласа. Основни доприноси ове дисертације могу се сажети у сљедећем:

- Изведен је математички модел димензионалног електромеханичког таласа на бази Ојлер – Лагранжове диференцијалне једначине коју задовољава Лагранжова функција састављена као разлика кинетичке и потенцијалне енергије система.
- Дат је приједлог уважавања системских губитака, приликом математичког моделовања Ојлер – Лагранжовим методом, који су зависни од просторних координата.
- На бази добијеног математичког модела система, идентификован је одговарајући уређај помоћу којег би било могуће практично постизање сузбијања ширења електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима.
- Изведени математички модел је искориштен за извођење управљачког закона и синтезу одговарајућег регулатора за управљање уређајем за потискивање електромеханичких таласа.
- Добијени резултати су верификовани путем рачунарских симулација како на поједностављеном дијелу електроенергетског система, тако и на стандардној IEEE тестној мрежи.

Основи аспект приликом израде дисертације јесте могућност практичне изводљивости добијених теоријских закључака. С тим у вези, нарочита пажња је посвећена да се за уређај задужен за потискивање електромеханичких таласа идентификује неки од постојећих уређаја који се већ користе у систему за побољшање одговарајућих системских карактеристика као и побољшање транзијентне стабилности. Вођено је рачуна да се предложени управљачки систем на једноставан и практично остварив начин може имплементирати у оквиру постојећих управљачких система. Сузбијање ширења електромеханичких таласа кроз систем за посљедицу има смањење осцилација активне снаге, напона, те повећање маргина стабилности система што је

нарочито важно код модерних система чија је радна тачка веома често врло близу границе стабилности.

**Кључне ријечи:** електромеханички таласи, потискивање осцилација, унифицирани контролер токова снага, математичко моделовање, Ојлер – Лагранжова једначина

**Научна област:** електротехника

**Ужа научна област:** електроенергетика, управљање електроенергетским системима

**УДК број:** 621.31

**Dissertation title:** Mathematical modeling and attenuation of power waves in large – scale power systems

**Abstract:** The subject of this doctoral dissertation are electromechanical (power) waves in large power systems. When a disturbance occurs in the power system, the load angles of the synchronous generators oscillate. It is noted that this phenomenon is of a wave nature and it spreads at the appropriate speed through the power system, affecting all generators. This concept of power system analysis is relatively new and provides a different view of system operation compared to the classic theory of power system analysis. The aim of the dissertation is to try to answer two key questions. The first question refers to the principle of mathematical modeling of electromechanical waves. The end result of this part of the research is an adequate mathematical model that would describe the propagation of an electromechanical wave through the system in a sufficiently simple and practically applicable way, and with which the key parameters of the wave, such as the speed of propagation, and the coefficients of reflection and transmission of the wave, would be identified. The second question refers to the investigation of the possibility of suppression of electromechanical waves in the power system based on the previously derived mathematical model. As a part of this research, a practical device was identified that enables efficient suppression of electromechanical waves. Additionally, based on the wave equation, a suitable regulator was synthesized for managing the operation of the device responsible for attenuation of electromechanical waves. The main contributions of this dissertation can be summarized as follows:

- A mathematical model of a two-dimensional, plane, electromechanical wave was derived based on the Euler-Lagrange differential equation, which is satisfied by the Lagrange function composed as the difference between the kinetic and potential energy of the system.
- A new method to consider system losses, which depend on spatial coordinates is proposed.
- Based on the obtained mathematical model of the system, a suitable device was identified by means of which it would be possible to practically achieve suppression of the spread of electromechanical waves in large power systems.
- The derived mathematical model was used for the derivation of the control law and for the synthesis of the appropriate regulator for controlling the device for attenuation of electromechanical waves.
- The obtained results were verified through computer simulations on a standard IEEE test network.

The basic aspect of the dissertation is the possibility of practical feasibility of the obtained theoretical conclusions. In this regard, special attention was paid to choosing one of the existing devices that are already used in the system for the device responsible for suppressing electromechanical waves. It was taken into account to ensure that the proposed control system can be implemented in a simple and practically achievable way within the framework of existing control systems. Suppression of the spread of electromechanical waves through the system results in a reduction of oscillations of active power, voltage, and an increase in system stability margins, which is especially important for large systems whose operating point is very often very close to the stability limit.

**Key words:** electromechanical (power) waves, oscillation attenuation, unified power flow controller, mathematical modeling, Euler – Lagrange equation

**Scientific field:** Electrical engineering

**Scientific subfield:** power systems, power systems control

**UDK number:** 621.31



# САДРЖАЈ

Садржај .....	vii
Листа слика.....	ix
1 УВОД.....	1
1.1 Преглед литературе .....	3
2 Математичко моделовање и верификација.....	10
2.1 Извођење математичког модела електромеханичког таласа.....	10
2.2 Анализа математичког модела.....	17
2.3 Верификација математичког модела.....	19
2.3.1 Поједностављени тестни систем.....	19
2.3.2 Реалистичан тестни систем .....	22
3 СУЗБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧКИХ ТАЛАСА.....	32
3.1 Рефлексија и трансмисија таласа .....	32
3.2 Анализа могућности сузбијања електромеханичког таласа.....	35
3.3 Верификација управљачког закона .....	38
4 УНИФИЦИРАНИ КОТРОЛЕР ТОКОВА СНАГА.....	41
4.1 Топологија и преглед практичне реализације .....	41
4.1.1 Топологија .....	41
4.1.2 Преглед технологије реализације претварача .....	42
4.1.3 Реализација трансформатора .....	47
4.2 Математички модел.....	50
4.3 Преглед управљачких система .....	54
4.3.1 Управљачки систему за контролу токова снага .....	54
4.3.2 Управљачки системи за смањење осцилација активне снаге .....	57
4.3.3 Регулатори на бази неуронских мрежа .....	61
4.3.4 Регулатори на бази <i>fuzzy</i> система .....	62
4.3.5 Регулатори на бази теорије Љапунова .....	64
5 СИНТЕЗА УПРАВЉАЧКОГ СИСТЕМА.....	68
5.1 Управљачки систем за управљање редним параметрима вода.....	68

5.1.1	Опис тестног система.....	71
5.1.2	Резултати симулације .....	71
5.2	Управљачки систем за сузбијање ширења електромеханичких таласа .	75
5.2.1	Управљачки систем за сузбијање ширења осцилација за серијски дио UPFC-а .....	75
5.2.2	Управљачки систем за сузбијање ширења осцилација за оточни дио UPFC-а .....	78
6	РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈА И ДИСКУСИЈА.....	80
6.1	Тестни систем од низа синхроних генератора .....	80
6.1.1	Резултати симулације за случај А .....	82
6.1.2	Резултати симулације за случај Б.....	83
6.2	Тестни систем IEEE 59.....	84
6.2.1	Резултати симулације за тестни систем IEEE 59 .....	86
6.2.2	Процедура подешавања регулатора .....	91
7	ЗАКЉУЧАК .....	95
8	ЛИТЕРАТУРА.....	98
	ДОДАТАК А .....	107
	ДОДАТАК Б.....	107
	ДОДАТАК В .....	108
	БИОГРАФИЈА АУТОРА.....	110

# ЛИСТА СЛИКА

Сл. 2.1 - Илустративни приказ инфинитезимално малог дијела електроенергетског система .....	11
Сл. 2.2 – Шематски приказ поједностављеног тестног система за анализу настанка и простирања електромеханичких таласа .....	20
Сл. 2.3 – Електромеханички талас на примјеру поједностављеног низа од 65 синхроних генератора .....	21
Сл. 2.4 – Блок дијаграм синхроног генератора шестог реда са стабилизатором електроенергетског система и системским регулатором учестаности.....	26
Сл. 2.5 – Шематски приказ реалистичног тестног система за анализу настанка и простирања електромеханичких таласа .....	27
Сл. 2.6 – Еквивалентна шема дијела реалистичног тестног система .....	27
Сл. 2.7 – Блок дијаграм дијела реалистичног тестног система сачињеног од 65 синхроних генератора .....	28
Сл. 2.8 – Електромеханички талас добијен помоћу дискретизованог реалистичног тестног система сачињеног од низа од 65 синхроних генератора.....	29
Сл. 2.9 – Таласни облици углава оптерећења сваког двоног генератора добијен помоћу дискретизованог реалистичног тестног система сачињеног од низа од 65 синхроних генератора .....	31
Сл. 3.1 – Еквивалентна шема дијела електроенергетског система погодна за извођење коефицијента рефлексije и трансмисије са примјером рефлексije и трансмисије .....	33
Сл. 3.2 – Функционална зависност коефицијента трансмисије од реактансе вода и модула напона .....	36
Сл. 3.3 – Електромеханички талас добијен помоћу реалистичног тестног система: а) хомоген низ, б) смањена импеданса трећег надземног вода .....	39
Сл. 3.4 – Одзиви углава оптерећења 1, 9, 33. И 57. Генератора за реалистичан тестни систем у случају смањења импедансе трећег надземног вода .....	39
Сл. 4.1 – Основна топологија UPFC-а.....	41
Сл. 4.2 – Хронолошки приказ увођења UPFC-а у електроенергетски систем са локацијом уградње и техничким детаљима .....	43
Сл. 4.3 – Илустративни приказ 12 – импулсног претварача на бази ГТО .....	44
Сл. 4.4 – Конструкција прилагодног трансформатора за потребе формирања 48 – импулсног претварача [81] .....	45
Сл. 4.5 – Основни модул (ћелија) ММС претварача .....	46
Сл. 4.6 – Основни модул (ћелија) ММС претварача [81] .....	47
Сл. 4.7 – Типична топологија серијског намотаја UPFC-а [72] .....	49
Сл. 4.8 – а) Еквивалентна шема UPFC-а, б) Одговарајући фазорски дијаграм .....	50
Сл. 4.9 – Основни управљачки UPFC-а за контролу токова снага: а) за серијски уређај, б) за оточни уређај .....	55
Сл. 4.10 – Управљачки блок дијаграм серијског дијела UPFC-а са двије повратне спреге.....	56
Сл. 4.11 – Структура POD регулатора .....	57
Сл. 4.12 – Управљачки систем дијела оточног дијела UPFC-а за сузбијање осцилација активне снаге.....	58
Сл. 4.13 – Управљачки систем серијског дијела UPFC-а са POD регулатором базираним на девијацији активне снаге .....	58
Сл. 4.14 – Управљачки систем серијског дијела UPFC-а са POD регулатором базираним на девијацији кружне учестаности .....	59
Сл. 4.15 – Илустративни приказ фреквенцијске карактеристике дијела ЕЕС-а и POD регулатора .....	60
Сл. 4.16 – Управљачки систем серијског дијела UPFC-а са неуро – fuzzy регулатором [103] .....	64
Сл. 4.17 – Илустративни приказ Неуро – Љапуновљевог регулатора за управљање UPFC-ом у сврху смањења осцилација снаге [103] .....	66
Сл. 5.1 – Еквивалентна шема UPFC-а за импедантни режим рада.....	69
Сл. 5.2 – Управљачки блок дијаграм UPFC-а: а) серијски уређај, б) оточни уређај, за управљање у импедантном режиму рада .....	70
Сл. 5.3 – Топологија тестног система за тестирање рада UPFC-а у импедантном режиму рада [119] .....	71
Сл. 5.4 – Резултати симулације рада UPFC-а у импедантном режиму рада за серијски дио .....	72
Сл. 5.5 – Резултати симулације рада UPFC-а у импедантном режиму рада за оточни дио.....	74

Сл. 5.6 – Предложени управљачки систем серијског дијела UPFC-а у сврху сузбијања ширења електромеханичких таласа [64].....	75
Сл. 6.1 – Шематски приказ хомогеног тестног система сачињеног из низа синхроних генератора погодног за анализу сузбијања ширења таласа.....	80
Сл. 6.2 – Бодеова карактеристика регулатора за модулацију импедансе за тестни систем од 65 генератора у низу.....	81
Сл. 6.3 – Резултати симулације за тестни систем са 65 генератора са UPFC-ом на почетку низа (случај А).....	82
Сл. 6.4 – Резултати симулације за тестни систем са 65 генератора са UPFC-ом на средини низа (случај Б).....	84
Сл. 6.5 – Топологија тестног система IEEE 59.....	85
Сл. 6.6 – Таласни облици угла оптерећења синхроних генератора за IEEE 59 тестни систем у присуству UPFC-а (обојено) и без UPFC-а (црно).....	87
Сл. 6.7 – Таласни облици угла оптерећења синхроних генератора за IEEE 59 тестни систем за генераторе 101, 201, 301 и 501.....	88
Сл. 6.8 – Таласни облик угла оптерећења синхроног генератора 404 за IEEE 59 тестни систем.....	89
Сл. 6.9 – Таласни облик активне снаге размјене између области 1 и 2 за IEEE 59 тестни систем.....	90
Сл. 6.10 – Илустративни приказ подешавања регулатора за модулацију импедансе и регулатора за модулацију напона.....	92

# 1 УВОД

Електроенергетски систем је један од најкомплекснијих и географски најраспрострањенијих техничких система које је човјек икада направио. Као такав, електроенергетски систем утиче на сваки сегмент живота на Земљи. У корак са развојем друштва, развија се и сам систем који са једне стране треба да одговори на све строже захтјеве потрошача а са друге стране да одржи све техничке параметре на захтијеваном нивоу како се не би ни на који начин угрозила испорука електричне енергије потрошачу. Ови, често међусобно опречни захтјеви, чине да електроенергетски систем постаје све комплекснија али и флексибилнија мрежа, која без помоћи модерних уређаја, базираних на електронским енергетским претварачима, не би била у стању да одговори на све изазове адекватно. Значајан развој и усложњавање мреже довело је и до развоја нових научних метода за анализу рада система. Са научног аспекта, нарочито интересантно је посматрање система у нестационарним стањима, за вријеме поремећаја, који су нежељена али неизбежна појава у систему. Управо је посматрањем оваквих радних стања у систему развијена теорија електромеханичких таласа који су предмет проучавања овог рада.

Када се деси значајан поремећај у систему, познато је да долази до осцилација угла оптерећења синхроних генератора. То за последицу даје осцилације активних снага на преносним водовима, чијим сузбијањем се научници и инжењери баве деценијама. Седамдесетих година прошлог вијека први пут је уочено да се осцилације угла оптерећења синхроних генератора преносе кроз систем у виду таласа који захвата све генераторе у систему. Генератори ближи извору поремећаја ће имати већу амплитуду осцилација и прије ће да одговоре на поремећај. Удаљенији генератори ће на поремећај одговорити са одређеним временским кашњењем које заправо представља вријеме потребно да талас од мјеста настанка стигне до односних генератора, а амплитуде осцилација ће на тим генераторима бити значајно мање. Први рад у коме је, поред физичког, дат и математички опис споменутих таласа је [1]. У овом раду, аутори су између осталог, уочили и теоријску могућност да талас, након рефлексије од границе система, увећа своју амплитуду, што је нарочито нежељена појава, коју је даље требало испитати. Почетком осамдесетих година теорија електромеханичких таласа добија на значају будући да су теоријска очекивања потврђена стварним мјерењима у западном дијелу сјеверноамеричке интерконекције [2]. Поред тога, извршена математичка естимација брзине простирања таласа била је у сагласности са подацима добијеним мјерењима, што је додатно оправдало смисленост и функционалност таласне теорије. Већ тада су аутори истакли проблем потискивања ових таласа као један од значајнијих техничких изазова будућности, будући да на тадашњем степену развоја није било једноставно прикладно одговорити на тако сложен технички проблем [2]. То је можда и један од разлога због чега се електромеханички таласи нису значајније изучавали у наредних двадесет година, тачније све до краја деведесетих година када се даје значајан допринос изучавању овог феномена у виду математичког модела, односно таласне једначине електромеханичког таласа у континууму [3]. Овај модел је и данас основа за проучавање таласне природе простирања поремећаја у великим електроенергетским системима.

Иако је прије више од двије деценије постављен темељ за озбиљно изучавање електромеханичких таласа, може се примјетити да интересовање за ову проблематику није велико. Наиме, већина истраживача свој рад базира на настојању да се дође до

прецизнијег и обухватнијег математичког модела таласа, док је проблематика потискивања таласа, односно спрјечавања њиховог ширења кроз систем, прилично маргинализована. Стога је основна идеја овог рада да се електромеханички таласи, као комплексан системски феномен уочен и описан прије готово пет деценија, поново ревитализују кориштењем новијих математичких, софтверских али и хардверских рјешења, при савременим околностима у којима функционише мрежа, како би се дошло до одговора на питања која су дуго времена неријешена. То се прије свега односи на проблематику потискивања таласа у реалном систему на начин који је данас технички доступан, примјењив али и економски оправдан. Поред тога, важно је повезати познате принципе сузбијања осцилација активне снаге са таласном анализом електроенергетског система. Уколико би се на бази таласне теорије дошло до ефикасног механизма смањења осцилација активне снаге, то би дало значајан допринос промовисању проучавања таласних феномена у систему као једном новијем и свеобухватнијем концепту рјешавања одговарајућих типова проблема са којим се систем сусреће, што је такође циљ овог рада. Укратко, два основна циља ове дисертације су: долазак до математичког модела електромеханичког таласа на бази енергија у систему, те ефикасно и практично оствариво потискивање електромеханичких таласа.

Да би се дошло до корисних и примјенљивих закључака, неопходан је систематичан приступ. Стога су одговарајући сегменти рада раздвојени у поглавља чији је кратак преглед дат у наставку. У другом поглављу овог рада изложен је нов приступ математичком моделовању електромеханичких таласа, који је универзалног карактера и може се веома једноставно примијенити и на друге научне области које се баве проучавањем разних типова таласа. У оквиру овог поглавља добијени математички модел упоређен је са постојећим математичким моделима при чему су јасно дефинисане све предности и недостаци. Добијени модел верификован је рачунарском симулацијом на хомогеном дискретном систему од 65 синхроних генератора и то кориштењем поједностављеног и реалистичног математичког модела синхроног генератора, који је такође описан у оквиру овог поглавља. У трећем поглављу се на бази добијеног математичког модела изводи управљачки закон који за циљ има смањење амплитуде електромеханичког таласа и спрјечавање његовог ширења кроз систем. На бази добијених математичких закључака, идентификован је погодан уређај који би био у стању да спроведе тражени управљачки закон. Четврто поглавље посвећено је опису уређаја за потискивање електромеханичких таласа. То подразумијева извођење математичког модела уређаја, преглед тренутне примјене овог уређаја као и увид у комплексност практичне реализације те анализу заступљености таквог уређаја у свјетским оквирима. У наредном, петом поглављу, даје се поступак пројектовања адекватног регулатора за управљање радом изабраног уређаја, који за циљ има сузбијање ширења поремећаја у систему. Регулатор је заснован на бази управљачког закона изведеног у трећем поглављу. Поред тога, извршена је и симбиоза добијеног управљачког закона са постојећим регулаторима задуженим за сузбијање осцилација у систему. На тај начин је направљена, претходно споменута, спона између таласног феномена и постојећих управљачких структура и уређаја који се са значајним нивоом успјешности користе у систему. Шесто поглавље резервисано је за анализу успјешности предложеног управљачког метода који ће бити тестиран путем рачунарских симулација на стандардним тестним системима као што су хомогени дискретни систем сачињен од низа од 65 синхроних генератора, моделованих математичким моделом шестог реда, али и реалистичним тестним системом какав је IEEE поједностављени електроенергетски систем Аустралије. У оквиру овог поглавља изведени су закључци о успјешности и примјенљивости предложеног

управљачког механизма. У оквиру седмог поглавља дат је закључак рада. Посљедње, осмо поглавље садржи списак кориштене литературе.

Кроз поступак испуњавања постављених циљева овог рада, дошло се и до других корисних закључака који представљају свеобухватан допринос дисертације и могу се сажети у сљедећем:

- Изведен је математички модел дводимензионог електромеханичког таласа примјеном Ојлер – Лагранжове диференцијалне једначине, гдје се као Лагранжова функција користи разлика кинетичке и потенцијалне енергије у систему.
- Предложен је метод за уважавање просторно зависних губитака у систему, што представља надоградњу класичном методу уважавања временски зависних губитака заснованих на Рејлијевој функцији губитака.
- На бази добијеног математичког модела изведени су изрази за брзину простирања таласа, те коефицијенти рефлексije и трансмисије таласа.
- Анализом израза за трансмисију таласа, изведен је управљачки закон којим се минимизује ширење таласа кроз систем, те је идентификован погодан уређај за имплементацију оваквог закона управљања.
- Изведен је закључак да је унифицирани контролер токова снага (енгл. *Unified Power Flow Controller – UPFC*) најпогоднији уређај за спровођење предложеног управљачког закона.
- Први пут је UPFC употријебљен у сврху симултаног управљања редним параметрима надземног вода (отпорности и индуктивности) што непосредно за циљ има смањење трансмисије електромеханичког таласа, а самим тим и смањење осцилација активних снага на водовима.
- Извршена је синтеза структуре и параметара управљачког система за контролу рада UPFC-а у претходно споменутом радном режиму.
- Дефинисан је практичан аспект интеграције предложеног управљачког система у постојеће управљачке алгоритме који се у највећој мјери користе у пракси приликом управљања радом UPFC-а у стандардном режиму управљања токовима снага на надземним водовима.
- Извршена евалуација предложених управљачких алгоритама путем рачунарских симулација на моделу реалног електроенергетског система показује велики степен успјешности предложеног управљачког система у смислу смањења осцилација угла оптерећења синхроних генератора при чему је амплитуда посматраних осцилација у одређеним случајевима смањена и преко 85% у односу на случај када се не примјењује описани управљачки механизам.

У наставку овог поглавља даје се преглед актуелне литературе из области којом се рад бави.

## 1.1 Преглед литературе

База за изучавање готово свих техничких проблема, па тако и електромеханичких таласа, је одговарајући математички модел. Основни модел једнодимензионог

електромеханичког таласа који је посљедица извјесног поремећаја у систему дат је у [1], [2]. Аутори у [1] се искључиво баве теоријским аспектом настанка и пропагације таласа на основном нивоу. Са друге стране, извјестан помак је уочен егзактним мјерењима која у доброј мјери потврђују изнесу теорију а детаљно су обрађена у [2]. Најзаступљенији математички модел дводимензионог електромеханичког таласа, који се и данас веома често користи описан је у [3]. Овај математички модел је заправо хиперболичка парцијална диференцијална једначина другог реда којом је описан електромеханички талас у континууму са синхроним генераторима. Испоставља се да је добијена таласна једначина компликована за аналитичко рјешавање. Поред тога, само извођење математичког модела изложено у [3] је крајње комплексно будући да захтијева развој компликованих математичких израза у Тејлоров ред до четвртог степена. Додатно, овакав модел је стриктно орјентисан на извођење електромеханичких таласа, тако да не посједује извјесну флексибилност, односно не може се на једноставан начин примијенити у неким другим, сродним, случајевима. Ипак, овај модел је послужио као база за извођење великог броја других математичких модела електромеханичког таласа који се могу окарактерисати као континуум модели [4-7]. Нарочито интересантан приступ математичком моделовању електромеханичких таласа јесте да се електроенергетски систем еквивалентира фиктивним механичким системом састављеним од једног вратила на коме се налазе дискови различитих момената инерције (енгл. *multi – mass system*) [4]. Овим поступком генерисан је математички модел потпуно аналоган базном моделу дефинисаном у [3]. Поступак моделовања описан у [4] је још компликованији у поређењу са [3] јер захтијева значајно познавање механичких система и њихово адекватно еквивалентирање одговарајућим електричним системима. Може се рећи да овакав поступак моделовања има само академски значај, будући да потврђује претходно добијене резултате. Основни смисао извођења математичког модела у континууму јесте да се што боље разумије физички смисао таласа те да се идентификују одговарајући параметри, као што су коефицијенти рефлексије и трансмисије или карактеристичне импедансе, погодни за описивање и проучавање таласа [5, 6]. У неким случајевима предлаже се поједностављивање добијене хиперболичке диференцијалне једначине на начин да се занемарују системски губици како би се једноставније анализирала аналитичка рјешења једначине помоћу којих би се могли извући корисни и употребљиви закључци [7]. Једна од често кориштених стратегија за изучавање електромеханичких таласа јесте да се ови таласи упоређују са електромагнетним таласима те да се на основу уочене аналогije између познатог и непознатог дође до употребљивог модела на једноставан начин [8]. Заједничко за све поменуте радове јесте да су добијени резултати готово идентични у односу на базни модел изложен у [3]. Једина разлика је у другачијем приступу моделовању. У овом раду биће предложен начин извођења дводимензионог електромеханичког таласа у континууму кориштењем универзалног метода базираног на закону о одржању енергије у систему, који до сада није забиљежен у литератури.

Основни проблем свих детаљнијих математичких модела у континууму јесте проблем одређивања аналитичког рјешења. Да би се овај проблем превазишао, предложено је да се посматрани систем дискретизује, тако да се умјесто континуум система посматра довољно велики дискретан систем [3]. На овај начин могуће је направити симулационе моделе и доћи до прихватљивих рјешења [9, 10]. Испоставља се да је овакав приступ анализи таласа веома користан и практичан те да даје добре резултате. Основни недостатак овог аспекта огледа се у губљењу физичке конотације таласа. Стога је најбољи приступ моделовању таласа симбиоза континуум и дискретних модела, као што је предложено у [3], што ће бити учињено и у овом раду.



Сви претходно споменути математички модели, како континуум тако и дискретни, су хомогени математички модели. Хомогеност у овом случају подразумева да је математички модел изведен на бази претпоставке да сви надземни водови и сви синхрони генератори у систему имају једнаке параметре. Наравно у реалном систему то није случај, те се стога полаже доста пажње развоју нехомогених (неуниформних) модела којим би се на прецизнији начин описала пропација електромеханичких таласа у систему, те могуће уочили неки проблеми које континуум модели не детектују [11]. Резултати изложени у [12] показују да се кориштењем неуниформног модела могу добити значајно боље естимације времена доласка таласа до одговарајуће тачке у систему у поређењу са униформним моделима. Поред тога, показано је да се Гаусова функција расподјеле вјероватноће може ефикасно користити да би се описала неуниформност момента инерције синхроних генератора. Поређењем дискретног и континуум неуниформног модела дошло се до закључка да постоје извјесна одступања између ова два модела на номиналној учестаности [13], док се на нижим учестаностима, какве се срећу у пракси, јавља корелација између дискретног и континуум модела. Један начин моделовања неуниформног система предлаже да се неуниформан систем моделује међусобно повезаним униформним групама како би се размотрило понашање таласа у тачкама дисконтинуитета, односно при преласку из једне у другу, међусобно различиту, униформну групу. Добијени резултати сугеришу на постојање деформације таласа у тачкама дисконтинуитета али рефлексије таласа су незнатне будући да се инерционе константне генератора не разликују значајно у пракси [14]. Може се рећи да је извођење свих поменутих математичких модела прилично комплексно, изузев модела који су засновани на аналогiji са другим типовима таласа, попут електромагнетних таласа [15]. Међутим, ови модели не залазе дубље у физичку интерпретацију таласа. У овом раду биће изложен другачији, свеобухватнији приступ математичком моделовању електромеханичких таласа, заснован на физичком принципу најмање акције а математички установљен на бази Ојлер – Лагранжове диференцијалне једначине. Циљ је да се на једноставнији начин, али са задржавањем физичке интерпретације таласа, дође до прихватљивог математичког модела електромеханичког таласа у хомогеном, континуум систему. Добијени модел биће упоређен са постојећим моделима.

Споменути математички модели представљају основу за анализирање таласних појава у систему. Будући да је анализа појава често једноставнија од синтезе, постоји значајан број радова који се бави овом проблематиком. Велики број аутора фокусиран је на проучавање пропације таласа кроз систем на основу дискретних математичких модела при различитим конфигурацијама система. Најједноставнији симулациони модел за проучавање таласа је лонгитудинални систем сачињен од низа синхроних генератора међусобно повезаних надземним водовима [16-19]. Различити аутори предлажу различит број синхроних генератора у низу, тако да постоје тестни системи од десет генератора [16-18] или са 40 генератора [19]. Генерално, да би се континуум систем што боље апроксимирао дискретним системом, потребно је користити што већи број синхроних генератора. Често се сусрећу и лонгитудинални тестни системи са 64 генератора [3]. Да би се избјегла појава рефлексије таласа од границе система, предлажу се и тестни системи у прстенастој конфигурацији [20-21]. Код оваквих тестних система најчешће се посматра униформан систем од 64 синхрона генератора [21]. Најчешће се овакве конфигурације користе за анализу утицаја електромеханичких таласа на заштитне уређаје у систему, о чему ће бити више ријечи у наставку. Све је већи број аутора који у сврху анализе простирања таласа користе неке од стандардних IEEE мрежа. Типично се користе IEEE 16 тестна мрежа са 5 синхроних генератора [22], затим нешто сложенија NPCC (енгл. *Northeast Power Coordinating Council*) са 48 генератора [23]. Најсложенија

тестна мрежа IEEE 118, која је у употреби, кориштена је и за анализу простирања електромеханичких таласа [24]. Веома је важно да се у сврху анализирања простирања таласа користе што већи тестни системи са већим бројем сабирница и синхроних генератора како би се направила што вјеродостојнија аналогија са реалним електроенергетским системом и математичким моделом у континууму. Значајан искорак направљен у овом смјеру тиче се изучавања простирања таласа на бази симулационих модела реалних електроенергетских система какав је електроенергетски систем Кине [25], те тзв. континентално европско синхроно подручје (енгл. *Contitental Europe Synchronous Area – CESA*) [26]. Изучавање таласних феномена на реалним системима је свакако најобјективније али такви симулациони модели најчешће нису широко доступни истраживачима попут типичних тестних система. У овом раду, за верификацију добијених резултата, биће кориштена IEEE 59 мрежа са 14 синхроних генератора као једна од рјеђе кориштених мрежа. Детаљни разлози избора ове мреже биће накнадно објашњени у оквиру овог рада.

Поред анализе пропагације таласа, детаљније анализе математичких модела дотичу се и анализе карактеристичних импеданси са аспекта електромеханичких осцилација, те њиховог утицаја на рефлексије и трансмисије таласа у систему [27],[28]. Резултати до којих се дошло у поменутих радовима базирани су на хомогеном континуум моделу и веома су битни за цјелокупно разумијевање процеса распрострања таласа, те ће бити кориштени и у овој дисертацији. Овим се потврђује и претходно изнесена теза да су континуум математички модели таласа веома битни за разумијевање физичке суштине таласа без које се не могу доносити корисни и практични закључци.

У домену анализе математичких модела електромеханичких таласа, велико интересовање посвећено је естимацији брзине простирања таласа односно одређивању времена које је потребно да талас стигне од мјеста настанка поремећаја, до одговарајуће тачке у систему [29-33]. На симулационом моделу електроенергетског система САД-а, показано је да се у различитим дијеловима система, електромеханички талас шири различитом брзином [29] која се веома прецизно може естимирати и на основу математичког модела датог са [3]. Постоје различити приступи одређивању брзине пропагације таласа те времена доласка таласа у одговарајућу тачку. Један од начина је да се примјени метод најмањих квадрата на широки спектар мјерених података [30]. Са друге стране, аутори у [31] предлажу кориштење математичког модела заснованог на аналогији механичких и електричних система детаљно описаних у [4]. Један једноставан начин за процјену брзине простирања таласа заснива се на посматрању криве одзива брзине синхроног генератора. Аутори предлажу да се до тражене криве дође посматрањем одзива система првог реда са временским кашњењем [32]. Изложени поступак је веома једноставан и потврђен на четворомашинском (Кундуоровом) систему. За комплексније системе, нису вршена истраживања у овом смјеру. Иако је са становишта управљања веома велики значај поменутих радова, примјећено је да су изложени резултати слабо кориштени у сврху синтезе управљачких система гдје би могли да буду адекватно примијењени. Са друге стране, вишеструко се наглашава да без модерних мјерења и експеримената није могуће доносити сасвим сигурне закључке на овом пољу [33].

Ово је један од разлога због чега се у посљедњој деценији значајна пажња посветила практичној детекцији електромеханичких таласа у реалним системима и њиховој детаљној анализи те поређењу са доступним математичким моделима, базирано на значајној количини егзактних мјерења. Иако су прва мјерења осамдесетих година потврдила постојање електромеханичких таласа [2], данас се користе значајно

прецизнији системи за мјерења времена и фазних ставова, који посједују неупоредиво већу резолуцију. Мјерни системи су данас базирани на савременим јединицама за мјерење фазора (енгл. *Phasor Measurement Unit – PMU*) интегрисаних у мјерни систем широке распрострањености (енгл. *Wide Area Measurement System – WAMS*) [34]. Уочено је да се за сврху детекције електромеханичких таласа са великим степеном успјешности и прецизности могу користити и тзв. *FNET/GridEye* (енгл. *Frequency Monitoring Network*) системи који су верзија *PMU* за дистрибутивни ниво, али су значајно јефтинији од *PMU* што омогућава кориштење значајно већег броја ових уређаја како би се добили што прецизнији подаци [35-37]. Циљ је да се претходно описани алгоритми за рану детекцију таласа примјене у реалном времену уз употребу великог броја мјерних података [35]. Будући да су мјерни уређаји овог типа скупи, те тренутно не постоји могућност да се уграде у сваки чвор система, предложен је и метод тријангуларизације за прецизније одређивање времена доласка таласа [36]. При естимацији брзине таласа на основу доступних мјерења, нарочита пажња се мора посветити теоријском сазнању да се талас у различитим срединама простире различитим брзинама, што је детаљно описано у [29], како се мјерни подаци не би интерпретирали на погрешан начин [37]. Треба истаћи да је значај оваквих мјерења веома велики како са аспекта анализе и разумијевања простирања електромеханичких таласа тако и са аспекта могућности њиховог потискивања. На основу мјерења заснованих на *FNET* технологији, формиран је и први систем за рану детекцију електромеханичких таласа који би могао да се искористи у комбинацији са одговарајућим управљачким уређајима задуженим за потискивање таласа [34].

Важно је примјетити да се помоћу мјерења дошло до закључка да се електромеханички таласи значајно брже простиру у срединама гдје постоји велики удио обновљивих извора енергије који се са мрежом спрежу помоћу одговарајућих енергетских претвараача базираних на енергетској електроници [39-42]. На овај начин потврђени су теоријски резултати на области проучавања тзв. електронских таласа, који су пандан електромеханичким таласима у мрежама са великим бројем инвертора [41]. Ова област је нарочито интересантна због глобалне иницијативе за све већим удјелом обновљивих извора енергије у производњи електричне енергије на свјетском нивоу што ће за циљ имати промјену садашњих сазнања на пољу електромеханичких таласа [42]. Са друге стране, примјећује се да ова област тек треба да буде темељно истражена, те да тренутна истраживања значајно касне у односу на степен пенетрације обновљивих извора у производњи електричне енергије.

За разлику од интереса који влада на пољу анализе електромеханичких таласа, не постоји нарочито интересовање за синтезу управљачких система за потискивање или елиминацију таласа. Један од основних приступа рјешавању овог проблема јесте да се користи такозвани регулатор нулте рефлексије (енгл. *zero reflection controller*) [43-46]. Идеја овог управљачког система је да се на границе система постави адекватан уређај који би био у стању да апсорбује енергију таласа и на тај начин да спријечи рефлексије таласа [43]. Резултати симулација на различитим типовима система, као што су једнодимензони [44], прстенасти [45] или дводимензони [46], показују да се на предложени начин амплитуда таласа може значајно да смањи. Међутим, проблем је што сви наведени радови разматрају униформан систем у коме не постоје рефлексије све док талас не стигне до граница система. Према томе, код реалистичних система, рефлексије ће се јавити и прије доласка таласа до граница система у разним тачкама дисконтинуитета. Са друге стране, не разматра се практична реализација оваквог концепта потискивања таласа. Односно, не даје се приједлог уређаја који би на прихватљив и технички остварив начин био у стању да изврши управљачке задатке. Основна идеја је да се на границе система постави одговарајућа импеданса, до које се

долази из анализе таласне једначине, и која треба да изврши тражени управљачки задатак [43]. Примјећује се да је овакав концепт технички неостварив. Оно што би било могуће практично реализовати јесте да се умјесто импедансе користе одговарајућа складишта енергије као што су велики батеријски системи. Међутим, због огромних цијена оваквих система, ово рјешење се са практичног аспекта и не разматра.

Један практично прихватљив концепт за елиминацију електромеханичких таласа јесте да се параметри постојећих стабилизатора електроенергетског система модификују на одговарајући начин како би се извршило потискивање таласа [47-51]. Основни принцип код оваквог приступа јесте да се као додатни сигнал стабилизатора ЕЕС-а уводи и сигнал грешке учестаности. Овакав сигнал модулише се одговарајућим регулатором представљеним системом првог реда са временским кашњењем те се његов излаз суперпонира са стандардним излазом стабилизатора ЕЕС-а [47]. Примјећује се да у овом случају за одређивање параметара регулатора нису кориштени системски феномени таласа него локалне осцилације на одговарајућем генератору, што је извјесни недостатак предложеног метода [48]. Поред тога, предложени су и методи модификације параметара постојећих стабилизатора ЕЕС-а, без промјене њихове базне структуре. У овом случају, аутори предлажу да се на основу дводимензионог тестног система који садржи укупно 64 генератора, одреде одговарајући параметри стабилизатора ЕЕС-а помоћу генетичког алгорита [49] или кориштењем фази логике (енгл. *fuzzy logic*) [50]. Проблем са оваквим приступом огледа се у чињеници да је тешко доказати, аналитичким методама, стабилност система у случају кориштења фази регулатора док је за проналазак оптималних параметара методама генетичког алгорита потребно испитати широк спектар могућих сценарија у реалном систему, што је практично немогуће. Према томе кориштење овако добијених регулатора у реалном систему је крајње несигурно. Са друге стране, преподешавање стабилизатора ЕЕС-а утицаће на њихову примарну намјену што није детаљно испитано. Један од приједлога за сузбијање таласа је да за генерисање додатног стабилизационог сигнала код стабилизатора ЕЕС-а користи излаз оптималног регулатора (енгл. *Linear Quadratic Regulator – LQR*). Резултати оваквог приступа су обећавајући али још увијек су недовољно испитани на реалистичним системима [51]. Нарочито битно истраживање на овом пољу тиче се утицаја регулатора нулте рефлексије на појаву међуобласних осцилација, гдје аутори закључују да у неким случајевима ови регулатори могу допринијети појави нестабилности система, што додатно смањује њихову практичну употребљивост [52]. Поред изнесених стратегија за потискивање електромеханичких таласа, могуће је и кориштење *FACTS* (енгл. *Flexible Alternating Current Transmission Systems*) уређаја, нарочито у случајевима гдје већ постоје инсталирани у систему. Аутори у [53], [54] анализирали су могућност кориштења статичког напонског компензатора (енгл. *Static Voltage Compensator – SVC*) у сврху смањења амплитуде таласа. Идеја управљачког система јесте да се помоћу *SVC*-а модулише амплитуда напона у одговарајућој тачки у систему те да се на тај начин смањи амплитуда таласа [53]. Проширење овог концепта односи се на могућност постављања већег броја статичких напонских компензатора у погодном одабраним тачкама како би се постигли још бољи резултати [54]. Основни недостатак оваквог приступа је да се разматра само могућност модулације амплитуде напона док се могућност модулације фазног става напона не разматра. Стога ће то ће бити предмет истраживања у овој дисертацији.

Теорија електромеханичких таласа је тренутно на развојном путу те се очекује да би се на основу ње могли добити значајни бенефити за побољшање перформанси електроенергетског система у цјелини. Тренутно се сазнања ове теорије користе у различитим сферама управљања радом електроенергетског система. Показано је да се

параметри електричних заштита водова, попут диференцијалне, дистантне и прекострујне могу адекватно преподесити на бази теорије електромеханичких таласа како би се добио ефикаснији рад заштита [55]. Поред тога, теорија електромеханичких таласа успјешно може да се користи у сврху брзе и поуздане детекције локације квара у систему [56], [57]. Аутори у [56] у сврху детектовања локације квара предлажу кориштење таласне теорије у комбинацији са мјерењима добијеним са *PMU*. Са друге стране у [57] се предлаже кориштење неуронске мреже, која је претходно тренирана на основу доступних мјерних података. Коначно, постоје покушаји и да се теорија електромеханичких таласа примјени и на детекцију параметара надземних водова, што је детаљно описано у [58]. Са садашње тачке гледишта могуће је прогноzirати додатну експанзију примјене теорије таласа у сврху различитих управљања у електроенергетском систему са циљем побољшања перформанси система, што је коначан циљ и овог рада.

## 2 МАТЕМАТИЧКО МОДЕЛОВАЊЕ И ВЕРИФИКАЦИЈА

У овом поглављу биће изведен математички модел електромеханичког таласа у хомогеном, континуум систему. Добијена таласна једначина биће упоређена са постојећим моделима електромеханичког таласа. Додатно, у сврху верификације математичког модела, биће формирана два тестна симулациона модела, при чему ће један тестни систем бити заснован на поједностављеном математичком моделу синхроног генератора док ће се детаљнија анализа спровести за други тестни систем који користи реалистичан математички модел синхроног генератора шестог реда. Будући да ће се овакав модел синхроног генератора користити и у наставку рада, у овом поглављу ће такође бити детаљно описан.

### 2.1 Извођење математичког модела електромеханичког таласа

У сврху извођења математичког модела везаног за електроенергетске системе, могуће је користити Ојлер – Лагранжову једначину, која у свом општем облику гласи [59], [60]

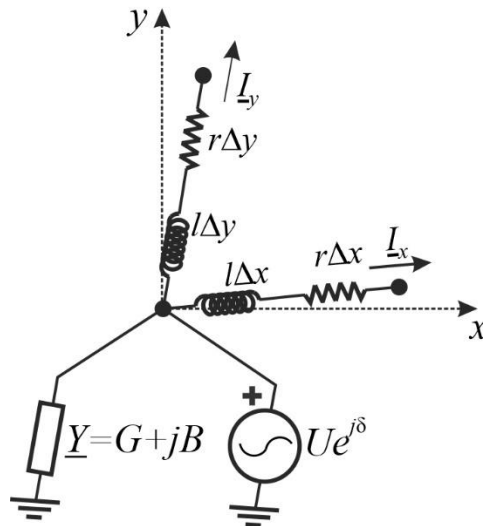
$$\frac{\partial f(q, q_t, t)}{\partial q} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial f(q, q_t, t)}{\partial q_t} = 0 \quad (2.1)$$

гдје је са  $q$  означена генерализована промјенљива а  $q_t = dq/dt$ . Функција  $f(q, q_t, t)$  је Лагранжова функција, односно лагранжијан система, и дефинисана је као разлика кинетичке  $E_k$  и потенцијалне  $E_p$  енергије посматраног система. Будући да је електроенергетски систем комплексан, може да се раздвоји на електрични и механички подсистем. У том случају потребно је написати двије једначине у форми (2.1). Најчешће се за сврху моделовања електричног подсистема за генерализовану промјенљиву  $q$  користи елементарно наелектрисање док се у случају моделовања механичког подсистема као генерализована промјенљива  $q$  користи угао оптерећења синхроног генератора  $\delta$  [61]. Код реалних система, потребно је у једначину (2.1) уврстити и губитке снаге  $P_d$  али и спољашње улазе  $P_{ext}$  као што је на примјер механичка снага код синхроног генератора. Оваква проширена Ојлер – Лагранжова једначина дата је са [62]

$$\frac{\partial f(q, q_t, t)}{\partial q} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial f(q, q_t, t)}{\partial q_t} - \frac{\partial P_d}{\partial q_t} = -P_{ext}. \quad (2.2)$$

Снага дисипације  $P_d$  често се назива Релејевом функцијом дисипације. Нарочито је важно да се уочи да је Релејева функција дисипације, која фигурише у једначини (2.2) дефинисана искључиво за губитке зависне од времена. Идеја је да се на бази изнесене математичке теорије, која се успјешно примјењује за потребе моделовања временски зависних појава у електроенергетском систему, дође до проширења ове теорије како би се у обзир узеле и просторне расподјеле одговарајућих величина и на тај начин дошло до одговарајуће таласне једначине.

У ту сврху, извођење математичког модела електромеханичког таласа могуће је започети посматрањем сл. 2.1.



Сл. 2.1 - Илустративни приказ инфинитезимално малог дијела електроенергетског система

На сл. 2.1 приказан је инфинитезимално мали дио електроенергетског система сачињен из два вода који се протежу дуж  $x$  и  $y$  оса правоугаоног координатног система у равни, моделовани редном подужном отпорности  $r[\Omega/\text{km}]$  и индуктивности  $l[\text{H}/\text{km}]$ . Инфинитезимално мале дужине водова дуж  $x$  и  $y$  оса означене су са  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , респективно. У чвор у коме се сустичу водови, прикључен је синхрони генератор напона константне амплитуде  $U$  и фазног става  $\delta$ , који у конкретном случају може да зависи од просторних координата  $x$  и  $y$ , као и од времена  $t$ . Другим ријечима, фазни став напона на прикључцима генератора је функција три промјенљиве  $\delta(x, y, t)$ . У исти чвор везана је и оточна адмитанса  $\underline{Y}$  сачињена из сушептансе  $B$  и кондуктансе  $G$ , која се сматра константним параметром и служи у сврху моделовања свих оточних параметара генератора и надземних водова. Уколико се за генерализовану промјенљиву изабере фазни став  $\delta$ , на основу постављеног проблема, закључујемо да ће се у овом случају Лагранжова функција модификовати у односу на базни случај дат једначином (2.1) те ће постати функција седам промјенљивих  $L=f(x, y, t, \delta, \delta_x, \delta_y, \delta_t)$ , гдје су  $\delta_x, \delta_y, \delta_t$  деривације промјенљиве  $\delta$  по  $x, y$  и  $t$ , респективно.

Као што је раније речено, први корак при моделовању јесте дефинисање прикладне Ојлер – Лагранжове једначине. Сходно дефинисаној форми лагранжијана  $L$ , одговарајућа диференцијална једначина коју треба да задовољи тако дефинисан лагранжијан често се назива и једначином Остроградског и дата је са [63]

$$\frac{\partial f}{\partial \delta} - \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial f}{\partial \delta_x} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial f}{\partial \delta_y} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial f}{\partial \delta_t} = 0. \quad (2.3)$$

Примјећујемо да је једначина (2.3) еквивалента једначини (2.1). Даље је потребно формирати Лагранжову функцију као разлику кинетичке и потенцијалне енергије у систему дату са

$$f = E_k - E_p. \quad (2.4)$$

На основу сл. 2.1 могуће је одредити изразе за кинетичку и потенцијалну енергију у систему. Кинетичка енергија садржана у обртним масама синхроног генератора може се изразити као

$$E_k = \frac{1}{2}J\omega^2 = \frac{1}{2}J \left( \frac{\partial \delta(x, y, t)}{\partial t} \right)^2 = \frac{1}{2}J\delta_t^2 \quad (2.5)$$

гдје је са  $\omega$ [rad/s] означена кружна учестаност ротора синхроног генератора а са  $J$ [kgm<sup>2</sup>] момент инерције. Битно је уочити да је израз за кинетичку енергију (2.5) функција времена и не зависи од просторних координата. Енергија акумулисана у индуктивностима водова може се изразити као

$$E_l = \frac{1}{2}l\Delta x I_x^2 + \frac{1}{2}l\Delta y I_y^2 \quad (2.6)$$

гдје су  $I_x$  и  $I_y$  ефективне вриједности струја по водовима дуж  $x$  и  $y$  оса, респективно, са референтним смјеровима приказаним на сл. 2.1. Израз за струју  $I_x$  на инфинитезимално малој дужини вода може се записати у облику

$$I_x = \frac{\underline{U}(x, y, t) - \underline{U}(x + \Delta x, y, t)}{\Delta x \cdot \underline{Z}} = \frac{\underline{U} e^{j\delta(x, y, t)} - e^{j\delta(x + \Delta x, y, t)}}{\underline{Z} \Delta x} \quad (2.7)$$

гдје је  $\underline{Z} = r + j\omega_s l$ [ $\Omega/\text{km}$ ] комплексна подужна импеданса вода а  $\omega_s = 100\pi$ [rad/s] синхрона кружна учестаност. Ако се у изразу (2.7) узме да  $\Delta x$  у граничном случају тежи нули, тада се овај израз модификује и постаје

$$I_x = -j \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} \frac{\partial \delta(x, y, t)}{\partial x} e^{j\delta(x, y, t)} = -j \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} \delta_x e^{j\delta(x, y, t)}. \quad (2.8)$$

Из једначине (2.8) може се закључити да струја по воду у смјеру  $x$  осе, поред времена, зависи и од просторних координата. Квадрат ефективне вриједност посматране струје може се добити као [64]

$$I_x^2 = I_x I_x^* = \frac{U^2}{|\underline{Z}|^2} \left( \frac{\partial \delta(x, y, t)}{\partial x} \right)^2 = \frac{U^2}{|\underline{Z}|^2} \delta_x^2. \quad (2.9)$$

Аналоган поступак може се примијенити и на струју  $I_y$  након чега се добија

$$I_y^2 = I_y I_y^* = \frac{U^2}{|\underline{Z}|^2} \left( \frac{\partial \delta(x, y, t)}{\partial y} \right)^2 = \frac{U^2}{|\underline{Z}|^2} \delta_y^2. \quad (2.10)$$

Уврштавањем (2.9) и (2.10) у једначину (2.6) добија се израз за енергију складиштену у индуктивностима водова, који гласи



$$E_l = \frac{l\Delta x U^2}{2|\underline{Z}|^2} (\delta_x^2 + \delta_y^2) = \frac{LU^2}{2|\underline{Z}|^2} (\delta_x^2 + \delta_y^2). \quad (2.11)$$

У једначини (2.11) са  $L[H]$  је означена индуктивност вода. Анализом израза (2.11) може се установити да посматрани израз зависи од брзине промјене угла  $\delta$  по просторним координатама. Поред тога, уочљиво је да посматрани израз не зависи од извода угла  $\delta$  по времену, односно не зависи од брзине кретања, што сугерише на то да енергија  $E_l$  сигурно није кинетичка. Према томе, намеће се закључак да је  $E_l = E_p$  односно да је енергија дата изразом (2.11) по природи потенцијална енергија у систему. Код класичног моделовања у електроенергетици, гдје се не узимају у обзир просторне расподјеле величина, израз  $LI^2$  увијек упућује на кинетичку енергију у систему, што сада није случај. Дио потенцијалне енергије усљед изложености сусцептансе  $B$  напону  $U$  може се изразити као

$$E_b = \frac{BU^2}{2}. \quad (2.12)$$

На основу изложеног, комплетан израз за потенцијалну енергију у систему добија се сабирањем једначина (2.11) и (2.12) и гласи

$$E_p = E_l + E_b = \frac{LU^2}{2|\underline{Z}|^2} (\delta_x^2 + \delta_y^2) + \frac{BU^2}{2}. \quad (2.13)$$

Лагранжова функција посматраног система може се добити сабирањем израза (2.13) и (2.5) те она гласи

$$f(x, y, t, \delta, \delta_x, \delta_y, \delta_t) = \frac{1}{2} \left[ J\delta_t^2 + \frac{LU^2}{|\underline{Z}|^2} (\delta_x^2 + \delta_y^2) + BU^2 \right]. \quad (2.14)$$

Потребно је уочити да Лагранжова функција дата са (2.14) зависи само од генерализоване промјенљиве  $\delta$  и њених парцијалних извода. Према томе, за разлику од класичне процедуре математичког моделовања примјеном Ојлер – Лагранжове једначине гдје је неопходно формирати двије одвојене једначине за електрични и механички подсистем, у случају када се узимају у обзир и просторне расподјеле одговарајућих величина, то није неопходно. Даље је потребно овако формирану Лагранжову функцију уврстити у Ојлер – Лагранжову једначину дату са (2.3). Након што се одреде одговарајући парцијални изводи, добија се израз [64]

$$J \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} - \frac{LU^2}{|\underline{Z}|^2} \left( \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \delta}{\partial y^2} \right) = J\delta_{tt} - \frac{LU^2}{|\underline{Z}|^2} (\delta_{xx} + \delta_{yy}) = 0. \quad (2.15)$$

Да би се у једначини (2.15) умјесто индуктивности  $L$  користила реактанса вода  $X_L = \omega_s L$ , могуће је комплетну једначину (2.15) помножити са синхроним кружном учестаношћу  $\omega_s$ . Након тога, добија се једначина

$$J\omega_s\delta_{tt} - \frac{X_L U^2}{|Z|^2}(\delta_{xx} + \delta_{yy}) = 0. \quad (2.16)$$

Једначина (2.16) представља таласну једначину електромеханичког таласа у идеалном случају, када се занемаре сви губици у систему. Међутим, да би се добио што реалистичнији математички модел, неопходно је узети у обзир и све губитке у посматраном систему, како механичке тако и електричне. Електрични губици снаге, односно Џулови губици, могу се изразити као

$$P_J = R(I_x^2 + I_y^2) + GU^2 \quad (2.17)$$

гдје је  $R=r\Delta x=r\Delta y[\Omega]$  отпорност вода. Уврштавањем израза за ефективне вриједности квадрата струја (2.9) и (2.10) у једначину (2.17), добија се коначан израз за Џулове губитке у посматраном систему дат са (2.18).

$$P_J = \frac{RU^2}{|Z|^2}(\delta_x^2 + \delta_y^2) + GU^2. \quad (2.18)$$

Треба уочити да електрични губици дати са (2.18) зависе и од просторних координата а не само од времена, као што је то случај код типичног моделовања када се не узимају у обзир просторни аспекти величина. Дисипација снаге која је последица пригушних намотаја генератора добија се на основу израза (2.19).

$$P_D = D\omega_s \frac{\partial \delta}{\partial t} \quad (2.19)$$

У изразу (2.19) са  $D[\text{Nms}]$  је означен коефицијент пригушења пригушних намотаја синхроног генератора. Укупна снага дисипације  $P_d$  добија се сабирањем једначина (2.18) и (2.19), што је дато једначином (2.20).

$$P_d = P_J + P_D = \frac{RU^2}{|Z|^2}(\delta_x^2 + \delta_y^2) + GU^2 + D\omega_s\delta_t \quad (2.20)$$

Анализом добијеног израза (2.20) закључујемо да су у овом случају анализирани губици снаге у систему зависни и од просторних координата. С тим у вези, није могуће функцију губитака  $P_d$  прогласити за Рејлијеву функцију, као што је то случај код класичног моделовања, у складу са објашњењем датим на почетку овог поглавља. Према томе, потребно је пронаћи другачији приступ уврштавању системских губитака у Ојлер – Лагранжову једначину.

Приједлог је да се једначини (2.16) дода једначина

$$P_m - P_d = 0 \Leftrightarrow P_m - \frac{RU^2}{|Z|^2}(\delta_x^2 + \delta_y^2) + GU^2 + D\omega_s\delta_t = 0 \quad (2.21)$$

гдје је са  $P_m$  означена механичка снага синхроног генератора. Уврштавањем једначине (2.21) у (2.16), добија се

$$J\omega_s\delta_{tt} - \frac{X_L U^2}{|\underline{Z}|^2}(\delta_{xx} + \delta_{yy}) = P_m - \frac{R U^2}{|\underline{Z}|^2}(\delta_x^2 + \delta_y^2) + G U^2 + D\omega_s\delta_t. \quad (2.22)$$

Додатним сређивањем једначине (2.22) добија се

$$J\omega_s\delta_{tt} + D\omega_s\delta_t - \frac{X_L U^2}{|\underline{Z}|^2}(\delta_{xx} + \delta_{yy}) + \frac{R U^2}{|\underline{Z}|^2}(\delta_x^2 + \delta_y^2) = P_m - G U^2. \quad (2.23)$$

Често се, код постојећих математичких модела електромеханичког таласа, умјесто момента инерције  $J$  користи временска константа генератора  $H[s]$  дефинисана са [65]

$$H = \frac{J\omega_s^2}{2S_n}. \quad (2.24)$$

У изразу (2.24) са  $S_n$  означена је номинална привидна снага или базна снага која износи  $S_n = S_b = 1[\text{r.j.}]$ . Када се искористи израз за временску константу генератора дат са (2.24) умјесто параметра  $J$ , те ако се комплетна једначина (2.23) подијели са номиналном привидном снагом  $S_n$ , како би се извршила нормализација величина, уз услов да је базни напон једнак  $U_n = U_b = 1[\text{r.j.}]$  те да је базна импеданса дефинисана као  $Z_b = U_b^2 / S_n$ , добија се једначина

$$\frac{2h}{\omega_s}\delta_{tt} + \frac{d_d\omega_s}{S_n}\delta_t - \frac{x_{ld}u^2}{|\underline{z}_d|^2}(\delta_{xx} + \delta_{yy}) + \frac{r_{ld}u^2}{|\underline{z}_d|^2}(\delta_x^2 + \delta_y^2) = \frac{p_{md} - G U^2}{S_n}. \quad (2.25)$$

Будући да су изрази (2.9) и (2.10) израчунати са претпоставком да растојања  $\Delta x$  и  $\Delta y$  теже нули, ове претпоставке се морају односити и на све величине у једначини (2.25). На тај начин се долази до континуум система а одговарајући параметри постају дистрибуирани, односно просторно зависни и то:  $H \rightarrow h(x,y)$ ,  $D \rightarrow d_d(x,y)$ ,  $x_l \rightarrow x_{ld}(x,y)$ ,  $r_l \rightarrow r_{ld}(x,y)$ ,  $z \rightarrow z_d(x,y)$  и  $P_m \rightarrow p_{md}(x,y)$  [3]. Дефинишимо коефицијенте једначине (2.25) уз друге деривације угла  $\delta$  по временској промјенљивој  $t$  и просторним координатама  $x, y$  на сљедећи начин

$$\alpha = \frac{2h}{\omega_s}, \quad \beta = \frac{x_{ld}u^2}{|\underline{z}_d|^2}. \quad (2.26)$$

Овако дефинисани коефицијенти  $\alpha$  и  $\beta$  биће кориштени у поглављу које се тиче дефинисања управљачког закона. У сврху даљег сређивања једначине (2.25), могуће је цијелу једначину подијелити коефицијентом  $\alpha$  ( $\alpha \neq 0$ ), након чега се добија коначан облик таласне једначине дат са (2.27).

$$\delta_{tt} + d\delta_t - v^2(\delta_{xx} + \delta_{yy}) + \eta^2(\delta_x^2 + \delta_y^2) = p_m. \quad (2.27)$$

У једначини (2.27) одговарајући коефицијенти дати су са

$$d = \frac{d_d \omega_s^2}{2hS_n}, \quad v^2 = \frac{x_{ld} u^2 \omega_s}{2h|z_d|^2}, \quad \eta^2 = \frac{r_{ld} u^2 \omega_s}{2h|z_d|^2}, \quad p_m = \frac{\omega_s(p_{md} - GU^2)}{2hS_n} \quad (2.28)$$

Једначина (2.27) је хиперболичка парцијална диференцијална једначина другог реда и представља таласну једначину електромеханичког таласа односно представља тражени математички модел у коначном облику. Рјешење посматране диференцијалне једначине представља функцију просторно временске расподеле угла  $\delta = \delta(x, y, t)$  у хомогеном континуум систему.

Поређењем добијеног математичког модела (2.27) са базичним моделом, истог типа, датим у [3] може се закључити да су ова два модела практично једнака. Једина разлика је што су аутори у [3] члан  $\partial\delta/\partial x \partial y$  изједначили са нулом без икаквог претходног објашњења а из намјере да се добије компактнији запис једначине употребом набла оператора. Уколико би се иста претпоставка искористила у овом случају, тада би се добио потпуно идентичан математички модел као базни модел у [3]. Стога, може се извести закључак да је овдје предложена процедура извођења електромеханичког таласа на бази Ојлер – Лагранжове једначине, заједно са предложени начином за уврштавање просторно зависних губитака у систему у таласну једначину коректна. Овакав начин доласка до математичког модела електромеханичког таласа није раније забиљежен у литератури.

Предност описане процедуре доласка до таласне једначине електромеханичког таласа у односу на процедуру дефинисану у [3] огледа се прије свега у једноставности поступка. У предложеном поступку, моделовање се врши на основу формирања Лагранжијана система који представља разлику између кинетичке и потенцијалне енергије у систему, које су универзалне величине. Поступак доласка до жељене таласне једначине је интуитиван јер је заснован на принципу најмање акције, односно физичкој неопходности да Лагранжова функција треба да задовољи одговарајућу Ојлер – Лагранжову једначину. Чак је и предложени метод уважавања просторно зависних губитака крајње интуитиван и практичан. Са друге стране, поступак доласка до математичког модела изложеног у [3] је превасходно неинтуитиван, што је последица његовог компликованог извођења. Нарочито компликовано је одређивање струја надземних водова које захтијева развој одговарајућих чланова у Тејлоров ред до четвртог степена. Још једна предност предложеног начина математичког моделовања је његова универзалност. Будући да модел почива на добро познатим и универзалним математичким принципима попут Ојлер – Лагранжове једначине, те универзалним физичким величинама попут кинетичке и потенцијалне енергије, овај поступак се може веома једноставно примијенити и на математичко моделовање других физичких феномена таласне природе, што није случај код модела датог у [3]. У поређењу са хомогеним континуум математичким моделом датим у [4] и [5], још је израженија једноставност и интуитивност извођења предложеног модела. Математички модели дати у [4] и [5] потпуно су кореспондентни са овдје предложеним математичким моделом. Њихов недостатак огледа се у поступку извођења модела који се ослања на успостављање аналогије између електричних и механичких система. Код ових модела, систем се посматра као механички систем састављен из једног вратила на коме су постављени дискови различитих момената инерције. Затим се за такав механички систем саставља дискретан математички модел, који се погодним аналогијама са електричним величинама претвара у дискретан модел електромеханичког таласа. Потом се тако добијени модел проширује на континуум модел. Може се примјетити да је оваква процедура још

компликованија чак и у поређењу са [3], те се може рећи да је значај оваквог поступка моделовања више академски него практичан. Ипак, овај модел потврђује овдје изнесу теорију те је стога погодан за упоређивање. Додатно, треба нагласити да осим у [3], аутори генерално прибјегавају извођењу једнодимензионог таласа, што је случај и са моделима датим у [4] и [5], тако да је овдје предложени дводимензиони модел у том погледу и свеобухватнији у односу на постојеће моделе.

У наставку ће бити детаљно анализирана добијена таласна једначина те ће бити извршена верификација модела кориштењем рачунарских симулација.

## 2.2 Анализа математичког модела

Као што је претходно наглашено, добијени математички модел је компликован за аналитичко рјешавање, будући да представља нелинеарну парцијалну диференцијалну једначину другог реда са коефицијентима зависним од просторних координата. Стога, у литератури још увијек није дат аналитички израз за угао  $\delta(x, y, t)$  који би представљао рјешење једначине (2.27). Ипак, показаће се да се одговарајућим поједностављењима може доћи до корисних закључака на основу изведеног модела. У ту сврху, за почетак се може посматрати таласна једначина са занемареном у координатном, односно умјесто дводимензионог, може се посматрати једнодимензиони талас, чија једначина се једноставно изводи из једначине (2.25) и гласи

$$\frac{2h}{\omega_s} \delta_{tt} + \frac{d_d \omega_s}{S_n} \delta_t - \frac{x_{1d} u^2}{|z_d|^2} \delta_{xx} + \frac{r_{1d} u^2}{|z_d|^2} \delta_x^2 = \frac{p_{md} - GU^2}{S_n}. \quad (2.29)$$

И поред смањења броја промјенљивих у једначини (2.29) и даље није једноставно ријешити такву једначину. Да би се проблем додатно поједноставио, могуће је занемарити губитке у систему, односно могуће је посматрати непригушен талас, чија једначина у овом случају гласи

$$\frac{2h}{\omega_s} \delta_{tt} + \frac{d_d \omega_s}{S_n} \delta_t - \frac{x_{1d} u^2}{|z_d|^2} \delta_{xx} = p_{mdn}. \quad (2.30)$$

гдје је са  $p_{mdn}$  означена нормализована вриједност дистрибуиране механичке снаге генератора. У сврху даље анализе, могуће је једначину (2.30) упоредити са општом диференцијалном једначином овог типа датом са [68]

$$L_a = \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} + b(x, t) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x \partial t} - a(x, t) \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} + L_1, \quad (2.31)$$

гдје је са  $L_1$  означена сума свих првих извода промјенљиве  $u(x, t)$ .

**Дефиниција 1.** За парцијалну диференцијалну једначину (2.31) кажемо да је хиперболичка ако су сви коријени  $v_{1,2}$  карактеристичног полинома дефинисаног са

$$v^2 + bv - a = 0, \quad (2.32)$$

реални. При томе се коријени карактеристичног полинома  $v_{1,2}$  називају карактеристичним брзинама таласа дефинисаног са (2.31) [68].

Поређењем опште једначине (2.31) са добијеним поједностављеним моделом (2.30), уз претходно множење цијеле једначине (2.30) коефицијентом  $2h/\omega_s$  у сврху добијања погодне форме, као у (2.31), закључујемо да вриједи

$$a = \frac{x_{ld}u^2\omega_s}{2h|z_d|^2}, b = 0, L_1 = \frac{d_d\omega_s^2}{2hS_n}\delta_t. \quad (2.33)$$

Даље је могуће одредити коријене карактеристичног полинома једначине (2.30), који на основу (2.32) гласе

$$v_{1,2} = \sqrt{\frac{x_{ld}u^2\omega_s}{2h|z_d|^2}}. \quad (2.34)$$

Будући да су сви параметри у (2.34) реални и позитивни, закључујемо да су карактеристичне вриједности  $v_{1,2}$  реалне, те на основу дефиниције 1 за добијену таласну једначину можемо рећи да је хиперболичка. Такође, на основу дефиниције 1, закључујемо израз (2.34) представља брзину простирања електромеханичког таласа, која ће даље бити означавана са  $v$ , при чему ће се узимати само позитивна вриједност израза (2.34), односно  $v=|v_{1,2}|$ .

У сврху анализе брзине простирања електромеханичког таласа, могуће је у једначину (2.34) уврстити конкретне вриједности. Стога, нека вриједи:  $x_{ld}=2\cdot 10^{-3}$ [r.j./km],  $r_{ld}=2\cdot 10^{-4}$ [r.j./km],  $h=1.5$ [s/km],  $u=1$ [r.j.]  $\omega_s=100\pi$ [rad/s]. Уврштавањем ових вриједности у израз (2.34), добија се

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1^2 \cdot 100\pi}{2 \cdot 1.5 \cdot (4 \cdot 10^{-6} + 4 \cdot 10^{-8})}} \approx 228 \left[ \frac{km}{s} \right]. \quad (2.35)$$

Очигледно је да се у реалном систему добија брзина таласа, за овако изабране параметре мреже, од приближно 228[km/s] (2.35). Према томе, примјећује се да су електромеханички таласи значајно спорији у односу на електромагнетске таласе чија брзина је приближно једнака брзини простирања свјетлости у вакууму. Другим ријечима, уколико се деси значајан поремећај у некој тачки система, очекивано је да ће се тај поремећај рефлектовати на генератору удаљеном 228[km] за само једну секунду. Ово је веома значајан резултат до кога се дошло, а који даје другачији угао погледа на феномен простирања поремећаја кроз систем.

Да бисмо детаљније анализирали израз за брзину простирања таласа (2.34), могуће је исти поједноставити. Будући да за надземне водове на високим напонима (400[kV] и већим) вриједи да је подужна индуктивност вода најчешће десет и више пута већа од подужне отпорности вода [69], тада закључујемо да вриједи  $x_{ld} \approx z_d$ . Уважавањем ове апроксимације, једначина (2.34) постаје

$$v \approx \sqrt{\frac{u^2 \omega_s}{2hx_{ld}}} \quad (2.36)$$

Будући да се напони у електроенергетском систему одржавају на номиналном нивоу, при чему је максимално дозвољено одступање  $\pm 10\%$  у односу на називну вриједност, те да су константа генератора  $h$  и синхрона брзина  $\omega_s$  фиксни параметри, на основу (2.36) закључујемо да брзина простирања таласа доминантно зависи од подужне реактансе вода. Другим ријечима, брзина простирања таласа зависи од средине кроз коју се талас простире, што је у складу са општим физичким законима везаним за простирање таласа [70]. Додатно, из изложене анализе, може да се закључи да би се промјеном реактансе вода могла модулисати брзина простирања таласа, што је битан закључак који ће накнадно бити искориштен при дефинисању управљачког алгорита у другом поглављу. Иако константа генератора није величина којом може да се управља, ипак на основу (2.36) закључујемо да је брзина простирања таласа обрнуто пропорционална инерцији генератора. Према томе, очекивано је да талас успори када наиђе на групу генератора са већом инерционом константом у односу на групу генератора која има мању инерциону константу. Дакле, уопштен закључак који може да се изведе јесте да брзина простирања таласа није константа у реалном систему него зависи од средине кроз коју се талас простире. Сама средина кроз коју се талас простире доминантно зависи од параметара надземног вода а у извјесној мјери и од инерције синхроних генератора.

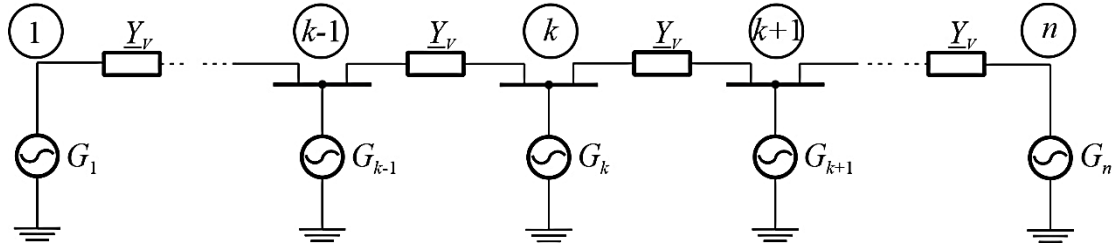
У сврху верификације изнесених теоријских резултата, неопходно је формирати адекватан симулациони модел. Будући да је континуум модел математичка фикција, која служи да се уведе другачији угао гледања на појаве у електроенергетском систему, као такав није погодан за формирање симулационог модела. С тим у вези, за потребе формирања симулације, извршиће се дискретизација добијеног математичког модела, што је детаљно описано у наставку.

## 2.3 Верификација математичког модела

За потребе анализе и верификације изведене таласне једначине биће формиране рачунарске симулације. У ту сврху неопходно је оформити одговарајући дискретни математички модел. Због детаљније анализе биће формирана два симулациона модела, за два случаја која се међусобно разликују првенствено по комплексности математичког модела синхроног генератора. Код поједностављеног случаја, синхрони генератор се сматра за извор константног напона, при чему је његова цјелокупна динамика описана поједностављеном електромеханичком једначином (енгл. *swing equation*). Други случај односи се на анализу комплекснијег тестног система у коме се користи математички модел синхроног генератора шестог реда, са уваженом динамиком побудног система, турбине, турбинског регулатора као и регулатора учестаности. У овом случају се разматра и утицај потрошње на пропагацију електромеханичког таласа.

### 2.3.1 Поједностављени тестни систем

Да би се симулирао поступак настајања и пропагације електромеханичког таласа, могуће је посматрати хипотетички систем приказан на сл. 2.2.



Сл. 2.2 – Шематски приказ поједностављеног тестног система за анализу настанка и простирања електромеханичких таласа

На сл. 2.2 приказан је низ синхроних генератора, међусобно повезаних надземним водовима са подужном комплексном адмитансом  $\underline{Y}_V = G_V - jB_V$ . Генератори су моделовани као напонски извори константне амплитуде, при чему сви генератори имају једнаке параметре, што сугерише на чињеницу да се посматра хомоген дискретизован систем. Електроуравњена једначина поједностављеног  $k$ -тог генератора дата је са

$$\frac{\partial^2 \delta_k}{\partial t^2} - d_n \frac{\partial \delta_k}{\partial t} = P_{mk} - P_{ek} \quad (2.37)$$

гдје су  $P_{mk}$  и  $P_{ek}$  механичка и електрична снага  $k$ -тог генератора, респективно а  $\delta_k$  угао оптерећења  $k$ -тог генератора. Електрична снага инјектирања  $P_{ek}$  на сабирницама  $k$  може се одредити на основу једначине [71]

$$P_{ek} = U_k^2 g_{kk} + U_k U_{k-1} [g_{k,k-1} \cos(\delta_k - \delta_{k-1}) + b_{k,k-1} \sin(\delta_k - \delta_{k-1})] + U_k U_{k+1} [g_{k,k+1} \cos(\delta_k - \delta_{k+1}) + b_{k,k+1} \sin(\delta_k - \delta_{k+1})]. \quad (2.38)$$

Одговарајући коефицијенти у једначини (2.28) налазе се из одговарајуће матрице адмитанси чворова и дати су са

$$g_{kk} = 2G_V, \quad b_{k,k-1} = b_{k,k+1} = B_V, \quad g_{k,k-1} = g_{k,k+1} = -G_V. \quad (2.39)$$

За потребе рачунарске симулације, могу се изабрати једнаки параметри вода као у рачунском примјеру (2.35). Уколико се претпостави да сви водови имају дужину од 100[km], тада је импеданса вода дата са  $\underline{Z}_V = 0.02 + j0.2$ [r.j.], одакле се једноставно добија да је тражена адмитанса вода дата са  $\underline{Y}_V = G_V + jB_V = 0.495 - j4.95$ [r.j.]. Уврштавањем конкретних вриједности у једначину (2.38), уз услов да су сви модули напона по свим сабирницама фиксни и једнаки номиналном напону, за снагу инјектирања у сабирницама  $k$  добија се

$$P_{ek} \approx 1 - \cos(\delta_k - \delta_{k-1}) - \cos(\delta_k - \delta_{k+1}) + 5[\sin(\delta_k - \delta_{k-1}) + \sin(\delta_k - \delta_{k+1})]. \quad (2.40)$$

Ако се усвоји да је коефицијент пригушења  $d_n = 0.01$  и ако се једначина (2.40) уврсти у једначину (2.37), добија се коначна диференцијална једначина којом се описује промјена фазног става напона на сабирницама  $k$  дата једначином (2.41).



$$\frac{\partial^2 \delta_k}{\partial t^2} - 0,01 \frac{\partial \delta_k}{\partial t} = P_{mk} - [1 - \cos(\delta_k - \delta_{k-1}) - \cos(\delta_k - \delta_{k+1}) + \quad (2.41)$$

$$+ 5(\sin(\delta_k - \delta_{k-1}) + \sin(\delta_k - \delta_{k+1}))]$$

Једначина (2.41) вриједи за  $k=2, 3, \dots, n-1$ , гдје је  $n$  укупан број генератора у низу. За први генератор у низу, вриједи слједећа једначина

$$\frac{\partial^2 \delta_1}{\partial t^2} - 0,01 \frac{\partial \delta_1}{\partial t} = P_{m1} - [1 - \cos(\delta_1) - \cos(\delta_1 - \delta_2) + \quad (2.42)$$

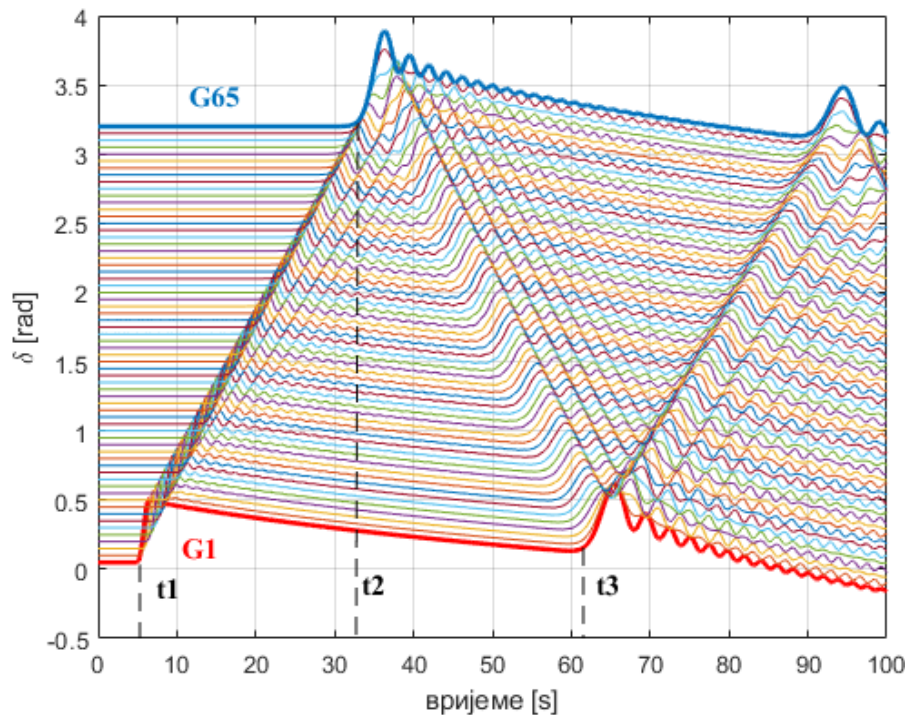
$$+ 5(\sin(\delta_1) + \sin(\delta_1 - \delta_2))].$$

Аналогно, за посљедњи генератор у низу може се написати једначина (2.43).

$$\frac{\partial^2 \delta_n}{\partial t^2} - 0,01 \frac{\partial \delta_n}{\partial t} = P_{mn} - [1 - \cos(\delta_n - \delta_{n-1}) - \cos(\delta_n) + \quad (2.43)$$

$$+ 5(\sin(\delta_n - \delta_{n-1}) + \sin(\delta_n))].$$

Систем диференцијалних једначина (2.41) – (2.43) представља дискретизован хомогени математички модел електромеханичког таласа. У сврху рјешавања овог система једначина формирана је рачуарска симулација кориштењем софтвера MATLAB (Simulink). У конкретном случају посматран је систем са 65 генератора у низу ( $n=65$ ). Да би се симулирао поремећај у систему, у тренутку  $t_1=5[s]$  генерише се импулс трајања  $0,1[s]$ , амплитуде  $1[r.g.]$  који представља поремећај механичке снаге на првом генератору у низу. За све остале механичке снаге у систему вриједи  $P_{mi}=0, i=1,2,3, \dots, n$ . Пропагација овог поремећаја кроз тестни систем приказана је на сл. 2.3.



Сл. 2.3 – Електромеханички талас на примјеру поједностављеног низа од 65 синхроних генератора

На сл. 2.3 приказани су таласни облици фазних ставова напона тестног система са сл. 2.2 по сабирницама. Треба нагласити да су таласни облици одговарајућих фазних ставова скалирани коефицијентом  $0.05k$ , гдје је  $k$  број сабирнице у систему, при чему је крајња лијева сабирница у низу проглашена за прву док је крајња десна проглашена за посљедњу односно 65, како би се боље уочио таласни феномен. Посматрањем одзива са сл. 2.3 може се уочити да у систему влада устаљено стање све док се не деси поремећај у тренутку  $t_1=5[s]$ . Будући да се ради о хомогеном систему, талас се простире кроз цијели систем, од првог ка посљедњем генератору у низу, не наилазећи на препреку, односно на тачку дисконтинуитета све док не стигне до краја низа. Тада талас наилази на бесконачну импедансу, те се рефлектује и враћа назад ка првом генератору, што се дешава у тренутку  $t_2\approx 32.5[s]$ . У тренутку  $t_3\approx 61[s]$ , рефлектовани талас стиже поново до првог генератора, те се овај процес наставља. Талас временом бива пригушен као посљедица пригушења синхроног генератора и постојања отпорности надземних водова.

Вријеме које је потребно да талас прође кроз комплетан систем, од првог до посљедњег генератора, износи приближно  $\Delta t = t_2 - t_1 \approx 27.5[s]$ . Будући да, на бази изабраних параметара вода, једна дионица вода има дужину од  $100[km]$ , тада се брзина простирања таласа дуж 64 вода једноставно може одредити као

$$v \approx \frac{6400}{27} = 232 \left[ \frac{km}{s} \right] \quad (2.44)$$

што је у одличној корелацији са рачунским примјером датим са (2.35).

Као резиме спроведене анализе, може се рећи да је на дискретном тестном систему потврђено постојање електромеханичких таласа. Додатно, анализом брзине простирања таласа дошло се до закључка да се симулациони резултати доста добро поклапају са резултатима прорачуна добијеног на бази изведене таласне једначине. Ово сугерише да је потпуно оправдано да се електромеханички таласи испитају кориштењем детаљнијих и реалистичнијих симулационих модела. Први корак ка томе је да се умјесто поједностављеног математичког модела синхроног генератора, кориштеног у претходно описаној рачунарској симулацији, користи детаљнији модел синхроног генератора, као и модели потрошача, како би се добила што вјеродостојнија представа о простирању електромеханичких таласа у реалним електроенергетским системима. С тим у вези у наставку је дат математички модел синхроног генератора који ће бити кориштен приликом даље анализе.

### 2.3.2 Реалистичан тестни систем

У оквиру анализе простирања електромеханичког таласа на примјеру низа синхроних генератора у овом случају биће кориштен математички модел синхроног генератора шестог реда, са уваженом динамиком побудног кола, турбине, турбинског регулатора и системског регулатора учестаности. Поред тога, биће кориштена и два типа потрошача и то потрошачи константне снаге и потрошачи константе импедансе, како би се дала што вјеродостојнија слика реалистичног електроенергетског система. С тим у вези у наставку је дат опис кориштеног математичког модела синхроног генератора.

#### 2.3.2.1 Математички модел синхроног генератора

Да би се дошло до одговарајућег математичког модела синхроног генератора, потребно је прво одредити промјенљиве стања система. Избор промјенљивих стања није једнозначан и битно зависи од неопходног нивоа детаља са којим је потребно моделовати

синхрони генератор. Будући да је за потребе проучавања електромеханичких осцилација у електроенергетском систему неопходно посматрати транзијентни и устаљени радни режим, тада се за промјенљиве стања могу усвојити: брзина промјене угла оптерећења ( $\partial\delta/\partial t$ ), угаоне брзине ( $\partial\omega/\partial t$ ) и транзијентне електромоторне силе по  $q$  оси ( $\partial E'_q/\partial t$ ) [65]. У овом случају добија се математички модел синхроног генератора трећег реда и то је минималан ред математичког модела потребан за проучавање електромеханичких осцилација. Међутим, за већи ниво детаља може се посматрати и рад синхроног генератора у суптранзијентном режиму. Суптранзијентни режим настаје непосредно након поремећаја, траје најкраће и мјеродаван је за одређивање електродинамичких сила које се јављају у овом периоду. У овом случају, поред претходно наведене три промјенљиве стања, неопходно је посматрати и брзине промјене транзијентне електромоторне силе по  $d$  оси ( $\partial E'_d/\partial t$ ) те суптранзијентних електромоторних сила по  $d$  ( $\partial E''_d/\partial t$ ) и  $q$  ( $\partial E''_q/\partial t$ ) оси [65]. Према томе, цјелокупан математички модел синхроног генератора, погодан за проучавање суптранзијентног, транзијентног и устаљеног радног режима, може се описати математичким моделом синхроног генератора шестог реда. Поред тога, IEEE предлаже да се за анализу система на мале поремећаје (енгл. *Small signal stability*) користи математички модел синхроног генератора вишег реда који детаљно описује прелазне процесе у пригушним намотајима [66], те је сходно свему наведеном изабрано да се у овом раду користи управо овај, комплекснији, математички модел генератора.

Због обимности извођења овог математичког модела синхроног генератора, у наставку су дате само крајње једначине које су кориштене у симулационом моделу, детаљно изведене у [65].

Електрични подсистем синхроног генератора у  $dq$  координатном систему, за транзијентна и устаљена стања, описан је једначинама од (2.45) до (2.48).

$$T'_{d0} \frac{dE'_q}{dt} = E_{fd} - E'_q + (X_d - X'_d)I_d \quad (2.45)$$

$$T'_{q0} \frac{dE'_d}{dt} = -E'_d + (X_q - X'_q)I_q \quad (2.46)$$

$$T''_{d0} \frac{dE''_q}{dt} = E'_q - E''_q + (X'_d - X''_d)I_d \quad (2.47)$$

$$T''_{q0} \frac{dE''_d}{dt} = E'_d - E''_d + (X'_q - X''_q)I_q \quad (2.48)$$

У једначинама од (2.45) до (2.48) кориштене су сљедеће ознаке:

$I_d, I_q$  – струје статора по  $d$  и  $q$  осама, респективно;

$E'_d, E'_q$  - транзијентне електромоторне силе по  $d$  и  $q$  осама, респективно;

$E''_d, E''_q$  - суптранзијентне електромоторне силе по  $d$  и  $q$  осама, респективно;

$X_d, X_q$  – синхроне реактансе генератора по  $d$  и  $q$  осама, респективно;

$X'_d, X'_q$  - транзијентне реактансе генератора по  $d$  и  $q$  осама, респективно;

$X'_d, X'_q$  - суптранзијентне реактансе генератора по  $d$  и  $q$  осама, респективно;

$T'_{d0}, T'_{q0}$  - транзијентне временске константе генератора при отвореном статорском намотају по  $d$  и  $q$  осама, респективно;

$T''_{d0}, T''_{q0}$  - суптранзијентне временске константе генератора при отвореном статорском намотају по  $d$  и  $q$  осама, респективно;

$E_{fd}$  – напон побуде.

Побудни напон генератора  $E_{fd}$  добија се као излаз побудног система генератора, управљаног напонским регулатором. Побудни систем и напонски регулатор биће детаљно моделовани у наставку.

Механички подсистем генератора описан је једначинама (2.49) и (2.50) [65].

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P - D\omega \quad (2.49)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (2.50)$$

У једначинама (2.49) и (2.50) кориштене су следеће ознаке:

$H$  – временска константа инерције агрегата (генератора и турбине заједно);

$\omega_s$  – синхрона брзина обртања;

$\omega$  – механичка брзина обртања ротора генератора;

$P_m$  – улазна (механичка) снага турбине;

$P$  – електрична снага генератора;

$D$  – коефицијент пригушења пригушних намотаја генератора.

У једначини (2.49) механичка снага  $P_m$  се добија као излаз турбине која је управљана турбинским регулатором, који ће бити моделовани у наставку. Електрична снага  $P$  рачуна се на основу једначине (2.51) [65].

$$P = E'_d I_d + E'_q I_q + (X'_d - X''_d) I_d I_q \quad (2.51)$$

Наведених шест диференцијалних једначина (2.45) – (2.51) дају математички модел синхроног генератора шестог реда, који ће бити кориштен у овом раду. У наставку ће бити описани модели регулатора побуде, турбине и турбинског регулатора.

- *Математички модел регулатора побуде*

Будући да су регулатори побуде у прошлости биле машине једносмјерне струје, за регулатор побуде се усваја да је то систем првог реда са појачањем  $K_a$  и временском константом  $T_a$ . У регулатор побуде уводи се разлика  $\Delta U$  жељене вриједности модула напона  $U_{ref}$  генератора и стварна, измјерена, вриједност овог напона  $|U|$ , док се на излазу добија сигнал  $E_{fd}$  (сл. 2.4). По потреби, у регулатор се уводи сигнал који представља излаз стабилизатора електроенергетског система, чија је функција преноса означена са  $G_{PSS}(s)$

(сл. 2.4) а који служи за сузбијање осцилација. Функција преноса регулатора побуде дата је једначином (2.52) [67].

$$E_{fd} = \frac{K_a}{1 + s T_a} \Delta U \quad (2.52)$$

- *Математички модел турбине*

Математички модел турбине представљен је системом првог реда који је дат једначином (2.36), при чему је детаљно извођење овог математичког модела дато у [67].

$$T_m \frac{dP_m}{dt} = P_{sv} - P_m \Rightarrow P_m = \frac{P_{sv}}{1 + s T_m} \quad (2.53)$$

У једначини (2.53) кориштене су сљедеће ознаке:

$P_{sv}$  – снага водене паре (ако се ради о парној турбини) која се преко одговарајућег вентила уводи у турбину;

$T_m$  – временска константа турбине.

- *Математички модел турбинског регулатора*

За математички модел турбинског регулатора се, такође, може усвојити регулатор одређен системом првог реда са временском константом  $T_{sv}$  и појачањем које је једнако јединици. Улаз у турбински регулатор је сигнал аутоматске контроле производње (енгл. *Automatic Generation Control – AGC*) који представља излаз регулатора учестаности у систему. Додатно, да би се узела у обзир промјена одате снаге машине у зависности од учестаности (енгл. *Droop Characteristics*), односно статизам машине, улаз у регулатор је и сигнал  $(\omega - \omega_s)/R_d$ . Параметар  $R_d$  представља статизам машине и најчешће се изражава у процентима. Овај параметар представља процентуалну промјену брзине у случају празног хода, те под номиналним оптерећењем [67].

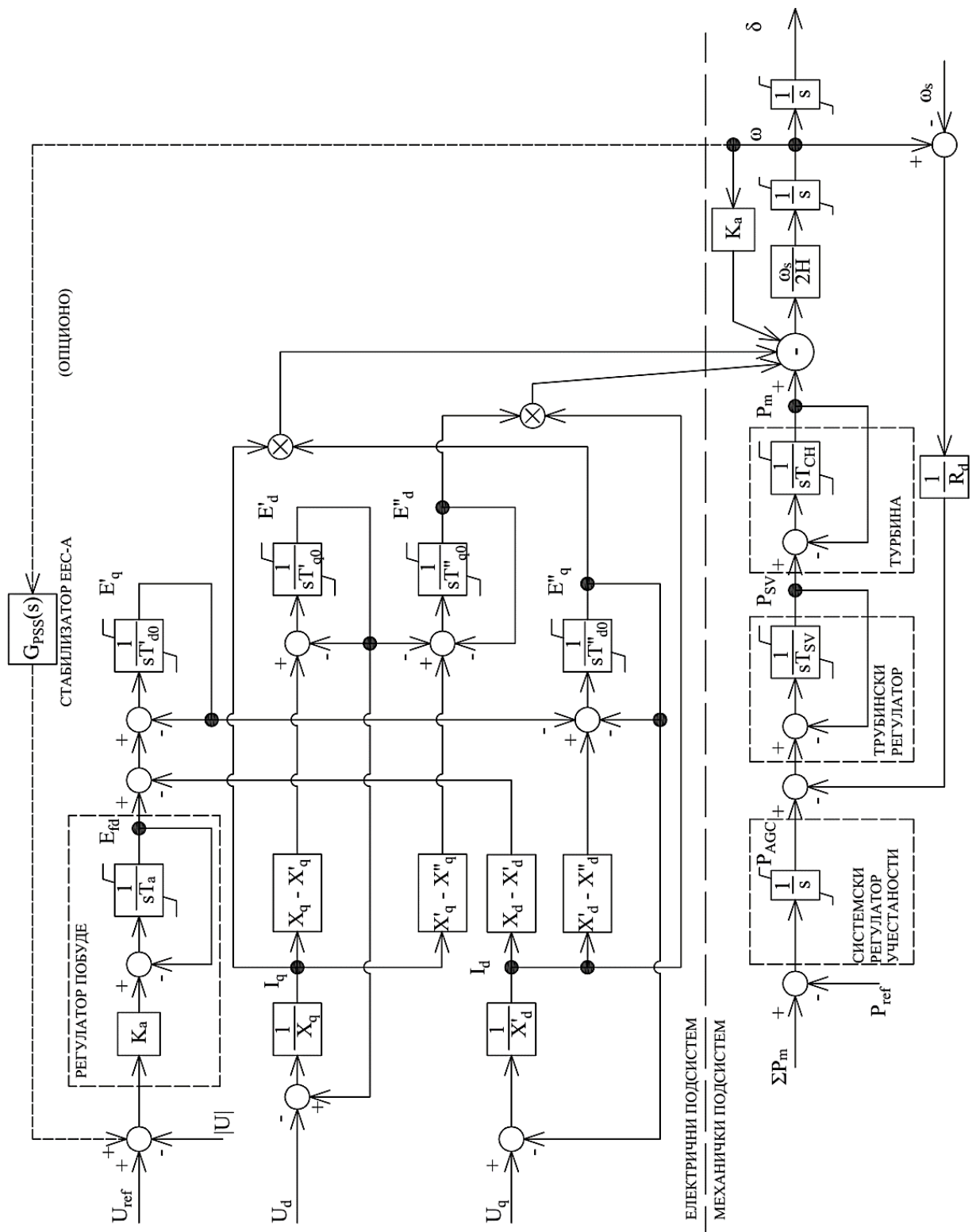
Према томе, једначина која повезује улазе и излаз турбинског регулатора дата је са [67]

$$P_{sv} = \frac{P_{AGC} - [(\omega - \omega_s)/R_d]}{1 + s T_{sv}} \quad (2.54)$$

За регулацију учестаности користи се системски регулатор. Сигнал грешке формира се као разлика механичких снага свих генератора, те потребна снага (захтјев) система. Сам регулатор у који се уводи овако формиран сигнал грешке је заправо пропорционално – интегрални (ПИ) регулатор или чешће само интегрални регулатор. Излаз овог регулатора је сигнал  $P_{AGC}$  који се води ка свим машинама и представља референцу механичке снаге сваке машине како би се учестаност у цијелом систему одржала на константној вриједности. Функција преноса овог регулатора дата је са (2.55).

$$P_{AGC} = \frac{K_f}{s} \left( \sum P_m - P_{ref} \right) \quad (2.55)$$

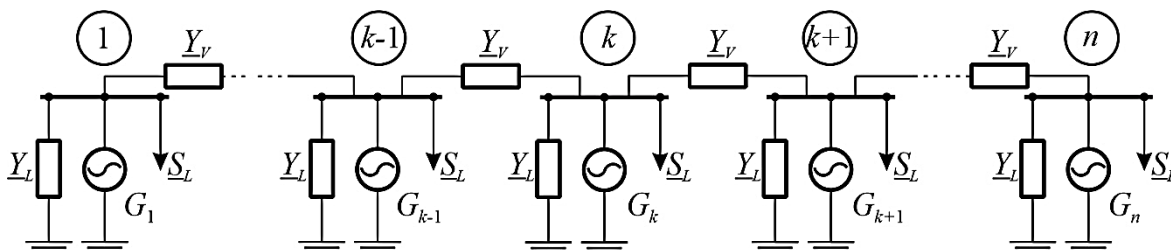
На сл. 2.4 приказан је блок дијаграм синхроног генератора шестог реда, који ће бити кориштен у овом раду, а који је описан једначинама од (2.45) до (2.55).



Сл. 2.4 – Блок дијаграм синхроног генератора шестог реда са стабилизатором електроенергетског система и системским регулатором учестаности

### 2.3.2.2 Опис реалистичног тестног система и резултати симулације

Основна разлика између поједностављеног тестног система приказаног на сл. 2.3 и реалистичног тестног система са сл. 2.5 је у математичком моделу генератора. Код система са сл. 2.5 кориштен је претходно описан математички модел синхроног генератора шестог реда, при чему се поново користи 65 генератора у низу ( $n=65$ ). Будући да се разматра хомоген дискретан систем, параметри свих синхроних генератора као и свих надземних водова су једнаки.

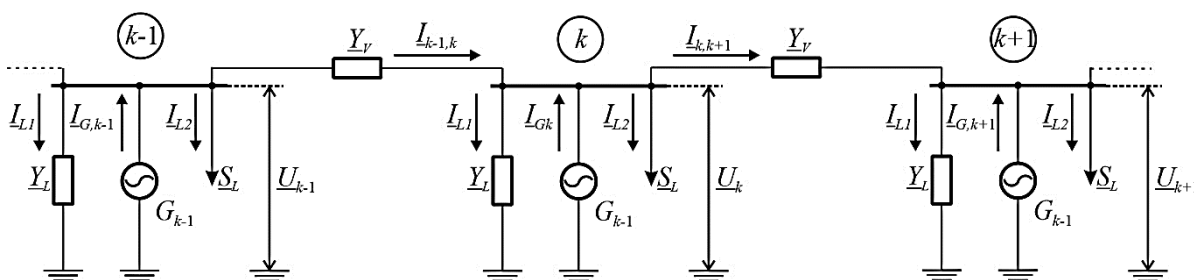


Сл. 2.5 – Шематски приказ реалистичног тестног система за анализу настанка и простирања електромагнетних таласа

Додатно у односу на претходно разматрани примјер, у овом случају, на генераторским сабирницама прикључени су и потрошачи. Кориштена су два типа потрошача. Потрошач типа константне импедансе, чија адмитанса је означена са  $\underline{Y}_L = G_L + jB_L$ , те потрошач типа константне снаге, чија је комплексна привидна снага означена са  $\underline{S}_L$ . У стационарном стању, сваки генератор напаја потрошњу на својим сабирницама, према томе вриједи

$$\underline{S}_k = U_k^2(1 - a)\underline{Y}_L^* + a\underline{S}_L \quad (2.56)$$

гдје је  $\underline{S}_k$  – комплексна привидна одата снага  $k$ -тог генератора,  $U_k$  – напон на  $k$ -тим сабирницама и  $a$  – коефицијент пропорционалности. Коефицијент пропорционалности  $a$  служи да се подеси однос између снага потрошње одговарајућег типа потрошача. У конкретном случају, одабрано је да је  $a=0,2$  што имплицира да у укупној потрошњи доминирају потрошачи константне импедансе са удјелом од 80%, док сву осталу потрошњу чине потрошачи константне импедансе. Напон  $U_k$  може се одредити на основу детаљне замјенске шеме приказане на сл. 2.6.

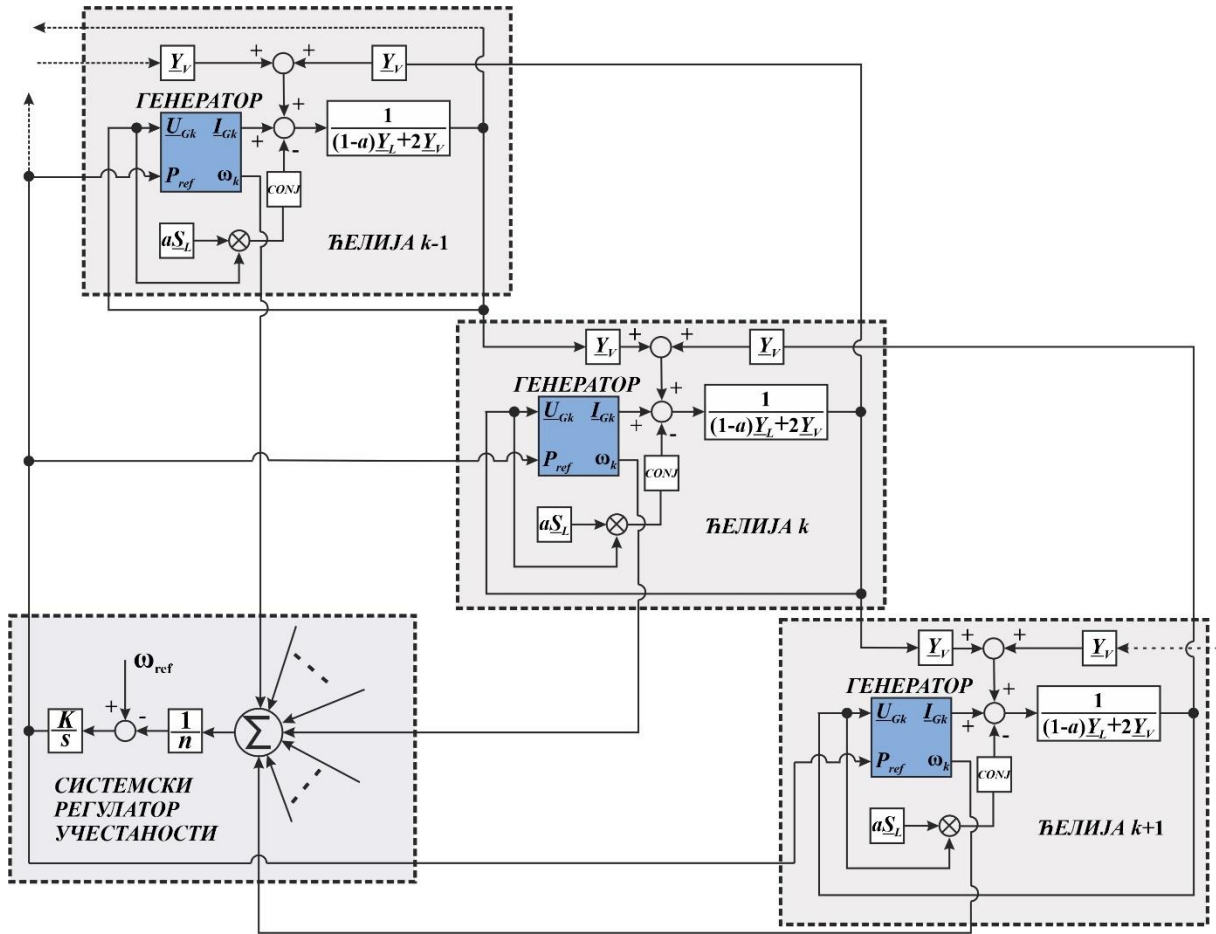


Сл. 2.6 – Еквивалентна шема дијела реалистичног тестног система

На основу назначених референтних смјерова струја на замјенској шеми датој на сл. 2.6, једноставно се долази до израза за напон на  $k$ -тим сабирницама који гласи

$$\underline{U}_k = \frac{1}{(1-a)\underline{Y}_L + 2\underline{Y}_V} [(\underline{U}_{k-1} + \underline{U}_{k+1})\underline{Y}_V + \underline{I}_{Gk} - \underline{I}_{L1}] \quad (2.57)$$

гдје је са  $\underline{I}_{Gk}$  означена струја  $k$ -тог генератора а која представља један од излаза математичког модела генератора датог на сл. 2.4, а струја  $\underline{I}_{L1}$  представља струју потрошача константне снаге а која се једноставно одређује на основу релације  $\underline{I}_{L1} = (a\underline{S}_L / \underline{U}_k)^*$ . Одређени напон  $\underline{U}_k$  представља улаз  $k$ -тог генератора. Да би се стекао увид у комплексност оваквог тестног система, на сл. 2.7 приказан је дио управљачког блок дијаграма система чији је шематски приказ дат на сл. 2.5.



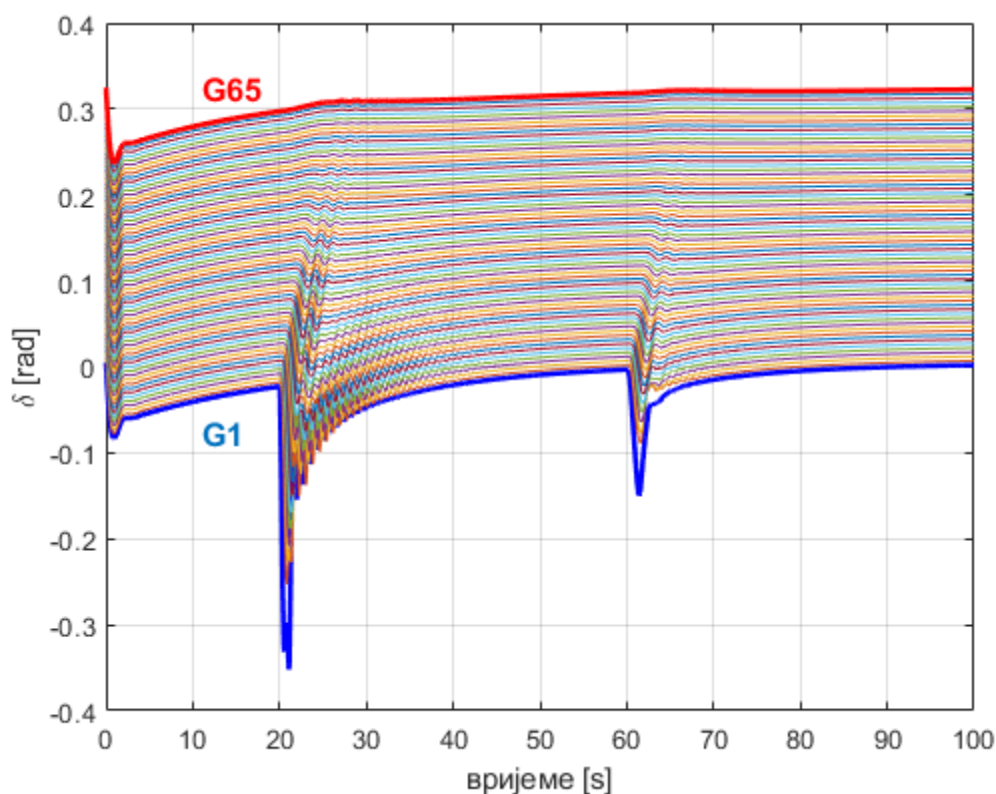
Сл. 2.7 – Блок дијаграм дијела реалистичног тестног система сачињеног од 65 синхроних генератора

Са сл. 2.7 може да се види да се као улази  $k$ -тог синхроног генератора користе напон на  $k$ -тим сабирницама  $\underline{U}_k$  и референца активне снаге  $P_{ref}$ . За излазе синхроног генератора изабрана је струја синхроног генератора  $\underline{I}_{Gk}$  те брзина обртања  $\omega_k$ . Системски регулатор учестаности као улазе користи суму свих брзина обртања синхроних генератора подијелјену са укупним бројем генератора. Добијени сигнал пореди се са жељеном вриједношћу брзине обртања, која је увијек једнака номиналној вриједности, те се сигнал грешке уводи у интегрални регулатор. Излаз овог регулатора представља референцу активне снаге свих генератора у систему. На овај начин одржава се константна учестаност у систему, што код реалног електроенергетског система одговара секундарној регулацији учестаности. Због комплексности модела, у овом случају је крајње непрактично изводити дискретни математички модел електромеханичког таласа, по узору на претходни примјер



и једначине (2.41) – (2.43), будући да би такав модел био сувише компликован за било какву анализу превасходно због комплексности коришћеног математичког модела синхроног генератора.

Стога, у сврху анализе електромеханичког таласа на оваквом, реалистичном систему, кориштењем софтвера MATLAB (Simulink) формирана је одговарајућа рачунарска симулација базирана на управљачком блок дијаграму датом на сл. 2.7 и претходно описаном математичком моделу синхроног генератора чији је блок дијаграм дат на сл. 2.4 док су сви параметри кориштени при симулацији дати у Додатку А. Треба нагласити да су сви параметри модела нормализовани у односу на базну снагу  $S_b=100[\text{MVA}]$  и базни напон  $U_b=400[\text{kV}]$ . Као извјесно проширење у односу на претходно разматрани случај, са поједностављеним математичким моделом генератора, посматран је одзив система на два типа поремећаја. Први тип поремећаја подразумеива поремећај механичке снаге првог генератора у низу (први са лијеве стране на сл. 2.5), који се дешава у тренутку  $t_{m1}=20[\text{s}]$  укупног трајања  $1[\text{s}]$ , чија вриједност износи  $0,25[\text{r.j.}]$ . Други поремећај дешава се у тренутку  $t_{v1}=60[\text{s}]$  и односи се на поремећај референтне вриједности напона истог синхроног генератора. Овај поремећај моделован је такође правоугаоним импулсом трајања  $1[\text{s}]$ , вриједности  $0,1[\text{r.j.}]$ . Резултати симулације приказани су на сл. 2.8.

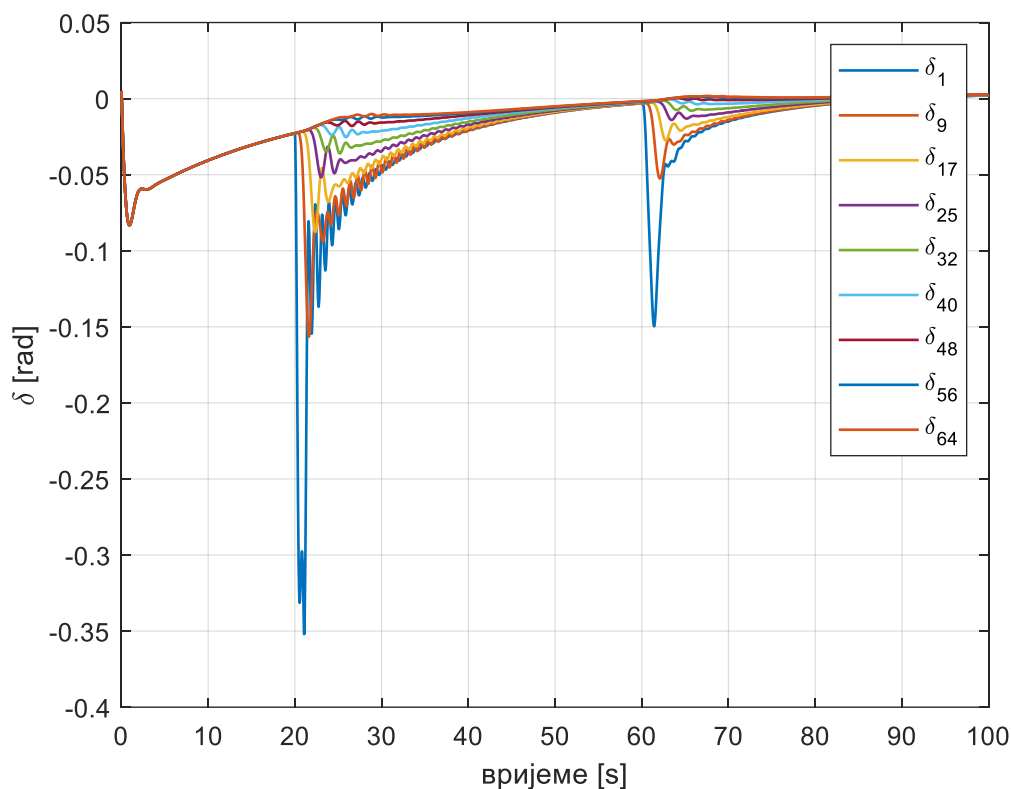


Сл. 2.8 – Електромеханички талас добијен помоћу дискретизованог реалистичног тестног система сачињеног од низа од 65 синхроних генератора

На сл. 2.8. приказани су таласни облици угла оптерећења синхроних генератора реалистичног тестног система. Треба истаћи да су приказани углови скалирани коефицијентима  $0,005k$  ( $k=1, 2, 3, \dots, 65$ ) гдје је  $k$  редни број генератора у низу (сл. 2.5). Са добијених таласних облика приказаних на сл. 2.8 поново се може уочити егзистенција електромеханичког таласа. Након почетног прелазног процеса, угао оптерећења свих

генератора је међусобно једнак, будући да напајају једнаке потрошаче. Због усклађености између производње и потрошње по сабирницама, нема тока енергије по водовима. Када се деси први поремећај, у тренутку  $t_{m1}=20[s]$  а који се манифестује поремећајем механичке снаге првог генератора, долази до осцилација углова оптерећења, не само генератора на коме се десио поремећај, него и осталих генератора у систему. Наравно, највеће осцилације угла оптерећења дешавају се на првом генератору који је сам и извор поремећаја. Како поремећај путује ка посљедњем генератору у низу, осцилације углова оптерећења генератора удаљенијих од извора поремећаја су све слабије. Може се уочити да се на посљедњем генератору у низу поремећај готово и не примјети, односно практично је занемарив. Овај феномен није могао да се уочи у претходно разматраном случају поједностављеног тестног система. Након што посматрани поремећај ишчезне, систем улази у ново стационарно стање, све док се не деси нови поремећај у тренутку  $t_{v1}=60[s]$  који представља поремећај референтне вриједности напона статора првог генератора у низу. Будући да је овај генератор поново извор поремећаја, на њему је примјетна најзначајнија амплитуда осцилација угла оптерећења. Аналогно претходно разматраном поремећају, осцилације углова оптерећења захватају и остале генераторе. Што је генератор удаљенији од мјеста настанка поремећаја, амплитуда осцилација угла оптерећења тог генератора биће мања. Може се уочити да у овом случају осцилације ишчезавају већ на средини низа, тако да остали генератори практично и не осјете дејство поремећаја. Стога, може се извести закључак да поремећаји механичке снаге значајно више утичу на пропагацију и амплитуду електромеханичког таласа у односу на напонске поремећаје. Ово је битан закључак за даљу анализу. Поред наведеног, уочава се да је овако формиран детаљан тестни модел значајно употребљивији за анализу у односу на претходно разматрани поједностављени модел. Овај модел доноси одговарајућу флексибилност у анализи будући да омогућава посматрање утицаја различитих типова поремећаја на простирање таласа али и даје увид на који начин управљачке структуре синхроног генератора утичу на сам електромеханички талас. У случају поједностављеног система, није постојало пригушење осцилација таласа (сл. 2.3), док је у овом случају то пригушење значајно. Стога се изводи закључак да сами управљачки системи реалистичног синхроног генератора утичу на смањење осцилација угла оптерећења и у извјесној мјери сузбијају ширење електромеханичког таласа кроз систем.

Да би се стекао утисак о нивоу смањења осцилација угла оптерећења генератора у реалистичном тестном систему може се посматрати сл. 2.9. На овој слици приказани су таласни облици угла оптерећења сваког деветог генератора из посматраног низа од 65 генератора, почевши од првог генератора а закључно са генератором број 64. У овом случају приказани таласни облици углова оптерећења нису скалирани како би се боље могле упоредити амплитуде осцилација. Са сл. 2.9 може се уочити да се у случају поремећаја механичке снаге, амплитуда осцилација угла оптерећења 9. генератора смањи за приближно 57% у односу на амплитуду осцилације угла оптерећења првог генератора, док у случају напонског поремећаја ово пригушење износи чак приближно 66%. Ове вриједности су веома значајне са аспекта стабилности цјелокупног система. Међутим, не треба изгубити из вида да се релативно мали поремећај на једном генератору у низу рефлектује на готово све генераторе. Другим ријечима, и 64. генератор у низу осјети дејство поремећаја на првом генератору иако је удаљен 6400[km] од извора поремећаја, што приближно одговара ваздушном растојању од Београда до Калкуте у Индији. Посматрано на овај начин, ипак се може закључити да дејство управљачких структура синхроних генератора само по себи и није довољно да би се у великој мјери сузбио утицај електромеханичких таласа на географски широко распрострањеним електроенергетским системима.



Сл. 2.9 – Таласни облици углова оптерећења сваког дветог генератора добијен помоћу дискретизованог реалистичног тестног система сачињеног од низа од 65 синхроних генератора

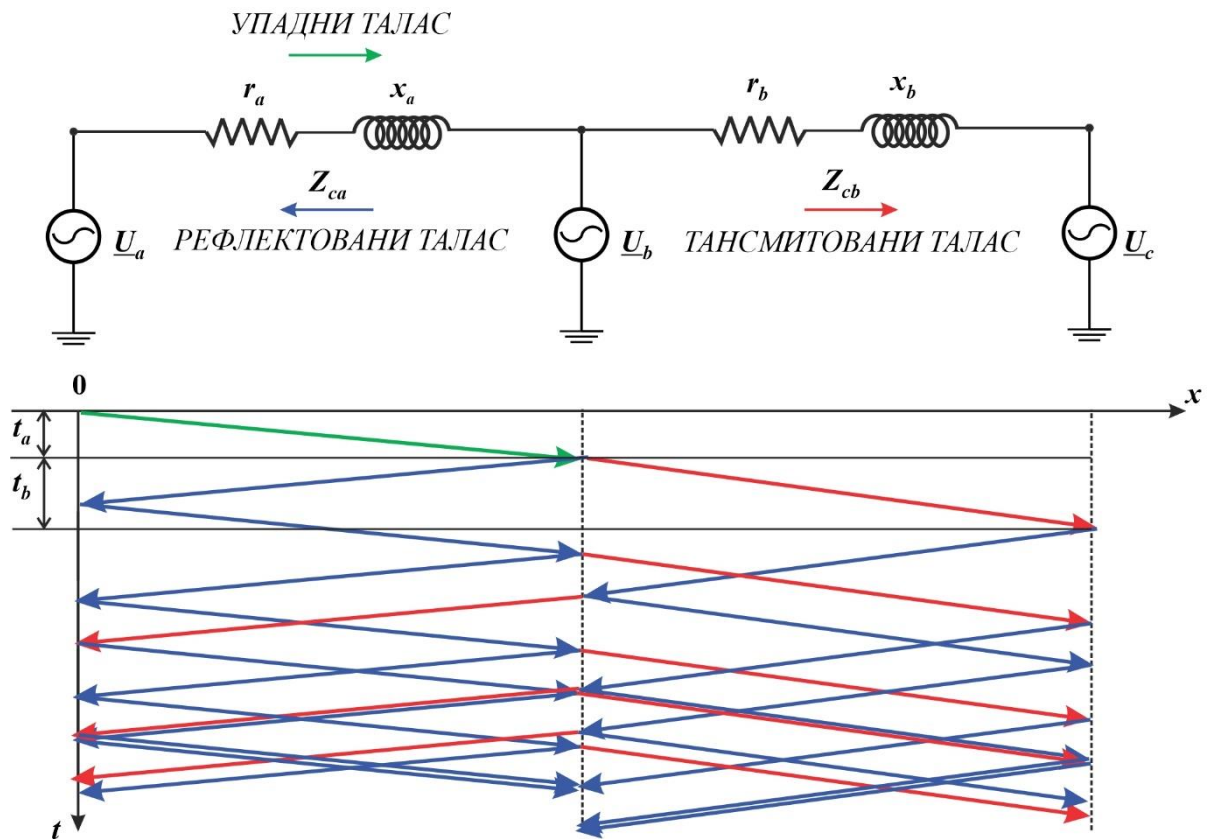
Према томе, даљи фокус овог рада биће усмјерен на изналажење могућности сузбијања ширења електромеханичких таласа у систему. С тим у вези, у наредном поглављу биће додатно анализиран математички модел који је изведен и верификован у овом поглављу с акцентом на идентификацију погодних управљачких величина које могу у значајној мјери да утичу на смањење амплитуде електромеханичког таласа. Посебан фокус биће стављен и на могућност формулисања одговарајућег управљачког закона који би могао да обезбједи практично потискивање таласа а који би био прихватљив са техничког аспекта.

### 3 СУЗБИЈАЊЕ ЕЛЕКТРОМЕХАНИЧКИХ ТАЛАСА

Један од два основна циља овог рада јесте изналагање употребљивог и практично остваривог начина за сузбијање ширења електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима. Треба нагласити да је увидом у релевантну литературу уочен недостатак систематичног приступа рјешавању овог проблема. Постоји неколико различитих приступа рјешавању овог проблема а који су наведени у уводном поглављу. Неки од проблема поменутих рјешења су: немогућност практичне реализације предложеног начина потискивања таласа, несистематски приступ рјешавању проблема и погрешан избор управљачких промјенљивих. Немогућност практичне реализације је основни проблем регулатора нулте рефлексије [43-46], који је заснован на идеји да се одговарајући уређај постави на границу система како би спријечио рефлексије таласа и самим тим смањио ширење таласа кроз систем. Несистематски приступ тиче се алгоритама за сузбијање електромеханичких таласа који су засновани на модификацији параметара постојећих стабилизатора електроенергетског система [57-61]. Код ових алгоритама, не посматра се системски феномен ширења таласа него се посматра могућност сузбијања локалних осцилација, везаних за конкретан генератор или скуп генератора на неком подручју. Најреалистичнији приступ који је до сада забиљежен у литератури тиче се кориштења статичког напонског компензатора (SVC) у сврху потискивања таласа [53], [54]. Проблем са овим приступом огледа се у чињеници да SVC има могућност искључиво модулације амплитуде напона који је неопходно држати унутар дозвољених граница тако да је значајно сужен маневарски простор са аспекта управљања. Стога се сматра да је у том случају одабрана погрешна управљачка величина или да је одабрано недовољно управљачких величина. Идеја овог рада је да се поред модулације амплитуде напона изнађе још нека адекватна величина којом је могуће једноставно управљати а да има значајан утицај на ширење електромеханичког таласа у систему. Да би се дошло до такве величине, у наставку ће бити додатно анализиран математички модел изведен у претходном поглављу с тим да ће посебна пажња бити усмјерена на изналагање управљачког алгорита погодног за потискивање таласа. Добијени алгоритам ће у наставку бити упоређен са већ поменутих, постојећим алгоритмима.

#### 3.1 Рефлексија и трансмисија таласа

Електромеханички талас, као и сваки други талас, има могућност рефлексије и трансмисије. Да би се дошло до математичких израза за коефицијенте рефлексије и трансмисије таласа, могуће је посматрати један, мањи, дио електроенергетског система чија је еквивалентна шема приказана на сл. 3.1. На сл. 3.1 су са  $r$ ,  $x$  означене су подужне отпорности и индуктивности водова, респективно,  $Z_{ca}$  и  $Z_{cb}$  представљају карактеристичне импедансе одговарајућих дијелова система, док су са  $\underline{U}$  означени фазори напона. Претпостављено је да се поремећај дешава на првом генератору са лијеве стране, одакле потиче упадни талас означен зеленом бојом на сл. 3.1. Уколико карактеристичне импедансе  $Z_{ca}$  и  $Z_{cb}$  нису једнаке, тада долази до рефлексије (означена плавом бојом) и трансмисије (означена црвеном бојом) таласа у тачки споја водова. Примјеном мрежног дијаграма, анализирани су рефлексије и трансмисије таласа дуж два посматрана вода. Вријеме које је потребно да талас стигне са почетка на крај првог вода, означеног индексом  $a$  је  $t_a$ , док са почетка на крај другог вода талас стиже за вријеме означено са  $t_b$ .



Сл. 3.1 – Еквивалентна шема дијела електроенергетског система погодна за извођење коефицијента рефлексије и трансмисије са примјером рефлексије и трансмисије

На основу приложеног мрежног дијаграма рефлексија и трансмисија таласа, може се закључити да се у посматраном случају јављају вишеструке рефлексије и трансмисије таласа. Ове појаве нису везане само за крајње тачке у систему (генераторе  $a$  и  $c$ ) него и за тачку дисконтинуитета у средини система (генератор  $b$ ). Као што је раније наглашено, читав један тип регулатора за потискивање таласа, тзв. регулатор нулте рефлексије, занемарује могућност овакве појаве у систему и предлаже постављање регулатора само на крају система (у овом случају тачка  $c$ ) како би се смањиле рефлексије. На основу приложене анализе, може се закључити да иако не би постојале рефлексије таласа са краја система, ипак би се у тачки дисконтинуитета, на средини система, јављале рефлексије и трансмисије које би утицале на појаву осцилација у систему. Стога би било много практичније и ефикасније на погодан начин изоловати други вод, односно генераторе у тачкама  $b$  и  $c$ , како се поремећај са почетка система не би проширио кроз остатак система. Како би се дошло до одговарајућег управљања које би било у стању да задовољи овакве захтјеве, потребно је одредити математичке изразе за коефицијенте рефлексије и трансмисије таласа.

Из теорије таласа, познато је да се коефицијенти рефлексије  $r_c$  и трансмисије  $t_c$  за систем са сл. 3.1 могу изразити као [70]

$$t_c = \frac{2Z_{cb}}{Z_{ca} + Z_{cb}}, \quad r_c = \frac{Z_{cb} - Z_{ca}}{Z_{ca} + Z_{cb}}. \quad (3.1)$$

Даље је на основу математичког модела система изложеног у претходном поглављу неопходно одредити карактеристичне импедансе  $Z_{ca}$  и  $Z_{cb}$ . Уколико се успостави

аналогија између електромагнетске једначине вода и електромеханичке једначине дате са (2.25), тада се долази до закључка да је карактеристична импеданса за случај електромеханичког таласа дата са [27]

$$Z_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha\beta}}. \quad (3.2)$$

Уколико се искористе ознаке уведене на сл. 3.1 и једначине коефицијента  $\alpha$  и  $\beta$  дате са (2.26), тада се једноставно закључује да вриједи

$$\alpha_a = \frac{2h_a}{\omega_s}, \quad \beta_a = \frac{x_a u_a^2}{|z_a|^2}, \quad \alpha_b = \frac{2h_b}{\omega_s}, \quad \beta_b = \frac{x_b u_b^2}{|z_b|^2}. \quad (3.3)$$

Тражене карактеристичне импедансе  $Z_{ca}$  и  $Z_{cb}$  дефинишу се као [64]

$$Z_{ca} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_a \beta_a}} = \sqrt{\frac{\omega_s |z_a|^2}{2h_a x_a u_a^2}}, \quad Z_{cb} = \frac{1}{\sqrt{\alpha_b \beta_b}} = \sqrt{\frac{\omega_s |z_b|^2}{2h_b x_b u_b^2}}. \quad (3.4)$$

Карактеристична импеданса таласа описује средину кроз коју се преноси талас а не сам талас. На основу једначине (3.4) може се закључити да простирање електромеханичког таласа кроз систем зависи од више параметара: синхроне учестаности, модула импедансе вода, реактансе вода, дистрибуиране временске константе синхроног генератора, те од модула напона на сабирницама. У наставку ће се посветити већа пажња анализи таласа у случају промјене неке од наведених величина. Будући да је циљ овог извођења долазак до коефицијената трансмисије и рефлексије таласа, посљедњи корак у том поступку јесте да се једначине (3.4) уврсте у (3.1). Израз за коефицијент трансмисије таласа дат је са

$$t_c = \frac{2 \sqrt{\frac{\omega_s |z_b|^2}{2h_b x_b u_b^2}}}{\sqrt{\frac{\omega_s |z_a|^2}{2h_a x_a u_a^2}} + \sqrt{\frac{\omega_s |z_b|^2}{2h_b x_b u_b^2}}}. \quad (3.5)$$

Добијени израз (3.5) је прилично компликован за детаљну анализу, стога је потребно овај израз упростити на погодан начин. За надземне водове називног напона 220[kV] и више, оправдано је увести претпоставку да је подужна отпорност вода значајно мања од подужне индуктивности, односно да у конкретном случају вриједи  $x_a \gg r_a$  и  $x_b \gg r_b$  [69]. Будући да је генераторска константа  $h$  конструкциони параметар који није могуће подешавати примјеном одговарајућих управљачких процедура, пожељно је овај параметар елиминисати из једначине (3.5). То је могуће постићи ако се за посматрани систем усвоји да сви генератори имају једнаке моменте инерције, односно да вриједи  $h_a = h_b = h_c = h$ . Након што се описана занемарења уврсте у једначину (3.5), добија се једноставнији израз за коефицијент трансмисије дат са (3.6).

$$t_c = \frac{2u_a \sqrt{x_b}}{u_b \sqrt{x_a} + u_a \sqrt{x_b}}. \quad (3.6)$$

Примјећујемо да добијени коефицијент трансмисије таласа дат са (3.6) зависи искључиво од реактанси водова и модула напона, што значајно упрошћава комплетну анализу. Коефицијент рефлексије се једноставно добија из једначине  $r_c = t_c - 1$  [70]. Будући да постоји директна пропорционалност између коефицијента рефлексије и трансмисије, довољно је да се детаљно анализира један од ова два коефицијента, а у овом случају изабрано је да то буде коефицијент трансмисије.

У сврху даље анализе, може се усвојити да је реактанса  $x_a$  фиксан параметар који не може да се мијења и да је модуло напона на првим сабирницама (сл. 3.1) једнак номиналном напону, односно  $u_a = 1$  [г.ј.]. Уважавање ове претпоставке је такође оправдано са аспекта да се напони у систему заиста одржавају у околини номиналне вриједности а напон на једним од сабирница се свакако узима за референтни напон у систему. Уколико се ове претпоставке уврсте у једначину (3.6), једначина за коефицијент трансмисије таласа постаје

$$t_c = \frac{2\sqrt{\frac{x_b}{x_a}}}{\sqrt{\frac{x_b}{x_a} + u_b}} \quad (3.7)$$

Добијени израз (3.7) за одређивање коефицијента трансмисије електромеханичког таласа је прилично једноставан и употребљив за даљу анализу.

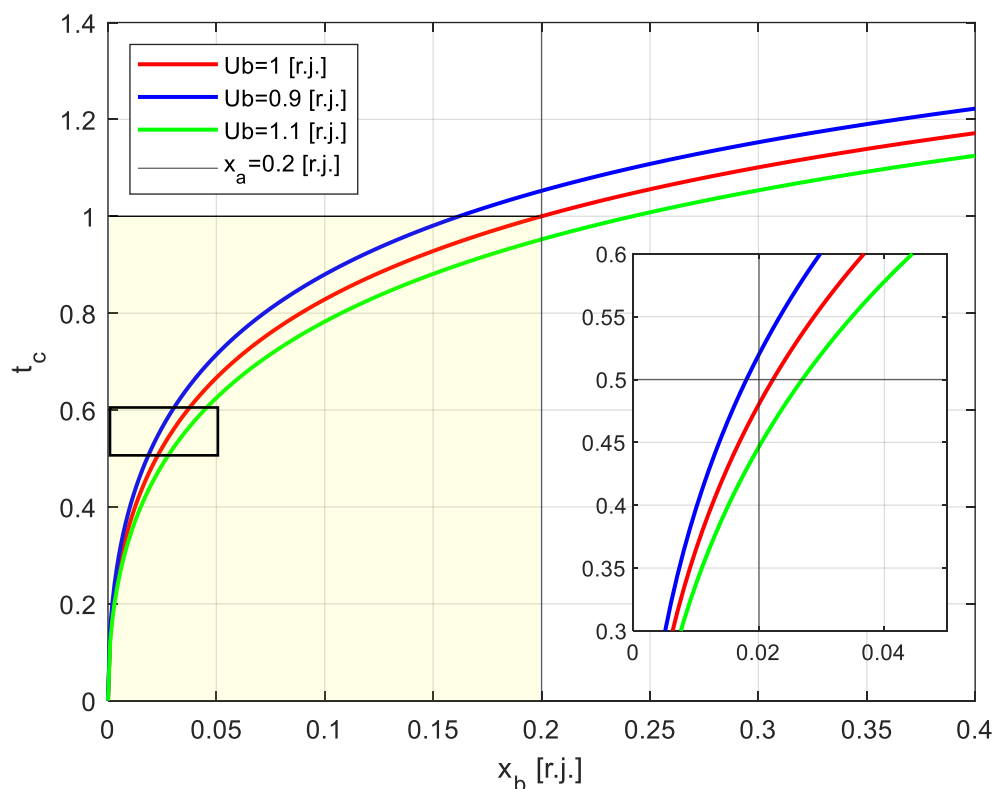
### 3.2 Анализа могућности сузбијања електромеханичког таласа

Цјелокупну анализу могућности потискивања електромеханичког таласа могуће је спровести детаљним анализирањем израза (3.7). Претпоставимо да је на почетку другог вода чији су параметри означени индексима  $b$  (сл. 3.1), могуће поставити одговарајући уређај који има могућност модулације редне реактансе  $x_b$  и модула напона  $u_b$ . При томе треба водити рачуна да у реалним околностима напон  $u_b$  није могуће мијењати значајније у односу на номиналну вриједност. Познато је да дозвољен опсег за промјену модула напона у систему износи  $\pm 10\%$  у односу на номиналну вриједност. Функционална зависност коефицијента трансмисије (3.7) у односу на параметре  $x_b$  и  $u_b$  може се сажети у сљедећем:

- Ако је  $x_b/x_a < 1$  и  $u_b = 1$ , тада је  $t_c < 1$ . У овом случају талас је потиснут. Односно, амплитуда трасмитованог таласа мања је од амплитуде упадног таласа.
- Ако је  $x_b/x_a < 1$  и  $u_b > 1$ , тада је  $t_c < 1$ . У овом случају талас је додатно потиснут у поређењу са претходним случајем.
- Ако је  $x_b/x_a > 1$  и  $u_b = 1$ , тада је  $t_c > 1$ . У овом случају талас је увећан. Односно, амплитуда трасмитованог таласа већа је од амплитуде упадног таласа.
- Ако је  $x_b/x_a = 1$  и  $u_b = 1$ , тада је  $t_c = 1$ . У овом случају нема промјене у амплитуди таласа. Односно, амплитуда трасмитованог таласа иста је као и амплитуда упадног таласа. Ово је заправо случај хомогеног система који је претходно детаљно анализиран и за који је рачунарским симулацијама у претходном поглављу утврђено да вриједи овдје изнесена законитост.
- Ако је  $x_b/x_a = 0$  ( $x_b = 0$ ) и  $u_b = 1$ , тада је  $t_c = 0$ . Трансммитовани талас је анулиран. У овом случају не постоји даља пропација таласа кроз систем. Треба уочити да овај случај одговара потпуној компензацији реактансе вода и накнадно ће бити детаљно анализиран.

- Ако је  $x_b/x_a=1$  и  $u_b > 1$ , тада је  $t_c < 1$ . У овом случају талас је потиснут али је потискивање евидентно мање него у случају  $x_b/x_a < 1$  и  $u_b > 1$ .

На основу претходно изнесене анализе, може се закључити да је потискивање електромеханичког таласа могуће постићи промјеном реактансе вода и модула напона на одговарајућим сабирницама тако да се директно утиче на коефицијент трансмисије таласа. У сврху одабира најповољнијег приступа модулацији коефицијента трансмисије, могуће је посматрати функционалну зависност коефицијента трансмисије  $t_c$  у зависности од реактансе  $x_b$  и модула напона  $u_b$ , што је приказано на сл. 3.2.



Сл. 3.2 – Функционална зависност коефицијента трансмисије од реактансе вода и модула напона

У сврху генерисања графика функције  $t_c=f(x_b, u_b)$  приказаних на сл. 3.2 изабрано је да реактанса вода  $a$  износи  $x_a=0.2$ [r.j.]. Посматрана је промјена коефицијента трансмисије таласа у случају када се реактанса вода  $b$   $x_b$  мијења од нуле до двоструке вриједности реактансе  $x_a$ , односно до максималне вриједности  $x_b=0.4$ [r.j.]. Приказана су укупно три графика који одговарају различитим вриједностима напона  $u_b$ . Црвеном бојом означен је график функције у случају када је напон на сабирницама  $b$  једнак номиналној вриједности, односно  $u_b=1$ [r.j.], плавом бојом означен је график функције за случај  $u_b=0.9$ [r.j.], док је график означен зеленом бојом добијен за вриједност  $u_b=1.1$ [r.j.]. Изабрани опсег напона на сабирницама  $b$  одговара максимално дозвољеним одступањима модула напона у електроенергетском систему. Са сл. 3.2 може се уочити да у случају када вриједност реактансе  $x_b$  постане већа од реактансе  $x_a$ , коефицијент трансмисије  $t_c$  постаје већи од јединице. Ово практично значи да се у том случају добија увећање трансмитованог таласа у односу на упадни талас, што је изузетно непожељна појава, те је у супротности са оним што је циљ овог рада. Будући да је циљ рада сузбијање таласа, тада се једноставно закључује да је дозвољен опсег промјене реактансе  $x_b$  између нуле и  $x_a$ , што одговара маркираној области на сл. 3.2. Ова област уједно представља и



управљачку област, односно област од интереса. Посматрањем добијених резултата, једноставно се закључује да је за потребе сузбијања ширења електромеханичког таласа неопходно искључиво смањивати реактансу вода. Уколико би жељено потискивање таласа износило 50% у односу на упадни талас, другим ријечима уколико би било потребно да се само 50% упадног таласа пропусти даље кроз систем, коефицијент трансмисије требало би да износи 0.5. Овај случај анализиран је на увећаном дијелу графика на сл. 3.2. У овом случају, за номинални напон  $u_b$  требало би реактансу  $x_b$  подесити да износи приближно 0.02[r.j.] што је око десет пута мање у односу на реактансу  $x_a$ . Важно је уочити да у овом случају жељена вриједност реактансе  $x_b$  постаје приближно једнака номиналној отпорности вода  $r_b$  која је раније занемарена у прорачуну. Међутим, уколико је  $r_b \approx x_b$  тада не важи израз за коефицијент трансмисије дат са (3.7) а на основу којег је извршена цјелокупна анализа. У том случају је израз (3.5) мјеродаван за детаљну анализу коефицијента трансмисије. Стога се закључује да би приликом модулације редне реактансе вода било неопходно пропорционално модулисати и редну отпорност како би њихов међусобни однос остао константан а по могућности и једнак номиналном.

Конечно, потребно је анализирати и утицај модула напона на сабирницама  $b$  на могућност потискивања таласа. Посматрањем графика функције са сл. 3.2 у оквиру управљачке (маркиране) области, може се закључити да за једнаку вриједност реактансе  $x_b$  добија мањи коефицијент трансмисије при већем напону напајања. Ово је нарочито уочљиво када се посматра увећани дио графика на сл. 3.2 гдје се може уочити да се нпр. при вриједности реактансе  $x_b=0.02$ [r.j.] при напону  $u_b=1.1$ [r.j.] добија око 5% мањи коефицијент трансмисије у односу на случај при једнакој реактанси  $x_b$  и номиналном напону  $u_b$ . Приликом снижавања напона  $u_b$  добија се пораст коефицијента трансмисије при константној вриједности реактансе вода. Стога је препоручљиво да се напон на одговарајућим сабирницама не спушта испод номиналне вриједности. Утицај реактансе  $x_b$  на коефицијент трансмисије је значајно већи у односу на утицај амплитуде напона. Уколико би се напон  $u_b$  одржавао на номиналној вриједности, што је уобичајен случај у електроенергетском систему, тада би смањивањем реактансе  $x_b$  испод вриједности реактансе  $x_a$  омогућило постизање произвољног степена пригушења трансмитованог таласа. На овај начин би се поједноставио управљачки алгоритам а не би дошло до деградације перформанси цјелокупног система. Међутим, уколико је практично могуће, пожељно је адекватно мијењати и модуо напона мреже како би се постигли што бољи резултати.

Нарочито интересантно је посматрати случај потпуне компензације реактансе  $x_b$ , што би практично значило да вриједи  $x_b=0$ . Тада не би постојао трансмитовани талас. Другим ријечима, ширење електромеханичког таласа кроз систем би било потпуно елиминисано. Међутим, у том случају карактеристична импеданса  $Z_{cb}$  (3.5) на сл. 3.1 била би бесконачна. Тада би инцидентни талас осциловао само између генератора  $a$  и  $b$ . Овакво рјешење резултовало би значајним осцилацијама на посматраним генераторима, док генератор  $c$  не би уопште био захваћен таласом. Генерално, овакво рјешење је са техничког аспекта није нарочито прихватљиво. Са друге стране, могуће је да постоје извјесне околности у реалним електроенергетским системима гдје би било оправдано и смислено примијенити овакву управљачку стратегију. Уопштено гледано, значајно практичније би било пропустити један дио таласа кроз систем и на тај начин смањити ударе осцилација на дијелу система погођеним кваром. Истина, у том случају ће и неки удаљенији дијелови система да буду погођени поремећајем али у значајно мањој мјери у односу на случај када се не користи предложени метод управљања. Као што је то уобичајено у техници, одговарајућа управљачка стратегија је ствар компромиса јер најчешће није могуће задовољити апсолутно све захтјеве који се постављају пред систем.

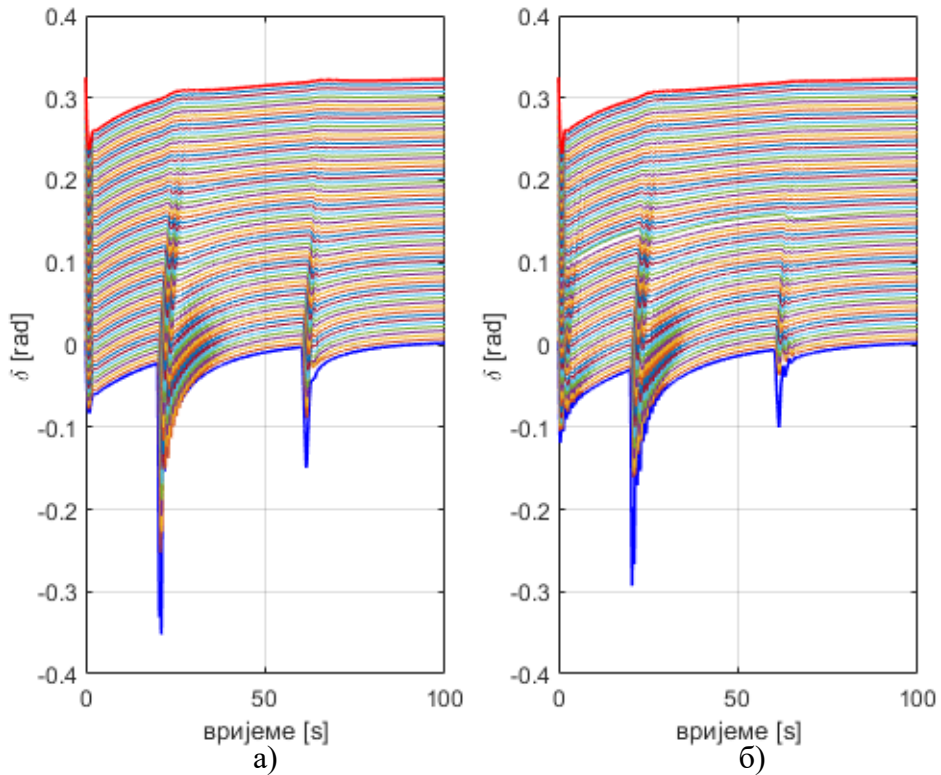
Претходно изнесена анализа може се сажети у сљедећем. За потребе потискивања електромеханичког таласа неопходно је редуковати коефицијент трансмисије таласа. Овај задатак успјешно се може обавити смањењем реактансе одговарајућег надземног вода уз адекватну модулацију амплитуде мрежног напона. Из претходно објашњених разлога, пропорционално смањењу реактансе вода, неопходно је смањивати и отпорност вода. Другим ријечима, смањење ширења електромеханичког таласа кроз систем могуће је постићи смањењем параметара редне импедансе вода уз адекватну модулацију модула напона на почетку вода, што је уједно и формулација одговарајућег управљачког закона.

Треба уочити да једини тренутно доступан комерцијални уређај који је у могућности да модулише редну импедансу надземног вода, те да при томе на одговарајући начин модулише напон на одређеним сабирницама, је унифицирани контролер токова снага (енгл. *Unified Power Flow Controller – UPFC*). Такође, важно је примјетити да UPFC никада раније није употријебљен у сврху независног и одвојеног управљања редном отпорношћу и индуктивношћу надземног вода. Према томе, потребно је испитати и могућности UPFC-а да испуни овакав сложен управљачки закон. Овоме, али и цјелокупном начину функционисања UPFC-а као и његовој практичној примјени биће посвећено наредно поглавље овог рада.

У наставку овог поглавља посветиће се пажња верификацији дефинисаног управљачког закона помоћу једноставнијих, претходно описаних, рачунарских симулација.

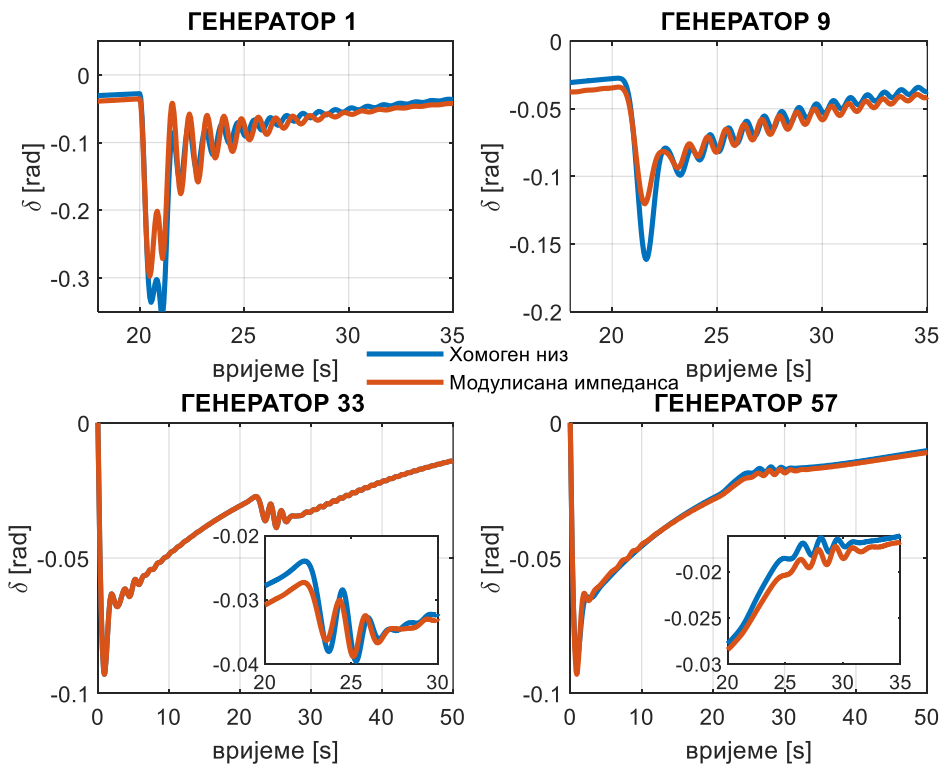
### 3.3 Верификација управљачког закона

Да би се верификовао изнесени закључак везан за могућност потискивања електромеханичког таласа промјеном коефицијента трансмисије таласа формирана је рачунарска симулација на реалистичном тестном систему састављеном из низа генератора, приказаног на сл. 2.6. Једина разлика у односу на претходно описан, хомогени, тестни систем огледа се у промјени редне отпорности и индуктивности надземног вода који спаја сабирнице 2 и 3 код поменутог тестног система. Изабрано је да је да су подужна отпорност и индуктивност овог вода десет пута мање од индуктивности и отпорности свих осталих водова у систему, који су међусобно једнаки. Поремећаји у систему су једнаки су као у претходном поглављу. Резултати рачунарске симулације за овакав сценарио дати су на сл. 3.3. На сл. 3.3 а) приказан је добијени електромеханички талас за хомоген низ, претходно приказан на сл. 2.8 и детаљно дискутован у претходном поглављу. На сл. 3.3 б) приказан је електромеханички талас у случају када се смање редни параметри трећег надземног вода посматраног низа генератора. Поређењем ова два одзива може се закључити да је у случају модификације импедансе једног вода дошло до смањења амплитуде таласа, односно дошло је до потискивања таласа, што потврђује претходно изнесена теоријска очекивања.



Сл. 3.3 – Електромеханички талас добијен помоћу реалистичног тестног система: а) хомоген низ, б) смањена импеданса трећег надземног вода

У сврху детаљније анализе, на сл. 3.4 приказани су одзиви угла оптерећења 1, 9, (почетак низа) 32. (средина низа) и 57. (крај низа) синхроног генератора.



Сл. 3.4 – Одзиви угла оптерећења 1, 9, 33. и 57. генератора за реалистичан тестни систем у случају смањења импедансе трећег надземног вода

Са сл. 3.4 може се уочити да се на 1. и 9. генератору добија значајно смањење осцилација угла оптерећења у случају модификације импедансе вода (црвена боја) у поређењу са случајем када се посматра хомоген низ (плава боја). До извјесног смањења осцилација долази и код генератора на средини и на крају низа што се може уочити на увећаним сегментима на сл. 3.4. На бази спроведених симулација може се закључити да предложени управљачки механизам заиста функционише у складу са теоријским очекивањима. Према томе, сасвим је смислено предложени управљачки закон имплементирати кориштењем UPFC-а, те његов рад тестирати на реалистичном тестном систему.

## 4 УНИФИЦИРАНИ КОТРОЛЕР ТОКОВА СНАГА

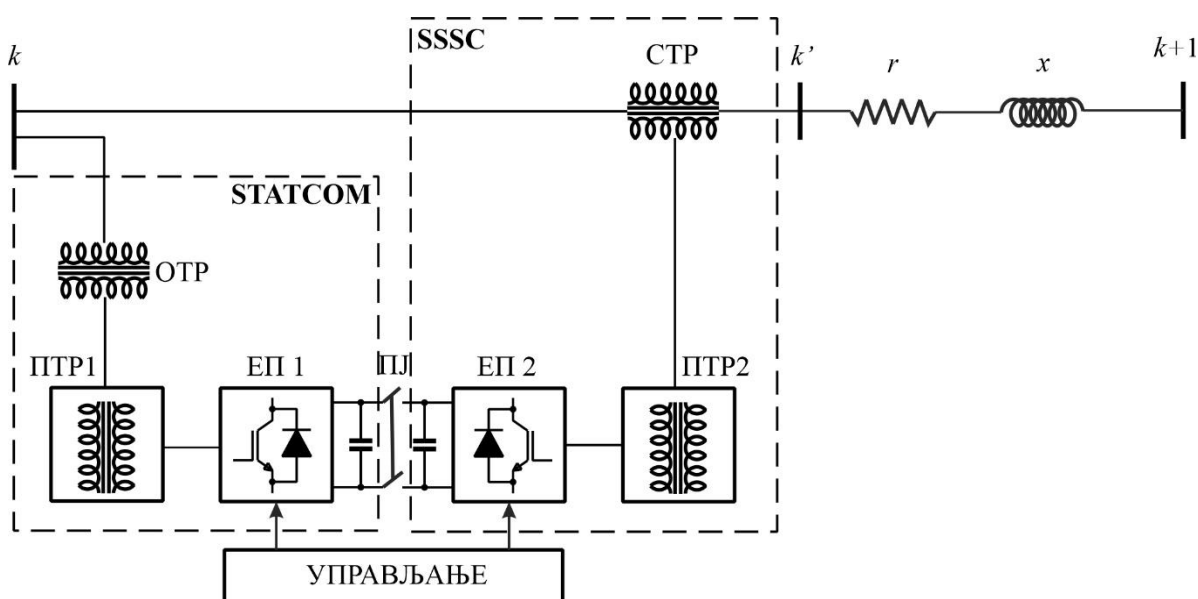
У претходном поглављу дошло се до закључка да је за имплементацију дефинисаног управљачког закона неопходно кориштење UPFC-а. Стога ће се у оквиру овог поглавља посветити пажња конструкцији, математичком моделу, технологији израде, начину употребе и управљачким структурама UPFC-а. Циљ је да се, на основу испитивања детаља израде и функционисања UPFC-а, дође до закључка о могућности имплементације предложеног управљачког закона за сузбијање ширења електромеханичког таласа у реалном системском окружењу. Поред тога, циљ је и да се укаже на комплексност UPFC-а што ће се у наставку користити приликом извођења закључка о практичној употреби овог уређаја за потребе сузбијања ширења електромеханичких таласа. Нарочита пажња посветиће се и испитивању могућности рада UPFC-а у режиму симултаног управљања редном отпорношћу и индуктивношћу вода, као базном принципу на коме је заснован предложени управљачки закон за потискивање електромеханичких таласа.

### 4.1 Топологија и преглед практичне реализације

Унифицирани контролер токова снага представља најсвеобухватнији и најкомпликованији FACTS (енгл. *Flexible Alternating Current Transmission Systems*) уређај. Да би се стекао утисак о комплексности UPFC постројења, у наставку ће бити описана топологија класичног UPFC-а као и начин практичне реализације са акцентом на побољшавање перформанси и смањење цијене постројења увођењем нових технологија израде претварача.

#### 4.1.1 Топологија

У основи, UPFC је серијско – оточни уређај састављен из двије одвојене цјелине (сл. 4.1), чијим повезивањем се добија максимална флексибилност у управљању напонам и токовима снага.



Сл. 4.1 – Основна топологија UPFC-а

Оточни дио је заправо статички компензатор (енгл. *Static Compensator* – *STATCOM*) који се, као самосталан уређај, користи за одржавање напона на сабирницама на које је прикључен, инјектирањем или апсорбовањем реактивне енергије из система. У односу на класичну оточну компензацију, овај уређај има значајно бржи одзив, а његов управљачки систем не допушта додатно инјектирање реактивне снаге у систем када напон сабирница порасте изнад номиналне вриједности што је случај код класичне оточне компензације реактивних снага. Серијски уређај, који је дио UPFC-а, представља статички серијски синхрони компензатор (енгл. *Static Series Synchronous Compensator* – *SSSC*). При самосталном раду, овај уређај има задатак да инјектира напон редно са водом на који је прикључен, при чему је фазни став инјектираног напона у фази или у квадратури са фазном струјом вода, те се на тај начин контролише ток снаге. Евидентно је да се у овом случају утиче на модулацију искључиво редне реактансе вода. Будући да промјена реактансе вода утиче на промјену активне и реактивне снаге, *SSSC* нема могућност да самостално утиче на распрегнуто управљање активном и реактивном снагом. Спајањем једносмјерних кола ова два уређаја, добија се *UPFC* чија је топологија приказана на сл. 4.1 а који има могућност инјектирања серијског напона произвољног фазног става и амплитуде чиме је омогућено независно и распрегнуто управљање токовима активних и реактивних снага.

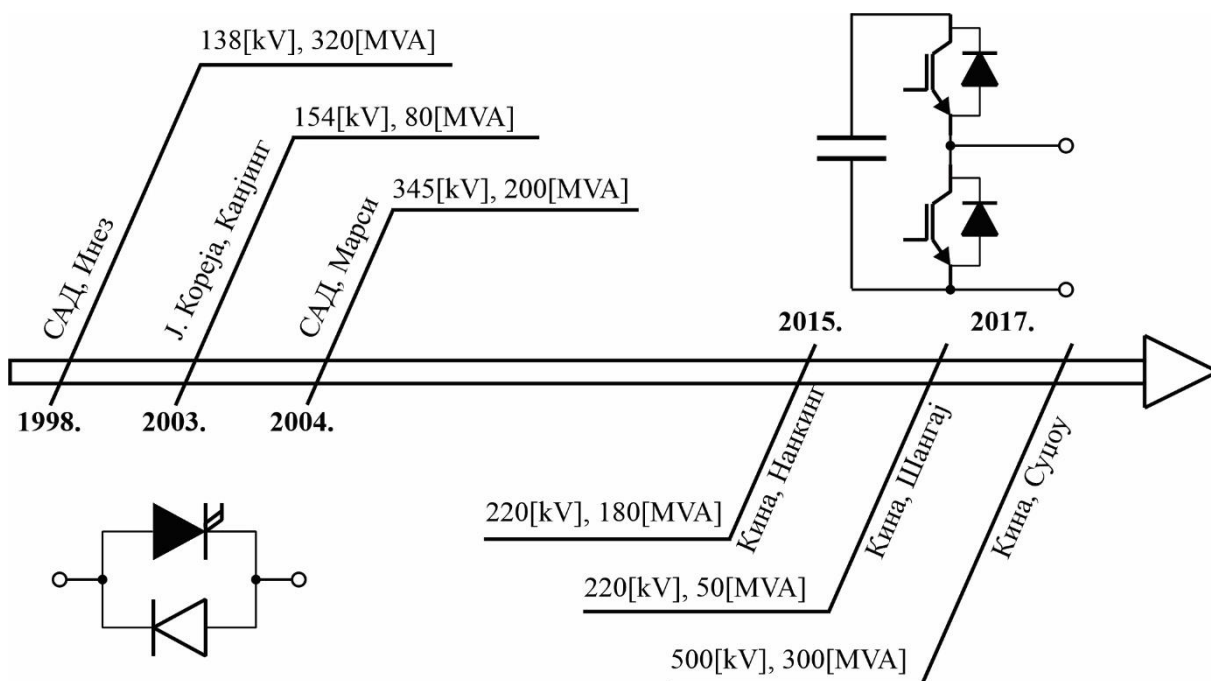
На сл. 4.1, поред енергетских претварача (ЕП1 и ЕП2) и кондензатора у једносмјерном колу, означени су и серијски (СТР) и оточни (ОТР) трансформатори те помоћни трансформатори (ПТР1 и ПТР2). Помоћни трансформатори су опциони. Користе се у случају када је потребно направити одговарајући фазни помјерај код појединих реализација претварача, нпр. код 48 – импулсног претварача реализованог помоћу гејтом управљивих тиристора (енгл. *Gate turn off – GTO*), што ће детаљније бити описано у наставку. Додатно, у једносмјерном колу назначен је прекидач ПЈ. Када је овај прекидач искључен, добија се одвојен рад *SSSC*-а и *STATCOM*-а. Када је прекидач ПЈ укључен, тада се добија топологија *UPFC*-а. Од управљачког система зависи начин рада цјелокупног система. У наставку ће се дати преглед технологије *UPFC*-а што подразумијева осврт на технички аспект практичне реализације уређаја, односно његових саставних компонената.

#### 4.1.2 Преглед технологије реализације претварача

Тренутно у свијету постоји укупно шест унифицираних контролера токова снага који су у употреби. У САД-у постоје у употреби два уређаја. Најстарији уређај инсталиран је 1998. године у трансформаторској станици Инез, на напонском нивоу од 138[kV] номиналне снаге 320[MVA] [72]. Хронолошки гледано, након овог пројекта, у Јужној Кореји 2003. године пуштен је у рад *UPFC* на називном напону од 154[kV], номиналне снаге 80[MVA] [73],[74]. Након тога, инсталиран је и други уређај у САД-у, у трансформаторској станици Марси, на називном напону 345[kV] и називне снаге 200[MVA] [75]. Ова три уређаја одрађена су у блиском временском интервалу, те је технологија израде претварача практично идентична. Стога ће се за ова три уређаја дати детаљнији опис топологије претварача и кориштених компонената.

У временском распону од 2015. до 2017. године, пуштена су у рад још три *UPFC*-а и то сва три у Кини. У мјесту Нанкинг, 2015. године пуштен је у рад *UPFC* на називном напону од 220[kV] називне снаге 180[MVA] [76], [77]. Затим, 2017. године у Шангају, пуштен је у рад уређај на називном напону од 220[kV], номиналне снаге 50[MVA] [78]. Исте године у граду Суцхоу са радом је кренуо *UPFC* на, до сада, највишем називном напону мреже од 500[kV] и номиналне снаге 300[MVA] [16]. Овим је демонстрирано да се примјеном новијих технологија, првенствено са становишта технологије израде

енергетских претварача, могуће савладати веома високе напонске нивое те значајно појефтинити израду комплетног UPFC-а, што је нарочито битно за израду нових UPFC уређаја. На сл. 4.2 дат је хронолошки приказ увођења UPFC-а у електроенергетски систем са основним техничким карактеристикама.



Сл. 4.2 – Хронолошки приказ увођења UPFC-а у електроенергетски систем са локацијом уградње и техничким детаљима

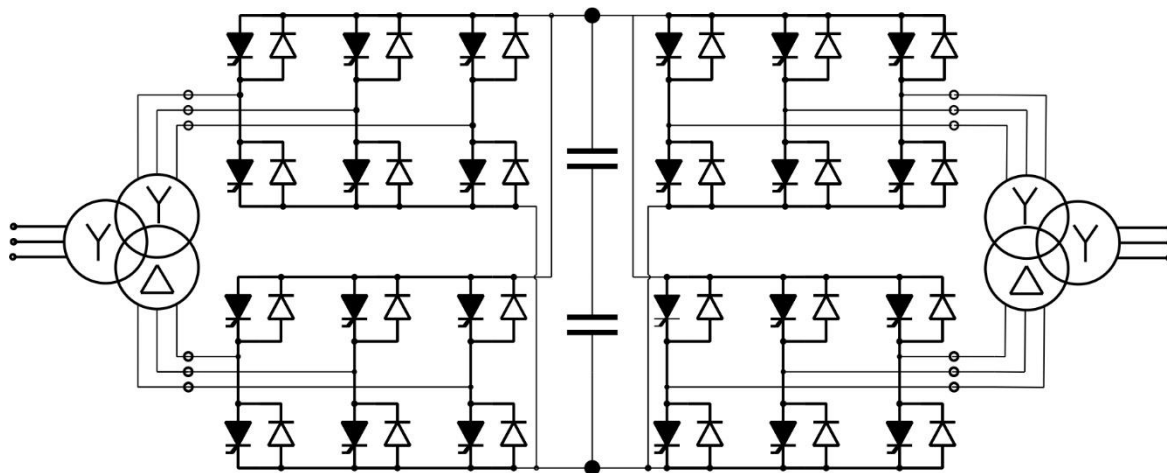
Будући да је за израду уређаја новијег датума, инсталираних у Кини, кориштена другачија технологија израде енергетских претварача, посебно ће се дати увид у ову топологију. Стога ће у наставку бити описане двије типичне технологије израде енергетских претварача које се тренутно користе у свијету. Старија верзија је базирана на гејтом контролисаним тиристорима (енгл. *Gate Turn Off - GTO*) док су је новија технологија базирана на модуларним вишенивовским претварачима (енгл. *Modular Multilevel Converter – MMC*), што је илустровано на сл. 4.2.

#### 4.1.2.1 Енергетски претварачи базирани на тиристорима

Класични тиристори имају могућност укључивања довођењем одговарајућег сигнала на гејт. Њихово искључивање врши се довођењем негативног напона између аноде и катоде, другим ријечима, тренутак искључења не може се дефинисати довођењем импулса на гејт. Као такви нису погодни за рад модерних енергетских претварача, који у сваком тренутку треба да се понашају као идеални прекидачи са могућношћу укључења и искључења у било ком тренутку, независно од поларитета напона. Ту функцију могу да врше гејтом контролисани тиристори (*GTO*) који спадају у групу регенеративних прекидача. Због њихове особине да могу да трпе значајна напонска и струјна напрезања, кориштени су као основна градивна јединица енергетских претварача кориштених за потребе изградње UPFC-а који су пуштени у погон до 2004. године. Класична топологија тзв. *back – to – back* претварача, који се користи као основна функционална јединица UPFC-а а који је заснован на *GTO*, приказана је на сл. 4.3.

Са сл. 4.3 може се уочити да се антипаралелно тиристорима веже диода чији је задатак да обезбједи билатералност прекидача. Будући да тиристори имају могућност да

проводе струју само од аноде ка катоди, да би се обезбједило провођење у супротном смјеру, користе се диоде. Проблем са оваквом топологијом претварача је што је таласност излазног напона значајна, будући да тиристорни немају могућност рада на високим прекидачким учестаностима као што је то случај код претварача базираних на раду транзистора.



Сл. 4.3 – Илустративни приказ 12 – импулсног претварача на бази GTO

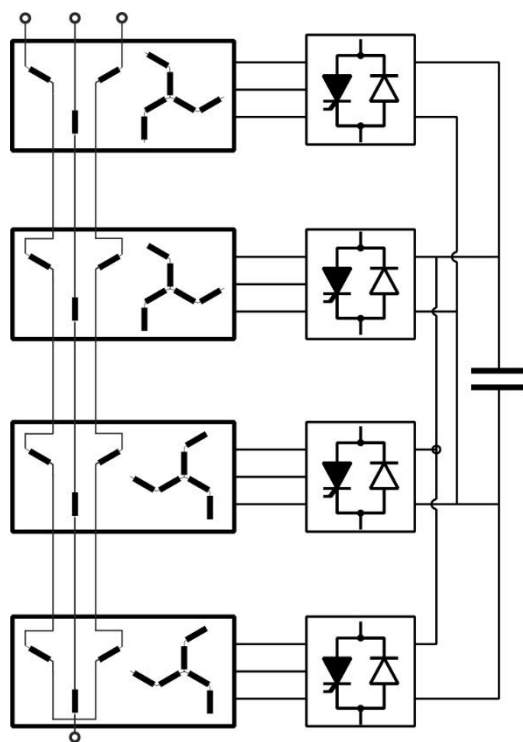
Са друге стране, у оваквој конфигурацији није могуће користити транзисторе као прекидачке компоненте јер немају одговарајуће струјне и напонске карактеристике. Да би се избјегао проблем значајне таласности излазног напона, односно великог процента тоталне хармонијске дисторзије (енгл. *Total Harmonic Distortion – THD*) у излазном напону претварача, при практичној реализацији UPFC-а најчешће се користи 48 – импулсни претварач, за разлику од илустрације на сл. 4.3 гдје је приказан 12 – импулсни претварач. Овај претварач на свом излазу даје наизмјенични напон који се генерише као 48 импулса (степенастих промјена) у току једне периоде. На тај начин се добија значајно мањи садржај виших хармоника у излазном напону, односно вриједност THD је значајно мања, што је веома битно са аспекта рада цјелокупног електроенергетског система. У сврху постизања одговарајућих фазних помјераја, код оваквог типа претварача обично се користе спрежни трансформатори погодних спрега и сатних бројева како би се на излазу генерисао жељени таласни облик напона, што је илустровано и на сл. 4.3. Код комплекснијих претварача, какав је поменути 48 – импулсни претварач, спрежни трансформатори су нарочито компликовани и представљају значајну ставку у укупном трошку изградње UPFC постројења.

Да би се формирао тзв. квази 48 – импулсни претварач, неопходно је користити двије 12 – импулсне јединице, приказане на сл. 4.3. При томе треба водити рачуна да фазни раскорак између импулса треба да буде 15 степени како би се добила 24 импулса на пуној периоди напона. Квази 48 – импулсни претварач подразумијева да се у једносмјерном међуколу користи средња тачка на споју два кондензатора, тако да је могуће користити позитивну, негативну и нулту вриједност једносмјерног напона. Оваква конфигурација претварача је кориштена при конструкцији UPFC-а у Инезу, САД [80]. У овом случају неопходно је обезбједити прилагодни трансформатор специјалне конструкције како би се постигао жељени фазни помјерај од 15 степени. У овом случају се најчешће користи YZ спрега прилагодног трансформатора. Због присуства виших хармоника у излазном наизмјеничном напону претварача, није могуће користити класичну конфигурацију намотаја трансформатора јер би се јављала велика вриједност кружне струје која би значајно утицала на загријавање трансформатора. Стога се за сваки



секундарни намотај трансформатора користи одговарајући примарни намотај при чему се сви примарни намотаји међусобно вежу серијски, у складу са сл. 4.4 [81].

У сврху формирања претварача, за потребе реализације поменутог UPFC-а у Инезу, кориштено је осам GTO тиристора за формирање једног модула, како би се распоредило напонско напрезање компонената. Треба водити рачуна да је уз сваки GTO потребно формирати и тзв. *snubber* коло, које не дозвољава брзу промјену напона на крајевима полупроводничких елемената и представља један вид заштите од склопних пренапона у колима са доминантним индуктивним оптерећењем. Најчешће је то једноставно RC коло. У практичној реализацији кориштени су GTO номиналног напона 4500[V] и номиналне струје 4000[A]. Наравно, претварачи ових снага морају да посједују одговарајуће хлађење, које је у конкретном случају изведено кориштењем воде као расхладног флуида. Прекидачке учестаности при раду са овако великим снагама и при високим једносмјерним напона, не могу да буду нарочито велике. У конкретном случају, прекидачка учестаност износи 60[Hz] [80].



Сл. 4.4 – Конструкција прилагодног трансформатора за потребе формирања 48 – импулсног претварача [81]

Код конструкције претварача за UPFC инсталираног у Јужној Кореји, кориштен је 24 – импулсни претварач, такође са GTO. У овом случају кориштено је пет тиристора за формирање једног модула, док се четири модула користе за формирање једног пола претварача. Кориштени тиристори имају исте струјне и напонске карактеристике као претходно споменути тиристори, кориштени за конструкцију претварача у Инезу [73].

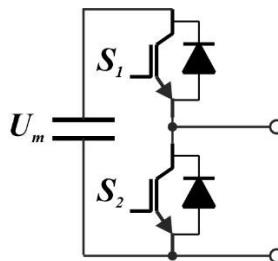
Нарочито интересантна је конструкција претварача у Марсију у САД-у, будући да се, поред UPFC-а, инсталирани уређај може користити и као IPFC (енгл. *Interline Power Flow Controller*). Код овакве конструкције користи се један оточни уређај и два серијска уређаја која се постављају на два далеководна који полазе са посматраних сабирница. На овај начин је могуће независно подешавати токове снага оба вода.

Из изнесеног може се закључити да кориштење GTO у сврху конструисања претварача за потребе UPFC-а захтијева ниске прекидачке учестаности, које заправо представљају мрежне учестаности система [81] и велики број прекидачких елемената који се вежу редно и паралелно како би се смањила струјна и напонска напрезања. Ово поскупљује цјелокупни систем, будући да је за такву конструкцију неопходан већи простор, значајнији расхладни капацитети а утицај ниских прекидачких учестаности доводи до појаве виших хармоника који се не могу једноставно елиминисати, него захтијевају додатне филтре у комбинацији са спрежним трансформаторима за

омогућавање адекватног фазног помјераја. Све ово утиче на веома високу цијену оваквих система што представља најзначајнији разлог зашто се већ двадесет година нису појављивали нигдје у свијету.

#### 4.1.2.2 Енергетски претварачи базирани на вишенивовским претварачима

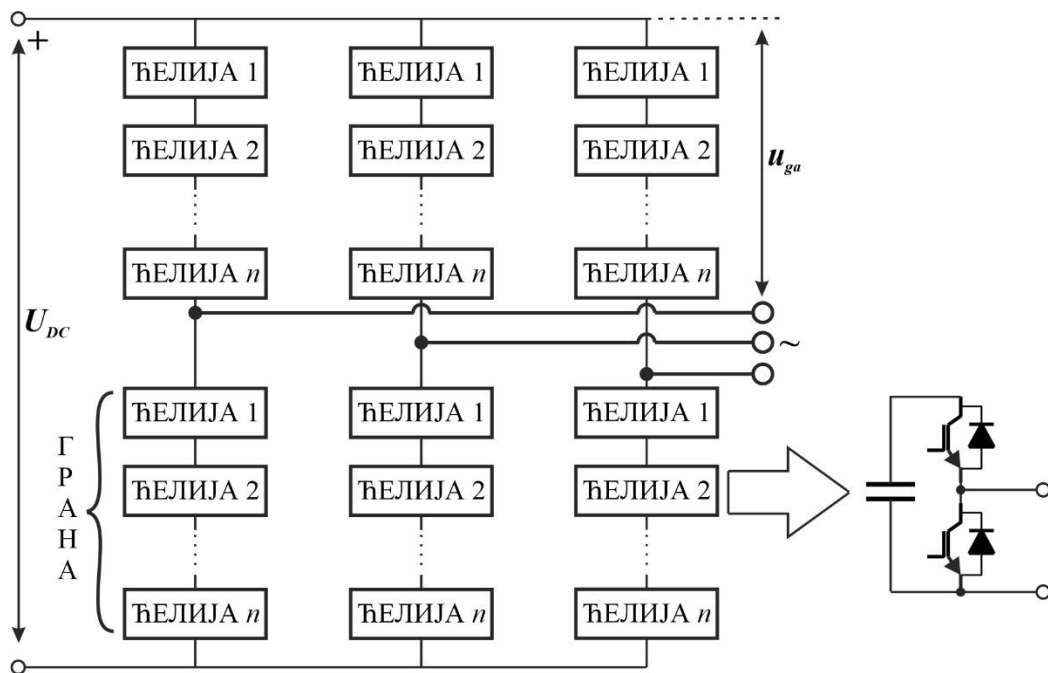
Уређаји новијег датума, инсталирани у Кини, користе вишенивовске модуларне претвараче (енгл. *Modular Multilevel Converter* – MMC). Иако су ови претварачи изворно намијењени употреби при преносу електричне енергије једносмјерном струјом (енгл. *High Voltage Direct Current* – HVDC), брзо се дошло до закључка да их је могуће користити и при раду UPFC-а [82]. Основна градивна јединица ових претварача је IGBT (енгл. *Insulated Gate Bipolar Transistor*). Ови транзистори комбинују добре особине FET (енгл. *Field Effect Transistor*) које се огледају у малој струји гејта која је неопходна за укључивање и искључивање транзистора, и биполарних транзистора, чија је добра особина мали пад напона између емитера и колектора у стању вођења. Као такви, IGBT се намећу као најчешћи избор за конструкцију модерних претварача. У вишенивовској конфигурацији користи се већи број модула. Један модул сачињавају два IGBT са одговарајућим кондензатором, као што је приказано на сл. 4.5.



Сл. 4.5 – Основни модул (ћелија) MMC претварача

Са сл. 4.5 може се видјети да је приказани модул заправо класична полумостна (енгл. *half-bridge*) конфигурација претварача. У општем случају, може се користити и мостна (енгл. *full-bridge*) конфигурација која користи четири транзистора. Принцип рада модула може се описати посматрањем уклопних стања транзистора, које је могуће посматрати као прекидаче  $S_1$  и  $S_2$ . Прекидачи  $S_1$  и  $S_2$  никада не смију бити у укљученом стању истовремено, како не би дошло до кратког споја кондензатора. Када је  $S_1$  укључен, тада је цијели модул укључен, те је напон који се просљеђује ка наредном модулу једнак напону између прикључака модула који је заправо напон на кондензатору  $U_m$ . Када је прекидач (транзистор)  $S_2$  укључен, цијели модул је искључен. У том случају напон између прикључака модула, а уједно и напон који се просљеђује ка наредном модулу, једнак је нули [83].

Да би се формирао претварач, користи се већи број модула везаних серијски. Оваква конфигурација претварача приказана је на сл. 4.6. Са сл. 4.6 може се уочити да је максималан напон једне гране  $u_{ga}$  једнак прозиводу броја кориштених модула и напона кондензатора сваког појединачног модула. Најчешће су напони на свим кондензаторима свих модула приближно једнаки. Уколико се у једној грани претварача користи  $n$  модула, тада излазни наизмјенични има укупно  $n+1$  напонски импулс. Уколико се користи већи број модула, могуће је смањивати прекидачке фреквенције цјелокупног система, те се на тај начин оптимизују прекидачки губици [83].



Сл. 4.6 – Основни модул (ћелија) ММС претварача [81]

У граду Нанкинг, инсталирани UPFC користи топологију претварача као на сл. 4.6. У конкретној реализацији кориштено је 26 модула по једној грани претварача. Номинална једносмјерна струја износи 1000[A], напон једносмјерног кола једнак 20[kV] док номинална снага износи 60[MVA]. Укупно се користе три претварача који су прикључени на заједничко једносмјерно коло, јер постоје два вода на којима се инјектира серијски напон [77].

При конструкцији UPFC-а у Шангају, кориштена је иста топологија претварача са једнаким бројем модула по грани. У овом случају су кориштени IGBT номиналне струје 1500[A] и номиналног напона 3300[V].

Код конструкције UPFC-а у Судоу, напонски ниво од 500[kV] захтијевао је да се користи напон једносмјерног кола од 90[kV] што је условило кориштење значјно већег броја модула по грани претварача, иако је топологија претварача иста као код два претходно наведена пројекта.

Треба имати у виду да се у оваквим реализацијама претварача може користити класична импулсно ширинска модулација (енгл. *Pulse Width Modulation* – PWM) односно модулација просторног вектора напона (енгл. *Space Vector Modulation* – SVM), тако да се могу користити значајно веће прекидачке учестаности него што је то случај код претварача са GTO тиристорима. Често се прекидачка учестаност код ових претварача креће око 1024[Hz] [84]. Додатна предност ММС топологије је избегавање кориштења спрежних трансформатора што увелико поједностављује систем и смањује укупну цијену. То су све разлози због којих се данас ова топологија претварача доминантно користи за изградњу UPFC-а и наговјештава могућност њихове шире примјене у догледном времену.

#### 4.1.3 Реализација трансформатора

За потребе повезивања UPFC-а са електроенергетским системом користе се енергетски трансформатори, јер би рад уређаја енергетске електронике на називним напонима преносних мрежа био практично немогућ. Најмање су потребна два

трансформатора. Један служи за повезивање оточног дијела UPFC-а (оточни трансформатор) са мрежом док се други трансформатор користи за повезивање серијског уређаја UPFC-а (серијски трансформатор) са надземним водом. Наведена два трансформатора приказана су на сл. 4.1 гдје је оточни трансформатор означен са ОТР а серијски са СТР. У наставку ће се укратко описати специфичности конструкције наведених трансформатора у циљу давања опште слике о комплексности UPFC постројења.

#### 4.1.3.1 Оточни трансформатор

Оточни трансформатор има задатак да напон мреже на коју се прикључује UPFC снизи на напон потребан за рад претварача, усклађен са називним једносмјерним напоном UPFC-а. Практично гледано, овај трансформатор је класични уљни, двонамотни енергетски трансформатор. Преносни однос је фиксан, односно нема могућност регулације. У неким случајевима, овај трансформатор се пројектује као тронамотни трансформатор, с тим што се намотаји терцијера класично спрежу у троугао у сврху затварања струја хармоника реда  $3k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ). Ово је случај код конструкције оточног трансформатора у Марсију у САД-у [81]. Називна снага трансформатора треба да одговара укупној снази којом је потребно да паралелни уређај опскрби серијске уређаје. У општем случају, могу постојати два или више серијских претварача који се напајају преко једног оточног трансформатора. Стога снагу трансформатора треба димензионисати на основу укупних потреба а не на основу снага појединих претварача.

Веома битна ставка при пројектовању трансформатора је и координација изолације. У пројекту изградње UPFC-а у граду Суцоу одређено је да изолација оточног трансформатора треба да буде пројектована тако да трајно може да поднесе преоптерећење од 20% [85].

У самом постројењу, трансформатор се налази изван зграде постројења, а често се користе и два оточна трансформатора при чему је један радни а други резервни, односно не користе се у паралелном раду.

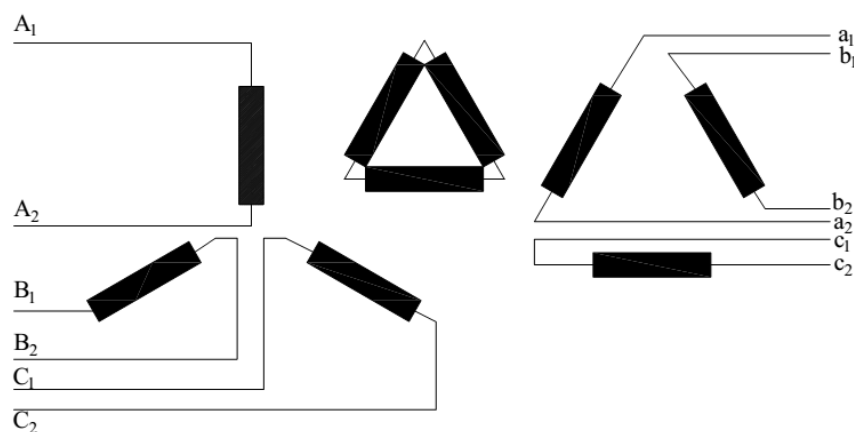
#### 4.1.3.2 Серијски трансформатор

Конструкција серијског трансформатора је значајно компликованија од конструкције оточног трансформатора. У овом случају потребно је намотаје примара пројектовати тако да поред нормалних, радних струја вода, треба краткотрајно да трпе и струје квара које се могу јавити у случају кварова на воду. Ово може да изазове засићење магнетног кола трансформатора, што може даље изазвати додатне негативне посљедице на сам рад трансформатора. Стога је неопходно користити прекидач за премоштавање (енгл. *bypass*) намотаја трансформатора који се редно вежу са водом односно паралелно са намотајем трансформатора. У случају појаве струја квара, овај прекидач треба да одреагује веома брзо како би струје квара што краће текле кроз намотаје трансформатора. Када струје квара протичу кроз намотаје трансформатора, оне се пресликавају на секундарну страну која је у директној вези са енергетским претварачем. Стога се и на секундар постављају тиристорски прекидачи (енгл. *Thyristor Bypass Switch* – TBS) који имају задатак да у што краћем времену преусмјере струје квара ка земљи. У случају да ове струје теку кроз претварач, може доћи до допуњавања кондензатора у једносмјерном колу и чак до појаве пренапона. Чак и када се користе брзи прекидачи, није могуће одмах при појави квара омогућити укључивање, а самим тим избјегавање негативних посљедица, стога је потребно серијски трансформатор пројектовати тако да издржи струје квара бар неколико периода основног хармоника наизмјеничне мреже. Дакле, овај

трансформатор треба пројектовати тако да издржи краткотрајне електродинамичке силе које настају у случају кварова у систему.

Сама конструкција намотаја серијског трансформатора није идентична конструкцији типичних енергетских трансформатора. Наиме, код серијског трансформатора потребно је обезбједити равномјерно напрезање изолације дуж цијелог намотаја, за разлику од класичног енергетског трансформатора код кога се степен изолације смањује при крају намотаја, будући да на почетку намотаја влада највиши напон. Услјед овога, значајна пажња треба да се посвети међузавојној изолацији примарних намотаја серијског трансформатора. Будући да се намотаји трансформатора налазе серијски везани са водом, треба узети у обзир и пренапоне који су последица атмосферских пражњења који могу да оштете изолацију примарних намотаја. Стога, оба краја намотаја треба да имају исти степен изолације. Услјед овога неопходно је да се користе одводници пренапона према земљи, са обје стране (и примар и секундар) али и одводници пренапона паралелно са намотајима како би се заштитила међузавојна изолација у случају појаве атмосферског пренапонског таласа.

Класична топологија намотаја серијског трансформатора приказана је на сл. 4.7. Са сл. 4.7 може се уочити да су високонапонски намотаји спрегнути у спрегу звијезда, док су нисконапонски спрегнути у троугао. Додатно, трансформатор посједује и терцијерни намот где су намотаји спрегнути у троугао, у коме се затварају хармоници струје реда  $3k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ).



Сл. 4.7 – Типична топологија серијског намотаја UPFC-a [72]

На сл. 4.7 великим латиничним словима су означени високонапонски прикључци трансформатора који се вежу серијски са водом. Малим латиничним словима означени су прикључци на секундарној страни при чему је могуће почетке намотаја водити директно на претварач а крајеве на спрежни трансформатор уколико то захтијева топологија претварача.

Серијски трансформатор се такође смјешта ван зграде постројења. Радно коло трансформатора се потапа у трансформаторско уље, као и код класичних енергетских трансформатора. Хлађење се изводи кориштењем пумпи за циркулацију уља те кориштењем додатних вентилатора, односно најчешће се користи OFAF (енгл. *Oil Forced Air Forced*) начин хлађења. Ови трансформатори се углавном не праве у пару, него се користи само један јер је цијена израде оваквих уређаја значајно утиче на цијену цјелокупног UPFC система.

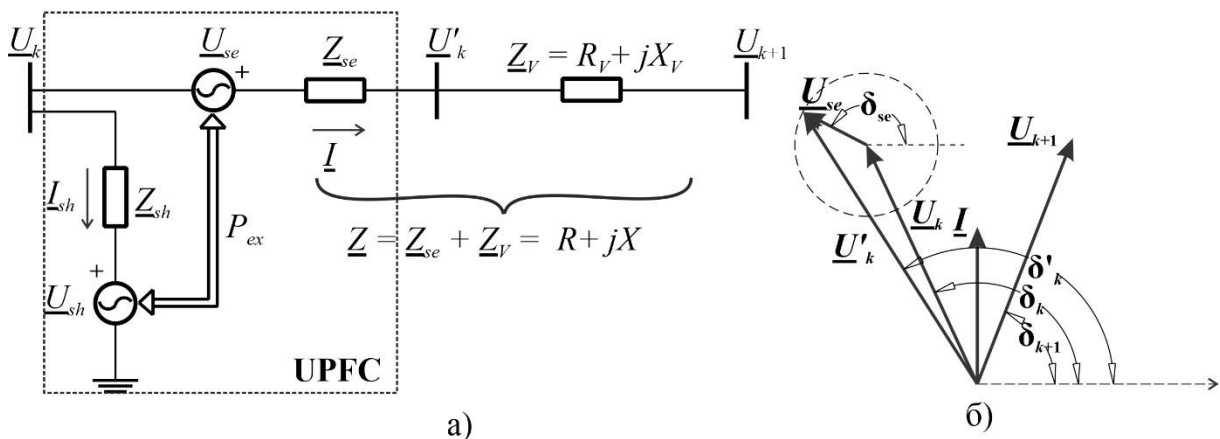
Иако постоји идеја да се конструише UPFC без кориштења трансформатора, чији је рад базиран на ММС топологији претварача, при чему се као основни модул користи мостни претварач, за разлику од тренутно кориштених полумостних, осим лабораторијских узорака, овај пројекат још није развијен у пракси. Још увијек практично нису испитане могућност директне примјене ове технологије на називним напонима преносних мрежа. Према тренутним анализама, оваква конструкција UPFC-а би значајно поједноставила и појевтинила процес производње и пуштања у рад овог уређаја [86].

На основу претходно изложеног може се несумњиво закључити да је UPFC комплексан систем који захтијева значајне материјално – техничке али и људске ресурсе за изградњу, управљање и одржавање. Ово треба имати у виду приликом интеграције управљачког система за сузбијање ширења електромеханичких таласа у постојеће управљачке функције UPFC-а. Нове технологије израде енергетских претварача и настојања да се спржни трансформатори потпуно избаце из топологије UPFC-а доприносе значајном смањењу цијене изградње комплетног система, што може да резултује широм употребном овог уређаја у будућности.

У наставку ће пажња бити посвећена извођењу математичког модела UPFC-а као и прегледу постојећих управљачких алгоритама за управљање токовима снага као и за смањење осцилација активних снага употребом UPFC-а. Циљ ове анализе јесте да се идентификују погодан начин за интеграцију предложеног управљачког алгорита за потискивање таласа са постојећим управљачким структурама UPFC-а. Поред тога, на бази досадашњег искуства у кориштењу UPFC-а за потребе смањења осцилација активне снаге, потребно је доћи до закључка о структури управљачког система за потискивање електромеханичких таласа.

## 4.2 Математички модел

Математички модел UPFC-а могуће је извести на основу еквивалентне шеме приказане на сл. 4.8а. Додатно, на сл. 4.8б приказан је и одговарајући фазорски дијаграм.



Сл. 4.8 – а) Еквивалентна шема UPFC-а, б) Одговарајући фазорски дијаграм

На сл. 4.8 са  $U_{se}$  означен је фазор серијског напона, који генерише SSSC, док је са  $U_{sh}$  означен фазор напона који генерише STATCOM а са  $P_{ex}$  означена је активна снага које се размјеђује између два претварача. Са  $Z$  је означена укупна, еквивалентна, импеданса која представља збир импедансе вода  $Z_V$  и серијског трансформатора  $Z_{se}$ , док је са  $Z_{sh}$  означена укупна оточна импеданса STATCOM-а. Са  $I$  је означена укупна струја вода док је

са  $I_{sh}$  означена струја STACOM-а. Функционисање UPFC-а се може сажети у следећем. Помоћу STACOM-а обезбјеђује се активна снага  $P_{ex}$  која се путем једносмјерног међукола и енергетских претварача преноси до SSSC-а а путем серијског трансформатора инјектира у систем. Потребна реактивна снага генерише се локално. Другим ријечима, сваки претварач генерише потребну количину реактивне енергије локално, будући да кроз једносмјерно коло не може да се преноси реактивна снага. Оточни уређај врши апсорпцију или генерисање реактивне енергије како би одржао модуо напона  $\underline{U}_k$  на сабирницама  $k$  на жељеној вриједности. Често се каже да оточни уређај ради са јединичним фактором снаге (енгл. *unity power factor*), будући да се од њега често захтијева само да серијски уређај опскрбљује неопходном активном снагом, па отуда и потиче назив UPFC-а. Серијски уређај врши контролу тока активне и реактивне енергије тако да одговарајуће снаге на воду прате претходно задате референтне вриједности снага. Контрола инјектирања активне и реактивне енергије у систем помоћу SSSC-а врши се контролом фазора напона  $\underline{U}_{se}$  који је серијски везан са надземним водом. Ово је приказано на фазорском дијаграму на сл. 4.8.б. Са сл. 4.8.б може се уочити да је модификовани фазор напона на предајном крају вода  $\underline{U}'_k$  једнак векторском збиру напона на сабирницама  $\underline{U}_k$  и серијски инјектираног напона  $\underline{U}_{se}$  односно вриједи  $\underline{U}'_k = \underline{U}_k + \underline{U}_{se}$ . Будући да је серијски инјектирани фазор напона  $\underline{U}_{se}$  могуће мијењати по амплитуди од нулте вриједности до максималне вриједности  $\underline{U}_{se}^m$ , а при томе је фазни став овог напона  $\delta_{se}$  могуће мијењати у опсегу од нуле до  $2\pi$ , може се извести закључак да UPFC има могућност независног управљања токовима активне и реактивне снаге на воду, а самим тим има могућност да врши прерасподјелу снага у мрежи. Ово се може показати и математички.

Привидна снага на предајном крају вода са сл. 4.8а може се добити као

$$\underline{S}_k = \underline{U}'_k \underline{I}_k^* = \underline{U}'_k \left( \frac{\underline{U}'_k - \underline{U}_{k+1}}{\underline{Z}} \right)^* \quad (4.1)$$

На основу фазорског дијаграма са сл. 4.8б, закључујемо да важи

$$\underline{U}_k = U_k e^{j\delta_k}, \quad \underline{U}_{k+1} = U_{k+1} e^{j\delta_{k+1}}, \quad \underline{U}_{se} = U_{se} e^{j\delta_{se}}. \quad (4.2)$$

Уврштавањем једначине (4.2) у једначину (4.1), уз услов да је  $\underline{U}'_k = U'_k e^{j\delta_k} + U_{se} e^{j\delta_{se}}$ , једначина (4.1) постаје

$$\underline{S}_k = \frac{U_k'^2}{R - jX} - \frac{U_k U_{k+1} e^{j(\delta_k - \delta_{k+1})} + U_{k+1} U_{se} e^{j(\delta_{se} - \delta_{k+1})}}{R - jX}. \quad (4.3)$$

Рационализацијом израза (4.3) и записом комплексног броја у Ојлеровом облику, добија се

$$\begin{aligned} \underline{S}_k = & \frac{U_k'^2 R}{R^2 + X^2} + j \frac{U_k'^2 X}{R^2 + X^2} - \frac{U_k U_{k+1} [\cos(\delta) + j \sin(\delta)]}{R^2 + X^2} R - \\ & - \frac{U_k U_{k+1} [\cos(\delta) + j \sin(\delta)]}{R^2 + X^2} jX - \frac{U_{se} U_{k+1} [\cos(\delta') + j \sin(\delta')]}{R^2 + X^2} R - \\ & - \frac{U_{se} U_{k+1} [\cos(\delta') + j \sin(\delta')]}{R^2 + X^2} jX. \end{aligned} \quad (4.4)$$

У једначини (4.4) важи  $\delta = \delta_k - \delta_{k+1}$ ,  $\delta' = \delta_{se} - \delta_{k+1}$ . Да би се поједноставила једначина (4.4), могуће је претпоставити да вриједи  $R \ll X$ . Оваква претпоставка има смисла у преносним мрежама. Односно, што је напонски ниво виши, однос  $R/X$  је мањи, па је уведена претпоставка тиме оправданија. Конкретно, за напонски ниво од 110[kV] однос  $R/X$  износи приближно 1/2, за напонски ниво од 220[kV] тај однос је приближно 1/4, док је у преносним мрежама напонског нивоа 400[kV] овај однос значајано мањи и износи 1/11 [69]. На основу претходно изнесеног, могуће је у једначини (4.4) занемарити активну отпорност  $R$ . Након тога, раздвајањем имагинарног и реалног дијела, добијају се изрази за активну и реактивну снагу на посматраном воду у присуству UPFC-а, који су дати једначинама (4.5) и (4.6) респективно.

$$P = \frac{U_k U_{k+1}}{X} \sin(\delta) + \frac{U_{se} U_{k+1}}{X} \sin(\delta') = f(U_{se}, \delta_{se}). \quad (4.5)$$

$$Q = \frac{U_k^2}{X} - \frac{U_k U_{k+1}}{X} \cos(\delta) - \frac{U_{se} U_{k+1}}{X} \cos(\delta') = f(U_{se}, \delta_{se}). \quad (4.6)$$

Из једначина (4.5) и (4.6) може се закључити да се промјеном амплитуде и фазног става серијски инјектираног напона  $U_{se}$  може директно утицати на токове активне и реактивне снаге на воду. Битно је примјетити да активна снага значајно зависи од промјене фазног става  $\delta'$ , односно да се на промјену активне снаге доминантно утиче промјеном фазног става  $\delta_{se}$  серијски инјектираног напона. Са друге стране, израз за реактивну снагу (4.6) највише зависи од модула инјектираног напона  $U_{se}$ . Према томе, контролу тока активне снаге могуће је постићи адекватном промјеном фазног става  $\delta_{se}$ , док се контрола тока реактивне снаге врши промјеном модула серијски инјектираног напона  $U_{se}$ . Задатак управљачког система је да на основу задатих, жељених, вриједности активне и реактивне снаге које је потребно пренијети водом, одреди параметре фазора серијски инјектираног напона  $U_{se}$ . Овај посао могуће је одрадити кориштењем већег броја различитих управљачких алгоритама који ће у наставку бити детаљније разматрани.

Да би се постигао произвољан фазни став серијски инјектираног напона, неопходно је да се серијски уређај (STATCOM) опскрби потребном количином активне снаге. Уколико би прекидач у једносмјерном колу ПЈ на сл. 4.1 био искључен, тада серијски уређај не би био у стању да врши потпуну контролу токова снага, будући да не би био у стању да генерише фазор серијски инјектираног напона произвољног фазног става. У овом случају би се генерисао фазор напона  $U_{se}$  који фазно предњачи или фазно касни у односу на фазну струју вода за  $\pi/2$ . Другим ријечима, генерисани фазор напона био би у квадратури са фазном струјом вода. У том случају би се UPFC користио само као SSSC и био би способан да утиче искључиво на промјену реактансе вода.

Активна снага размјене између серијског и оточног уређаја може се одредити из једначине

$$P_{ex} = P_{sh} - P_{se} = i_c u_{DC} = u_{DC} C \frac{du_{DC}}{dt} \quad (4.7)$$

гдје је са  $P_{sh}$  означена активна снага оточног уређаја а са  $P_{se}$  активна снага серијског уређаја, при чему је са  $i_c$  означена струја кондензатора а  $u_{DC}$  напон једносмјерног међукола.



Одговарајуће активне и реактивне снаге оточног уређаја могу се добити полазећи од једначине

$$\underline{S}_{sh} = \underline{U}_k \underline{I}_{sh}^* = \underline{U}_k \left( \frac{\underline{U}_k - \underline{U}_{sh}}{\underline{Z}_{sh}} \right)^* \quad (4.8)$$

Даљим развојем једначине (4.8) добија се израз

$$\underline{S}_{sh} = \frac{U_k^2 (R_{sh} + jX_{sh})}{R_{sh}^2 + X_{sh}^2} - \frac{U_k U_{sh} [\cos(\delta_k - \delta_{sh}) + j \sin(\delta_k - \delta_{sh})]}{R_{sh}^2 + X_{sh}^2} (R_{sh} + jX_{sh}). \quad (4.9)$$

Уколико се занемаре активна отпорност  $R_{sh}$  оточног уређаја<sup>1</sup>, те се изврши раздвајање реалног и имагинарног дијела, одговарајуће активне и реактивне снаге оточног уређаја дате су једначинама (4.10) и (4.11) респективно.

$$P_{sh} = \frac{U_k U_{sh}}{X_{sh}} \sin(\delta_k - \delta_{sh}) \quad (4.10)$$

$$Q_{sh} = \frac{U_k^2}{X_{sh}} - \frac{U_k U_{sh}}{X_{sh}} \cos(\delta_k - \delta_{sh}) \quad (4.11)$$

Аналогним поступком могуће је доћи до једначина за активну и реактивну снагу серијског уређаја. Уколико се крене од једначине за комплексну привидну снагу дате са

$$\underline{S}_{se} = \underline{U}_{se} \underline{I}^* = \underline{U}_{se} \left( \frac{\underline{U}_k + \underline{U}_{se} - \underline{U}_{k+1}}{\underline{Z}} \right)^* \quad (4.12)$$

Даљим сређивањем једначине (4.12) добија се

$$\underline{S}_{se} = \frac{U_{se}^2 (R + jX)}{R^2 + X^2} + \frac{U_k U_{se} [\cos(\delta_k - \delta_{se}) + j \sin(\delta_k - \delta_{se})]}{R^2 + X^2} (R + jX) - \frac{U_{k+1} U_{se} [\cos(\delta') + j \sin(\delta')]}{R^2 + X^2} (R + jX). \quad (4.13)$$

Занемаривањем активне отпорности  $R$  у изразу (2.28) из претходно објашњених разлога, добијају се изрази за активну и реактивну снагу серијског уређаја који су дати једначина (4.14) и (4.15), респективно.

$$P_{se} = -\frac{U_k U_{se}}{X} \sin(\delta_{se} - \delta_k) + \frac{U_{k+1} U_{se}}{X} \sin(\delta') \quad (4.14)$$

$$Q_{se} = \frac{U_{se}^2}{X} - \frac{U_k U_{se}}{X} \cos(\delta_{se} - \delta_k) + \frac{U_{k+1} U_{se}}{X} \cos(\delta') \quad (4.15)$$

<sup>1</sup> Потребно је уочити да импедансу оточног уређаја доминантно сачињава редна импеданса оточног трансформатора. Будући да је овај трансформатор по конструкцији исти као класични енергетски трансформатор, реактанса је доминантна у односу на активну отпорност, што је нарочито изражено на вишим напонским нивоима. Стога је занемарење активне отпорности оправдано.

Комбиновањем једначина (4.7), (4.10) и (4.14) одређује се снага размјене између два претварача и напон једносмјерног кола. Задатак управљачког система је да помоћу оточног уређаја одржава напон једносмјерног кола на константној вриједности балансирањем захтјева за потребном активном снагом и стварном достављеном активном снагом која се предаје серијском уређају.

Други задатак оточног уређаја је да обезбједи константан модуло напона на сабирницама  $k$ . Овај задатак могуће је испунити адекватном промјеном модула напона  $U_{sh}$  оточног уређаја. Наиме, ако се претпостави да вриједи  $U_k \approx U_{sh}$  и  $\delta_k \approx \delta_{sh}$ , тада је вриједност реактивне снаге  $Q_{sh}$  коју оточни уређај треба да инјектира у систем приближно једнака нули, сходно једначини (4.11). Ако даље претпоставимо да је  $\delta_k \approx \delta_{sh}$ , те да је модуло напона на сабирницама  $U_k$  мањи од модула напона оточног уређаја  $U_{sh}$  тј.  $U_k < U_{sh}$ , да би се успоставио баланс, потребно је да се повећа напон  $U_{sh}$ , односно да се инјектира реактивна снага у систем како се поправио модуло напона. Према томе, може се закључити да се промјеном модула напона оточног уређаја директно утиче на модуло напона на посматраним сабирницама.

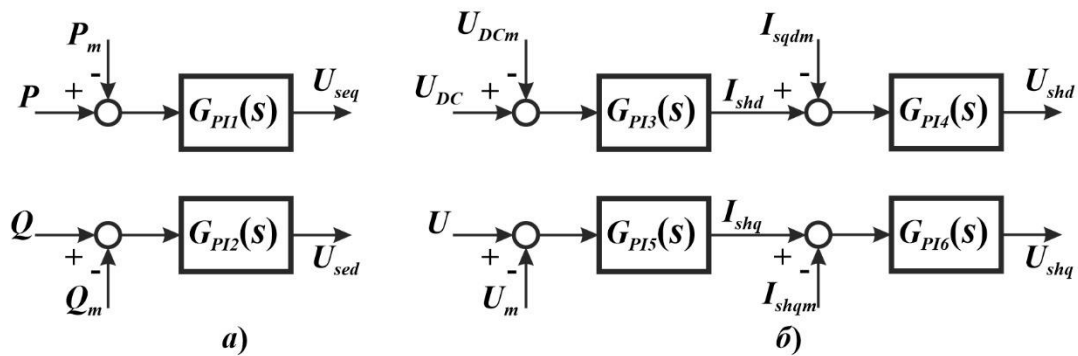
Математички модел UPFC-а дат је једначинама од (4.1) до (4.15) и представља основу за проучавање управљачких система за контролу рада уређаја како у режиму одржавања константних снага на воду и напона на сабирницама тако и у режиму смањења осцилација активне снаге. Будући да је крајњи циљ овог рада употреба UPFC-а у сврху сузбијања ширења електромеханичких таласа који се манифестују као осцилације угла оптерећења синхроних генератора, у наставку ће се дати преглед постојећих алгоритама за управљање радом UPFC-а са акцентом на управљачке системе задужене за смањење осцилација активне снаге. Циљ је да се дође до закључка о ефикасности постојећих система те могућности њихове пренамјене у сврху остваривања претходно дефинисаног управљачког закона за потребе потискивања таласа.

### 4.3 Преглед управљачких система

Да би се правилно пројектовао управљачки систем UPFC-а задужен за сузбијање ширења таласа, неопходно је на прегледан начин приказати постојеће управљачке системе UPFC-а који се користе за контролу токова снага и за ублажавање осцилација активне снаге. Будући да је циљ да се предложени управљачки механизам за сузбијање ширења електромеханичких таласа инкорпорира у постојеће управљачке системе, стога је неопходно добро познавање њихове структуре и принципа рада. Због тога ће се у наставку дати преглед типичних управљачких структура UPFC-а како за контролу управљања токовима снага, тако и за смањење осцилација активне снаге у електроенергетском систему.

#### 4.3.1 Управљачки систему за контролу токова снага

Као што је раније речено, основна намјена UPFC-а јесте контрола токова активне и реактивне снаге на надземном воду на коме је прикључен. Индиректно се на тај начин утиче и на прерасподјелу снага у остатку система. С тим у вези, основни управљачки алгоритам UPFC-а за контролу токова снага дат је на сл. 4.9.

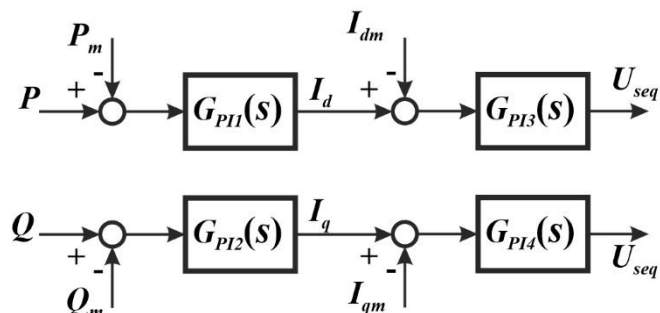


Сл. 4.9 – Основни управљачки систем UPFC-а за контролу токова снага: а) за серијски уређај, б) за оточни уређај

Са управљачког блок дијаграма приказаног на сл. 4.9, може се уочити да се серијски уређај користи за контролу токова снага, што је у складу са претходно изнесеним математичким моделом UPFC-а. У основној варијанти користи се повратна спрега по активној и реактивној снази, гдје се референте вриједности активне  $P$  и реактивне  $Q$  снаге, пореде са мјереним вриједностима ових снага  $P_m$  и  $Q_m$ , респективно. Сигнали грешака уводе се у два пропорционално интегрална регулатора (ПИ) који су на сл. 4.9а означени функцијама преноса  $G_{PI1}(s)$  и  $G_{PI2}(s)$ , респективно. Излази ова два ПИ регулатора генеришу жељене вриједности  $q$  и  $d$  компонената серијски инјектираног фазора напона, при чему  $q$  компонента представља имагинарни дио, а  $d$  реални дио овог вектора. Дакле, серијски уређај се користи за контролу токова активне и реактивне снаге, индиректно путем инјектирања одговарајућег вектора серијског напона. Оточни уређај се углавном користи за одржавање константног једносмјерног напона  $U_{DC}$  те одржавање константног напона мреже  $U$  на сабирницама на које је UPFC прикључен. Ова управљачка стратегија реализује се најчешће кориштењем двије повратне спреге, као на сл. 4.9б [87]. Спољашња повратна спрега реализована је поређењем мјереног  $U_{DCm}$  и референтног  $U_{DC}$  напона једносмјерног кола, те поређењем референтног  $U$  и мјереног  $U_m$  напона мреже. Одговарајући сигнали грешке уводе се такође у пропорционално интегралне регулаторе означене функцијама преноса  $G_{PI3}(s)$  и  $G_{PI5}(s)$ , респективно. Излази ова два регулатора генеришу сигнале који су пропорционални  $q$  и  $d$  компоненатама струје оточног уређаја  $I_{sh}$ . Поређењем овако генерисаних референтних вриједности струја оточног уређаја са одговарајућим мјереним компоненатама струја  $I_{shdm}$  и  $I_{shqm}$  формирају се додатна два сигнала грешке који се уводе у ПИ регулаторе означене функцијама преноса  $G_{PI4}(s)$  и  $G_{PI6}(s)$ , на излазу којих се генеришу жељена реална  $U_{shd}$  и имагинарна  $U_{shq}$  компонента вектора оточног напона  $\underline{U}_{sh}$ . На овај начин остварује се управљање напонем мреже и напонем једносмјерног кола индиректно, управљањем вектором оточног напона. Резимирано, може се рећи да управљачки алгоритам са сл. 4.9 обезбјеђује независно управљање активном и реактивном снагом, као и амплитудом напона мреже. Међутим, постоје различите модификације овог, основног, алгоритма у сврху побољшавања перформанси цјелокупног система.

Најчешћа модификација огледа се у додавању још једне повратне спреге код управљања серијским дијелом уређаја. Модификовани управљачки блок дијаграм серијског уређаја приказан је на сл. 4.10. У односу на базну варијанту (сл. 4.9а), управљачки блок дијаграм са сл. 4.10 посједује и додатну повратну спрегу по струји, по угледу на управљачки блок дијаграм за управљање радом оточног уређаја (сл. 4.9б). У овој варијанти користе се и два додатна ПИ регулатора. Разлог увођења додатне повратне спреге по струји оправдан је бољим перформансама цјелокупног система у односу на

базну варијанту. Овај алгоритам је нешто компликованији од претходно описаног будући да користи укупно осам ПИ регулатора за генерисање потребних напона. Може се уочити да оба предложена управљачка система не користе мјерења са пријемног краја вода, тако да управљачки систем ради на бази локално доступних мјерења што поједностављује цијели систем. Међутим, додавање нових ПИ регулатора утиче негативно на стабилност система, будући да смањује укупну фазну резерву система. Стога је неопходно испитати релативну стабилност система са оваквим регулатором како би се утврдила маргина стабилности система.



Сл. 4.10 – Управљачки блок дијаграм серијског дијела UPFC-а са двије повратне спреге

Треба истаћи да је претходно споменути UPFC инсталиран у Кини, у граду Нанкинг базиран на раду управљачког система са по двије повратне спреге код серијског и оточног уређаја у складу са сл. 4.10 и 4.96, респективно [88]. Будући да је практично имплементиран, овај управљачки алгоритам може се сматрати базним за потребе управљања токовима снага помоћу UPFC-а.

Постоје и даље модификације овог алгоритма које предлажу увођење нових повратних веза и повећавање броја каскадно везаних ПИ регулатора [89],[90]. Све модификације тичу се углавном интервенција на управљачкој структури серијског уређаја, док се за управљање оточним уређајем типично користи претходно описани блок дијаграм приказан на сл. 4.96. Једна од додатних модификација серијског управљачког система сугерише коришћење и треће каскадно везане повратне спреге. Осим претходно споменутих повратних спрега по снази и струји, предлаже се и увођење повратне спреге по паду напона на далеководу, који заправо представља разлику напона предајног и пријемног краја вода на који се прикључује UPFC. Кориштењем оваквог серијског управљачког система постиже се већа брзина одзива те се добија одвојено управљање токовима активних и реактивних снага. Да би постигло потпуно распрезање управљања токовима снага додатно се користе и регулатори за распрезање, како промјена референце активне снаге не би утицала на промјену тока реактивне снаге и обрнуто [90]. Увидом у релевантну литературу може се закључити да се код оваквих алгоритама није испитивала апсолутна ни релативна стабилност система. Функционисање UPFC-а са оваквом управљачком стратегијом испитано је на нисконапонском лабораторијском моделу. Добијени резултати говоре да је систем начелно стабилан. Међутим, треба уочити да би за практичну имплементацију било неопходно испитати функционисање оваквог управљачког система у комплексним преносним мрежама, прије свега због питања стабилности. Каскадним везањем већег броја интегратора се смањује фазна резерва система, те систем може да постане нестабилан, што је основни недостатак предложеног алгоритма. Другим ријечима, код оваквих управљачких система неопходно је испитати релативну стабилност система, будући да систем може да буде начелно стабилан али веома близу границе стабилности, тако да би чак и мањи поремећаји систем могли да учине нестабилним.

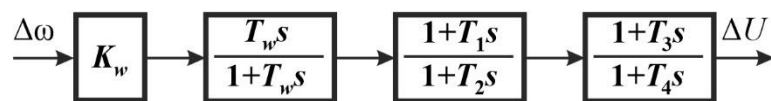
У свим предложеним алгоритмима параметри регулатора су бирани путем покушаја и погрешки, посматрањем одговарајућих одзива система који су од интереса при пројектовању регулатора. У литератури су представљени и други методи за подешавање параметара регулатора. Често се користе хеуристички методи најчешће засновани на еволутивним, генетичким алгоритмима [91], [92]. Као критеријумска функција користи се функција више промјенљивих, при чему је циљ да се минимизује вријеме одзива а неријетко и осцилације активне снаге. Углавном се генетички алгоритми користе за проналажење оптималне локације за UPFC у електроенергетском систему, а рјеђе за подешавање оптималних параметара ПИ регулатора.

Треба нагласити да ће се у овом раду користити базна теорија управљања UPFC-ом, будући да је иста имплементирана у пракси. Додатно, тражење оптималне локације UPFC-а са аспекта потискивања електромеханичког таласа је оправдано. Међутим, треба имати у виду да није природно инсталирати веома скуп и компликован уређај, какав је UPFC искључиво за потребе потискивања таласа. Стога се избор локације UPFC-а готово увијек бира са аспекта најпогодније локације за управљање токовима снага у систему. Циљ овог рада је да се на постојећи UPFC, чија је локација претходно изабрана на основу критеријума оптималног управљања снагама, интегрише предложени управљачки систем за елиминацију електромеханичких таласа.

Поред основне примјене, за контролу токова снага, UPFC се може успјешно користити и за смањење осцилација активне снаге у систему. Преглед управљачких алгоритама који се користе у ову сврху биће приказан у наставку.

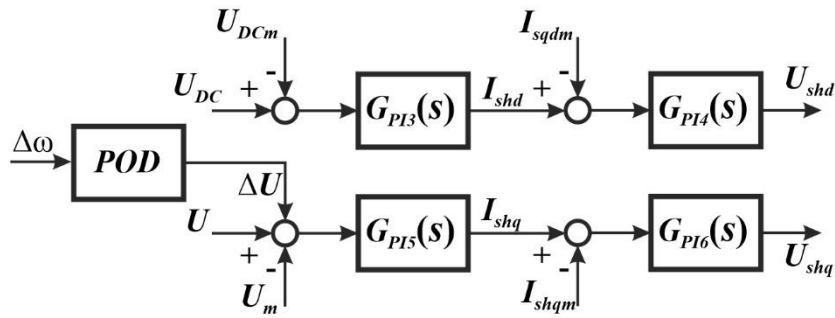
#### 4.3.2 Управљачки системи за смањење осцилација активне снаге

Основни концепт који је развијен у сврху пригушења осцилација активне снаге је тзв. регулатор за пригушење осцилација (енгл. *Power Oscillation Damper – POD*). Овај регулатор базиран је на теорији стабилизатора електроенергетског система (енгл. *Power System Stabilizer – PSS*). Класичан стабилизатор ЕЕС-а као улаз користи промјену кружне учестаности ( $\Delta\omega$ ), промјену угла оптерећења генератора ( $\Delta\delta$ ) или промјену активне снаге ( $\Delta P$ ) а као излаз се генерише сигнал  $\Delta U$  који модулише референцу напона генератора, као што је приказано на сл. 2.4. Најчешће се као стабилишући сигнал користи промјена кружне учестаности  $\Delta\omega$ , а поступак избора овог сигнала детаљно је описан у [93]. Блок дијаграм класичног стабилизатора ЕЕС-а, а самим тим и POD приказан је на сл. 4.11 [67].



Сл. 4.11 – Структура POD регулатора

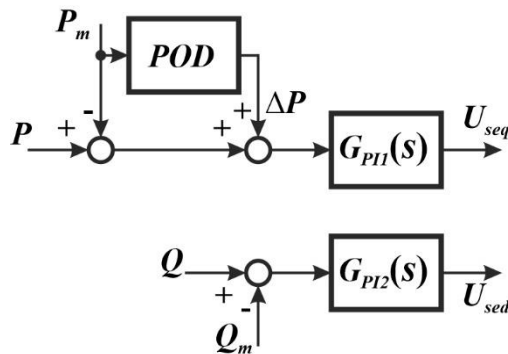
У суштини, класични POD, као и PSS, састоји се од два диференцијална компензатора чије временске константе од  $T_1$  до  $T_4$  је потребно погодно изабрати како би се добила одговарајућа амплитудско – фазна фреквенцијска карактеристика система, те појачање  $K_w$  помоћу кога се подешава пропусни опсег. Циљ је да овај регулатор буде активан само на ниским учестаностима са аспекта радих учестаности електроенергетског система, јер је познато да се у случају поремећаја јављају субсинхроне осцилације у приближном опсегу од 0.2[Hz] до 3[Hz]. С тим у вези потребно је погодно изабрати и временску константну  $T_w$  интегралног члана, чији је задатак да пропусти високе учестаности и да обезбједи нулту грешку стационарног стања. О начину подешавања параметара овог регулатора ће бити више ријечи у наставку рада. Основни концепт интеграције POD регулатора у управљачки систем UPFC-а приказан је на сл. 4.12 [94].



Сл. 4.12 – Управљачки систем дијела оточног дијела UPFC-а за сузбијање осцилација активне снаге

Идеја управљачког система приказаног на сл. 4.12 идентична је идеји класичног стабилизатора електроенергетског система. Циљ је да се генерише стабилизациони сигнал  $\Delta U$  који модулише референтни напонски сигнал  $U$  када дође до поремећаја. Будући да у устаљеном радном режиму нема девијације кружне учестаности, за правилно пројектован POD регулатор стабилизациони сигнал  $\Delta U$  једнак је нули. Када се јави девијација учестаности, што је случај код разних врста поремећаја, регулатор треба да генерише адекватан стабилизациони сигнал како би се елиминисале осцилације активне снаге. Овај начин сузбијања осцилација активне снаге на водовима помоћу UPFC-а кориштен је и практично при реализацији претходно споменутог UPFC-а у граду Нанкингу у Кини [88].

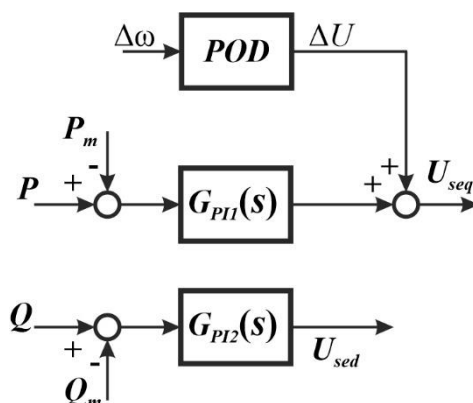
Постоји већи број модификација овог основног концепта потискивања осцилација активне снаге заснованом на POD регулатору. Честа модификација се односи на позиционирање POD регулатора у дио управљачког система серијске гране UPFC-а. Једна од предложених изведби оваквог управљачког система приказана је на сл. 4.13 [95].



Сл. 4.13 – Управљачки систем серијског дијела UPFC-а са POD регулатором базираним на девијацији активне снаге

Верзија управљачког система са сл. 4.13 као улазни сигнал користи мјерену вриједност активне снаге  $P_m$ , умјесто девијације учестаности. На основу овог улазног сигнала генерише се стабилизациони сигнал  $\Delta P$  којим се модулише сигнал грешке активне снаге. У овом случају се стабилизација врши дјеловањем на серијски инјектирани напон, односно његову  $q$  компоненту. Основна идеја је иста као и код управљачког система приказаног на сл. 4.12, а то је да се само у тренуцима поремећаја, односно у транзијентном периоду генерише стабилизациони сигнал који је у противфазу са одговарајућим осцилаторним модом активне снаге, како би резултујућа референца била сигнал без осцилација. Треба нагласити да овакав приступ није практично тестиран.

Постоји и варијанта управљачког система са POD регулатором код кога се стабилишући сигнал сумира са излазом ПИ регулатора, као што је приказано на сл. 4.14 [96].



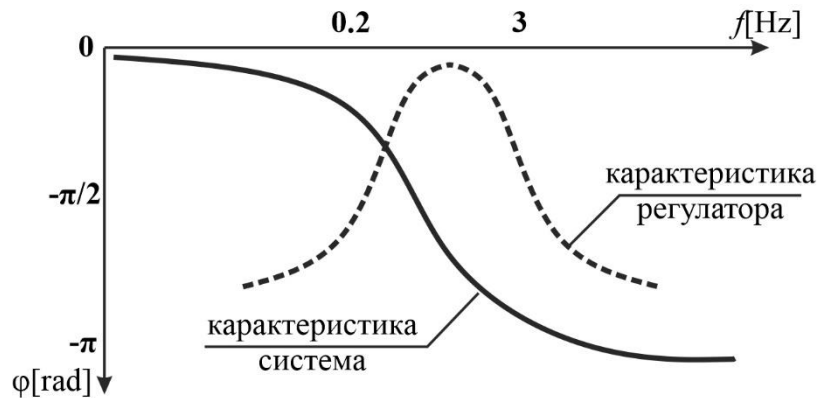
Сл. 4.14 – Управљачки систем серијског дијела UPFC-а са POD регулатором базираним на девијацији кружне учестаности

Код верзије управљачког система приказане на сл. 4.14 као улазни сигнал POD регулатора, интегрисаног у оквиру серијског управљачког система, користи се девијација кружне учестаности у систему, као и код основне варијанте овог управљачког система. Процедура подешавања овако конципираног регулатора аналогна је претходно описаној процедури. Из приложеног је евидентно да је позиционирање POD регулатора у оквиру управљачког система UPFC-а усмјерено на контролу напона на сабирницама или на контролу оног дијела серијског управљачког система који је задужен за управљање током активне снаге, што су рјешења која се намећу и као практичан инжењерски избор у конкретној ситуацији. Предложена рјешења могла би да се искористе за синтезу управљачког система UPFC-а за потребе сузбијања ширења електромеханичких таласа, што ће бити нарочито дискутовано у сљедећем поглављу.

Будући да претходно дискутовани управљачки системи задужени за смањење осцилација активне снаге почивају на раду POD регулатора, а за који се сматра да је веома искористив и за потребе пројектовања управљачког система за потискивање електромеханичких таласа, у наставку ће бити описана процедура подешавања параметара овог регулатора.

#### 4.3.2.1 Подешавање параметара POD регулатора

Под појмом подешавања параметара POD регулатора подразумева се методологија и начин избора временских константни од  $T_1$  до  $T_4$ ,  $T_w$ , као и појачања  $K_w$  регулатора чија је структура приказана на сл. 4.11. Избор параметара регулатора врши се углавном у фреквенцијском домену. У ту сврху потребно је одредити функцију преноса линеаризованог електроенергетског система и то од улаза  $\Delta U$  (инјектирани стабилизациони сигнал) до излаза (одзива) одређеног девијацијом кружне учестаности у систему  $\Delta\omega$ . Након тога могуће је одредити амплитудско – фазну фреквенцијску карактеристику за посматрани дио система. Циљ је да се на учестаности осциловања, која суштински представља субсинхроне осцилације у приближном опсегу од 0.2[Hz] до 3[Hz] изврши поправка фазне карактеристике за приближно  $\pi/2$  правилним избором временских константи од од  $T_1$  до  $T_4$ . Илустрација овог поступка приказана је на сл. 4.15.



Сл. 4.15 – Илустративни приказ фреквенцијске карактеристике дијела ЕЕС-а и POD регулатора

На сл. 4.15 приказана је хипотетичка карактеристика дијела система од улаза  $\Delta U$  до одговарајућег излаза  $\Delta \omega$  те жељена карактеристика POD регулатора у фреквенцијском опсегу од интереса. Циљ је да систем са регулатором у фреквенцијском опсегу од интереса има потпуно компензовану фазну карактеристику. На тај начин би учестаност осцилација излазне величине, у овом случају активне снаге, била блиска нули, односно осцилације би биле потпуно потиснуте. Уколико је фреквенцијска карактеристика дијела система од интереса позната, тада је прилично једноставно изабрати тражене константе од  $T_1$  до  $T_4$  како би се добила жељена карактеристика. Избор ових константи се своди на погодан избор полова и нула односно, спроводи се процедура „обликовања петље“ (енгл. *Loop Shaping*). Међутим, поступак одређивања тражене фреквенцијске карактеристике код реалних система није једноставан. Код једноставнијих система типа генератора прикљученог на мрежу бесконачне снаге (енгл. *Single Machine Infinite Bus – SMIB*) могуће је аналитички извести тражену функционалну зависност, на основу које се може пронаћи функција преноса система а самим тим и тражена фреквенцијска карактеристика. Међутим, код компликованијих система аналитичко одређивање ове функционалне зависности није једноставно због великог броја генератора и њихових међусобних веза. Стога је у ту сврху могуће користити нека од софтверских рјешења, као што је *Power System Analysis Toolbox (PSAT)* који представља додатак за MATLAB посебно направљен за анализу и симулацију рада електроенергетских система.

Додатна отежавајућа околност је проналажење фреквенције осцилација, односно проналажење одговарајућег осцилаторног мода који је потребно компензовати. Дати оквирни опсег електромеханичких осцилација од 0.2[Hz] до 3[Hz] може се подијелити на два дијела. Један дио чине осцилације појединих машина у систему, односно осцилације одговарајуће машине према некој сусједној машини у систему. Ови осцилаторни модови познати су под називом локални модови. Други дио представљају међубласне осцилације (енгл. *Interarea Oscillations*). Локални модови осцилација јављају се на вишим учестаностима у оквиру посматраног опсега, док се међубласне осцилације јављају на нижим учестаностима. Прецизно одређивање учестаности осциловања могуће је добити одређивањем сопствених вриједности система. Додатно, да би се закључило која од величина највише утиче на одговарајућу учестаност осциловања, односно коју управљачку промјенљиву треба модификовати да би се сузбиле осцилације, могуће је одредити и партиципационе факторе система. Овај поступак је нарочито захтијеван код великих система, какви се разматрају у овом раду. Треба нагласити да претходно споменути потпрограм PSAT успешно може да одређује партиципационе факторе и осцилаторне модове у систему, те може послужити као веома користан алат. Са друге



стране, учестаност осцилација је могуће одредити и путем рачунарских симулација, уколико је за конкретан случај доступан симулациони модел. Овај начин је свакако најпрактичнији али у том случају није могуће познавати партиципационе факторе у систему те стога није једноставно одредити коректну управљачку величину. Ипак, спектар за избор управљачких величина је прилично узак, тако да је овај посао могуће обавити и на бази рачунарских симулација путем покушаја и погрешки.

Данас се велика пажња придаје и развоју напредних алгоритама за управљање UPFC-ом у сврху смањења осцилација активне снаге. Ови алгоритми су углавном базирани на методама вјештачке интелигенције. Иако тренутно нису практично имплементирани, њихов потенцијал у данашње вријеме не треба да буде занемарен. Стога ће се у наставку дати основни преглед оваквих управљачких стратегија за елиминацију проблема осциловања активних снага на надземним водовима.

### 4.3.3 Регулатори на бази неуронских мрежа

У литератури се користи и теорија неуронских мрежа за пројектовање нелинеарних регулатора за управљање радом UPFC-а [97-101]. У овом случају се користи регулатор базиран на неуронским мрежама који на бази сигнала грешке генерише одговарајуће референце напона серијског и оточног уређаја [97]. Овакав регулатор користи радијално базирани неуронске мреже (енгл. *Radial Basis Neural Network – RBNN*). У односу на класичне неуронске мреже, базирани на алгоритму пропагације грешке уназад (енгл. *Backpropagation Error – BPE*), овај алгоритам користи најчешће само један неурон у скривеном слоју неурона. Тачније речено, скривени слој неурона моделује се Гаусовом активационом функцијом. Улаз у неуронску мрежу је најчешће сигнал грешке одговарајуће величине (струје, напона или снаге), док је излаз одговарајућа компонента серијски инјектираног напона. Уочено је да се кориштењем оваког алгоритма превазилазе проблеми везани за генерисање излаза мреже у случају када се на улаз доводе вриједности које не припадају тренинг скупу, као и проблеми везани за превелику утренираност мреже (енгл. *Overfitting*), који су својствени мрежама које користе алгоритам пропагације грешке уназад [97]. У сврху адаптације корекционих фактора мреже, користи се сигнал грешке. Корекциони фактори се мијењају све док сигнал грешке не постане једнак нули. Треба уочити да је ово могуће постићи за једну вриједност сигнала улаза. Да би се покрио шири опсег улазних сигнала, неопходно је подесити већи број корекционих фактора, што условљава пројектовање компликованије неуронске мреже, са већим бројем Гаусових функција у скривеном слоју. У сврху подешавања корекционих фактора, може се користити и Калманов филтар, али то додатно усложњава систем. Овако конципиран алгоритам је брз, није нарочито нумерички захтјеван и погодан је за имплементацију у реалном времену, у односу на BPE алгоритам.

Постоји и другачији, хибридни концепт, при пројектовању регулатора базираног на неуронским мрежама. Овај концепт подразумијева да се користи класични управљачки блок дијаграм, приказан на сл. 4.9, за обезбјеђивање расподеле токова снага и одржавање константног напона на сабирницама. Поред тога, користи се додатни регулатор, базиран на раду неуронске мреже, који генерише помоћне сигнале који се сумирају са излазним сигнаlima крајњих ПИ регулатора у управљачкој структури, при чему су поменути помоћни сигнали задужени за смањење осцилација које настају у транзијентним периодима. Овако конципиран неурорегулатор, као улазе користи сигнале девијације учестаности и напона на сабирницама, те помоћу адекватно пројектоване неуронске мреже одређује излазе, који представљају одговарајуће корекционе сигнале. У устаљеним стањима, не постоје девијације учестаности и напона, тако да је овај регулатор тада неактиван. У транзијентним периодима, регулатор генерисањем помоћних сигнала утиче

на стабилизацију цјелокупног система. У конкретном случају [100], [101] кориштен је метод пропагације грешке уназад за подешавање тежинских фактора мреже. Као улази се, поред наведених промјенљивих, користе и изводи и интегрални ових сигнала како би се постигле што боље перформансе, а што резултује кориштењем шест неурона у улазном слоју мреже. У скривеном слоју користи се девет неурона, а до овог броја дошло се експерименталним путем, кориштењем методе покушаја и погрешки. Излазни слој мреже броји само један неурон, чији излаз је помоћни, корекциони сигнал, који постоји само у транзијентном периоду и доприноси смањењу осцилација активне снаге на воду на коме је инсталиран UPFC. Сви слојеви мреже користе сигмоидалне активационе функције. Испоставља се да овако конципирани регулатори дају добро потискивање осцилација и имају могућност одржавања одговарајућих вриједности на жељеном нивоу без грешке у стационарном стању. Са друге стране, недостаци оваквог концепта управљања огледају се у класичним недостацима неуронских мрежа базираних на алгоритму пропагације грешке уназад. Ови недостаци односе се на несигурну предикцију мреже уколико се на улаз доведу подаци изван тренинг скупа те могућност претренирања мреже. Да би се избјегао први недостатак, могуће је креирати већи тренинг скуп, тако да мрежа добије више „знања“ о систему, односно да буде припремљена на шири опсег могућих појава, у овом случају транзијентна. Са друге стране, превелик тренинг скуп може довести до појаве претренираности мреже, при чему се и на подацима који су блиски тренажним може десити лоша предикција мреже. Квалитетно тренирање мреже захтијева доста експериментисања, које се спроводи углавном на одговарајућем математичком моделу, који наравно могу да имају своје недостатке.

Један од највећих недостатака управљачког концепта заснованог на неуронским мрежама је компликованост а понекад и немогућност математичког доказивања стабилности система [102]. Управљачки систем базиран на неуронској мрежи, који је подешен само уз помоћ математичког модела стварног система и чији је рад верификован само симулацијом на одговарајућем математичком моделу система, без аналитичког доказа стабилности је крајње незахвалан за употребу у великим електроенергетским системима, па стога још увијек овакав управљачки систем није кориштен у пракси. Уколико би се наведени проблеми успјешно превазишли, употреба неуронских мрежа, као једног од метода вјештачке интелигенције, у сврху елиминације осцилација активне снаге, али и потискивања електромеханичких таласа као уопштеног феномена, испољава значајан потенцијал који треба имати у виду у будућности.

#### 4.3.4 Регулатори на бази *fuzzy* система

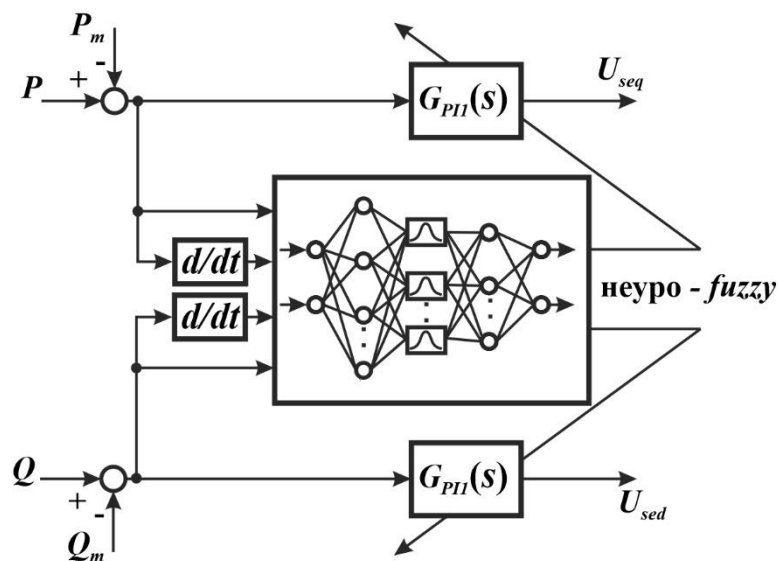
Управљачки системи засновани на *fuzzy* логици, такође имају велики потенцијал за употребу у сврху смањења осцилација активне снаге посредством UPFC-а. Један од првих приједлога за управљање UPFC-ом помоћу *fuzzy* регулатора дат је у [103]. У овом случају кориштен је једноставан управљачки систем. Идеја је да се користи неки од класичних управљачких блок дијаграма, који су раније описани, с тим да се дода *fuzzy* компонента регулаторима. Тачније, само пропорционално дејство, у оквиру ПИ регулатора, се заснива на *fuzzy* логици, док се интегратор задржава. На овај начин се једноставно додаје нелинеарност у управљању без да се управљачки блок дијаграми значајно модификују. Као улази оваквог *fuzzy* регулатора користе се одговарајући сигнали грешке и њихове деривације. Деривације сигнала грешке служе за описивање тенденције раста, односно опадања грешке. Излаз *fuzzy* регулатора је пропорционално појачање које је дио ПИ регулатора са класичним интегратором. На овај начин формира се тзв. хибридни *fuzzy* регулатор. Као функције припадности *fuzzy* регулатора користе се углавном троугаоне и трапезне функције којима се постиже адекватна нелинеарност

управљачке површине. На овај начин добија се регулатор са промјенљивим, адаптивним, пропорционалним појачањем, те цјелокупан управљачки систем има боље динамичке перформансе и значајно боље потискивање осцилација у односу на класични ПИ регулатор са фиксним појачањем. Додатно је уочено да се у овом случају потискује већи број модова осцилација, што је такође унапријеђење у односу на управљање са класичним ПИ регулаторима [103].

Другачији, обухватнији, приступ управљању UPFC-ом помоћу *fuzzy* регулатора је да се умјесто класичног ПИ регулатора користи *fuzzy* ПИ регулатор [104],[105]. У овом случају се не користи хибридна верзија ПИ регулатора, него се комплетан регулатор изводи као *fuzzy* регулатор. Другим ријечима, класични управљачки блок дијаграм, приказан на сл. 4.9 модификован је тако што су умјесто ПИ регулатора кориштени *fuzzy* ПИ регулатори. Слично као у претходном случају, улази *fuzzy* ПИ регулатора су одговарајући сигнали грешке и њихове деривације. Излази ових регулатора су одговарајуће управљачке величине од интереса. Као и у претходном примјеру, кориштене су троугаоне и трапезне функције припадности. Међутим, у овом случају је кориштен значајно већи број функција припадности како би се постигло прецизније управљање. Треба напоменути да је овај алгоритам, једнако као и класични управљачки алгоритам са ПИ регулаторима, намијењен првенствено контроли токова активне и реактивне снаге. Према томе, није вођено рачуна о сузбијању осцилација, које су у овом случају значајније него код управљачког система са класичним ПИ регулатором. Са друге стране, употреба овако пројектованих *fuzzy* ПИ регулатора довела је до повећања брзине одскочног одзива али и до појаве прескока у одскочном одзиву. Са друге стране, у овом случају је постигнута нулта грешка стационарног стања, што није у потпуности било могуће употребом класичних ПИ регулатора. Додатно, показано је да се кориштењем *fuzzy* регулатора може постићи декупловано управљање, које подразумијева независно управљање токовима активних и реактивних снага [105].

Новији управљачки концепти засновани су на интеграцији неуронских мрежа и *fuzzy* система, који се често називају неуро-*fuzzy* системима [106],[107]. Код оваквих система, унутар неуронске мреже, користе се додатни слојеви у којима се налазе *fuzzy* функције припадности са одговарајућим *fuzzy* правилима. Циљ је да се помоћу *fuzzy* логике дода „знање“ о систему у неуронску мрежу, како би се добили што прецизнији тежински фактори помоћу којих ће се генерисати адекватни сигнали у сврху стабилизације система. Један од могућих начина за постизање овог циља јесте да се као улази неуро-*fuzzy* структуре користе сигнали грешке и извода грешке активне и реактивне снаге, док се као излази генеришу пропорционално и интегрално појачање одговарајућих ПИ регулатора, као што је приказано на сл. 4.16 [107].

Код овакве управљачке стратегије параметри ПИ регулатора нису фиксни, него се мијењају са промјеном радног режима у систему, на основу претходно дефинисаних *fuzzy* правила, функција припадности и тежинских фактора неуронске мреже. На овај начин се може постићи квалитетнији одзив система. Међутим, треба уочити да је комплексност оваквог система значајна, те мјера побољшања рада система није директно сразмјерна нивоу уведене комплексности. Стога, кориштење овакве управљачке стратегије треба да буде оправдано значајним уштедама енергије у односу на класичне или неке од претходно наведених управљачких метода.



Сл. 4.16 – Управљачки систем серијског дијела UPFC-а са неуро – fuzzy регулатором [103]

Проблеми који се јављају при пројектовању *fuzzy* регулатора односе се на потешкоће при одређивању облика функција припадности и њиховог домена. Веома је тешко одредити параметре оваквог регулатора математичким путем, на основу одговарајућег математичког модела. Параметри *fuzzy* регулатора се најчешће подешавају путем покушаја и погрешки на стварном систему или на вјеродостојном математичком моделу. Стога је овакав приступ компликован при практичној реализацији и може да буде нумерички захтјеван. Ово је нарочито уочљиво у случају система приказаног на сл. 4.16. Сви наведени недостаци оваквог типа управљачких система резултовали су великом опрезношћу при избору конкретног управљачког модела који се користи у практичној реализацији. Тренутно је у практичној употреби заступљен класичан концепт управљања базиран на ПИ регулатору, који представља сигуран и испробан метод, али не умањује значај нових концепата који имају тенденцију развоја и усавршавања и који би у будућности могли ефикасно да замијене постојеће управљачке системе, те им је стога овдје посвећена извјесна пажња.

Поред наведених нелинеарних управљачких система, веома велика пажња се придаје и нелинеарном управљању на бази теорије Љапунова, које такође има значајан потенцијал. Стога ће се дати кратак преглед и овог управљачког закона за потребе смањења осцилација активне снаге.

#### 4.3.5 Регулатори на бази теорије Љапунова

Основа за пројектовање оваквог управљачког система је теорема Љапунова о стабилности нелинеарних система. Љапунов је дао двије карактеризације стабилности нелинеарних система, односно двије теореме. Друга теорема, позната и као Љапуновљев директни метод, гласи [108]:

*Нека је дат нелинеаран систем, описан једначинама у простору стања*

$$\dot{x} = f(x) \tag{4.16}$$

при чему је радна тачка одређена са  $\mathbf{x} = 0$ , а гдје је са  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$  означен вектор стања система. Тада, уколико постоји функција  $V: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ , таква да за њу вриједи

$$V(\mathbf{x}) = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = 0, \quad (4.17)$$

$$V(\mathbf{x}) > 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} \neq 0, \quad (4.18)$$

$$\dot{V}(\mathbf{x}) = \frac{dV(\mathbf{x})}{dt} \leq 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} \neq 0, \quad (4.19)$$

тада је посматрани систем (4.16) стабилан у смислу Љапунова. Уколико вриједи  $\dot{V}(\mathbf{x}) < 0$  тада је посматрани систем асимптотски стабилан.

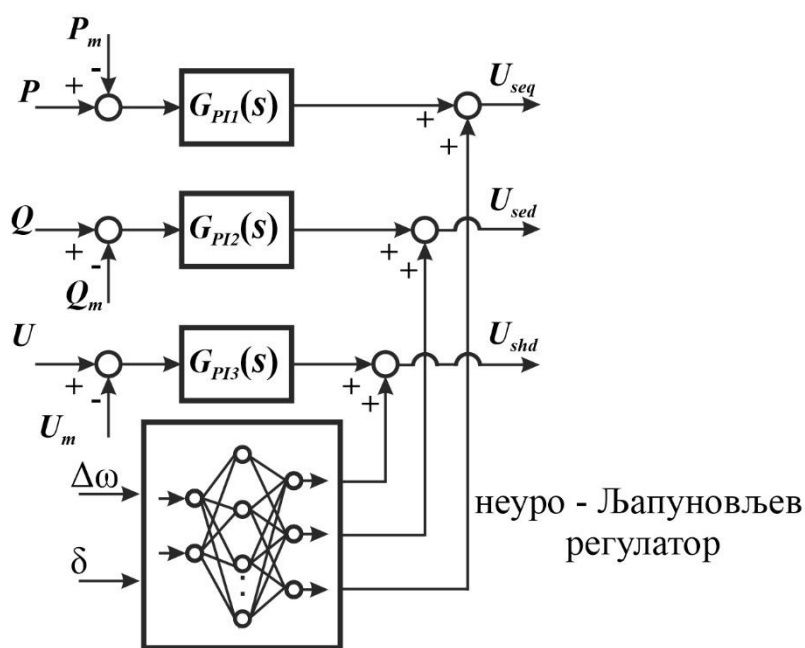
Љапуновљева теорија није дуго времена кориштена у пракси због тога што је било релативно тешко пронаћи адекватну Љапуновљеву функцију  $V(\mathbf{x})$ , те је на том пољу било доста различитих покушаја. Испоставило се да је најпогодније за ову функцију изабрати функцију енергије система која представља збир кинетичке и потенцијалне енергије система. Овдје је битно уочити да управљачки системи на бази теорије Љапунова користе енергију у систему као полазну основу за извођење управљачког закона, што је потпуно аналогно математичком моделу електромеханичког таласа предложеног у овом раду. Према томе, у перспективи би се могло порадити на синергији електромеханичких таласа и управљања на бази Љапунова, будући да је њихова компатибилност евидентна. Ово би могло да доведе до другачијег погледа на принцип дефинисања управљачког закона за потребе сузбијања ширења електромеханичког таласа.

Јасно је да је ова функција ненегативна јер је за функционисање било ког техничког система неопходна енергија. Са друге стране, када се деси поремећај у систему, систем из стабилне радне тачке  $\mathbf{x}_0$  дуж одговарајуће трајекторије у простору стања  $\mathbf{x}(t)$  прелази у неко ново стационарно радно стање  $\mathbf{x}'_0$ . Да би систем што је могуће мање осциловао при преласку из радне тачке  $\mathbf{x}_0$  у нову радну тачку  $\mathbf{x}'_0$ , испоставља се да мора да вриједи  $(dV(\mathbf{x})/dt) \leq 0$ . У овом случају, функција Љапунова тежи свом минимуму, која представља нову радну тачку након завршетка прелазног процеса. Што је вриједност првог извода по времену функције  $V(\mathbf{x})$  мања, систем прије долази у ново стационарно стање, а осцилације у систему ће бити мање. Према томе, погодан је сваки управљачки закон који ће први извод по времену функције  $V(\mathbf{x})$  да учини што негативнијим [109].

За функцију Љапунова најчешће се бира функција енергије система [110-112]. Ова функционална зависност представља збир кинетичке и потенцијалне енергије система, погодно записаног у форми (4.17). Као промјенљиве стања система могу да се користе девијација учестаности у систему  $\Delta\omega$  те угао оптерећења генератора  $\delta$ . Да би се дошло до функције енергије система, неопходно је детаљно моделовати систем и UPFC како би се добила зависност цјелокупне енергије система од UPFC-а. Након тога потребно је изабрати управљачке параметре UPFC-а како би се минимизовала функција  $dV(\mathbf{x})/dt$ , а самим тим и осцилације у систему. Генерални принципи формулисања функције енергије система описани су у [111]. Најчешће се синтеза регулатора примјеном теорије Љапунова врши на систему са једним генератором на бесконачној мрежи у присуству UPFC-а, те се тако добијени регулатори примјењују код комплекснијих система са већим бројем сабирница. Проблем код комплекснијих система је долазак до комплетног математичког модела система, односно формирање функције Љапунова, што је уједно и највећи недостатак ове теорије.

Уочено је да овакав начин формулисања управљачког закона има велики потенцијал, те да се још увијек може радити да адекватном избору функције Љапунова. Избор функције Љапунова зависи и од одабраног математичког модела [113], што додатно даје на значају примјени оваког приступа при пројектовању управљачких система. Међутим, проблем код оваквих управљачких система је што су базирани на математичком моделу система у простору стања. Према томе, за дефинисање управљачког закона неопходно је користити мјерења свих углова оптерећења и брзина обртања ротора генератора, те увођење ових мјерења у јединствени управљачки систем. Овај посао је веома захтијеван са техничког аспекта, те се стога тежи модификацији закона управљања, заснованог на теорији Љапунова, тако да се користе само локално доступна мјерења.

Због компликованог извођења функције Љапунова, чија комплексност расте са порастом реда система и кориштењем компликованијих али прецизнијих модела генератора и UPFC-а, тешко је доћи до оптималних параметара управљачких величина. Стога се уводи идеја да се искористи неуронска мрежа која ће да одреди ове параметре након што се изврши адекватно тренирање мреже [113]. Овакав регулатор се назива и неуро – Љапуновљев регулатор а претходно описан општи принцип функционисања овог регулатора приказан је на сл. 4.17.



Сл. 4.17 – Илустративни приказ Неуро – Љапуновљевог регулатора за управљање UPFC-ом у сврху смањења осцилација снаге [103]

Са сл. 4.17 може се уочити да се задржавају класични ПИ регулатори како би се обезбједио рад система у стационарном стању, односно како би се обављало управљање токовима активне и реактивне снаге, као и одржавање константног модула напона на сабирницама. Додатни, стабилизациони сигнали, генеришу се на бази теорије Љапунова и то као излази одговарајуће неуронске мреже. Улази неуронске мреже су девијација кружне учестаности у систему, те угао оптерећења генератора, што су заправо промјенљиве стања које фигуришу у функцији Љапунова.

На основу приказаних управљачких метода за сузбијање осциловања активних снага на водовима уз помоћ UPFC-а, може се извести закључак да се тренутно у практичној имплементацији користе класична управљања базирана на ПИ регулатору и

стабилизатору електроенергетског система. Напредни управљачки алгоритми ослањају се у све већој мјери на неуронске мреже и њихову коегзистенцију са *fuzzy* регулаторима и регулаторима на бази теорије Љапунова, који представљају нелинеарне регулаторе. Основни проблем оваквих, напреднијих, концепата управљања заснован је у њиховој комплексности, из које произилазе потешкоће подешавања регулатора које захтијева веома прецизан математички модел система, те компликовано математичко доказивање стабилности цјелокупног система. Ипак, потенцијал новијих управљачких стратегија је веома значајан и перспективан. У наставку овог рада биће извршена синтеза параметара и структуре регулатора за потискивање електромеханичких таласа по угледу на овдје описане, првенствено линеарне методе, засноване на ПИ и POD регулатору.

## 5 СИНТЕЗА УПРАВЉАЧКОГ СИСТЕМА

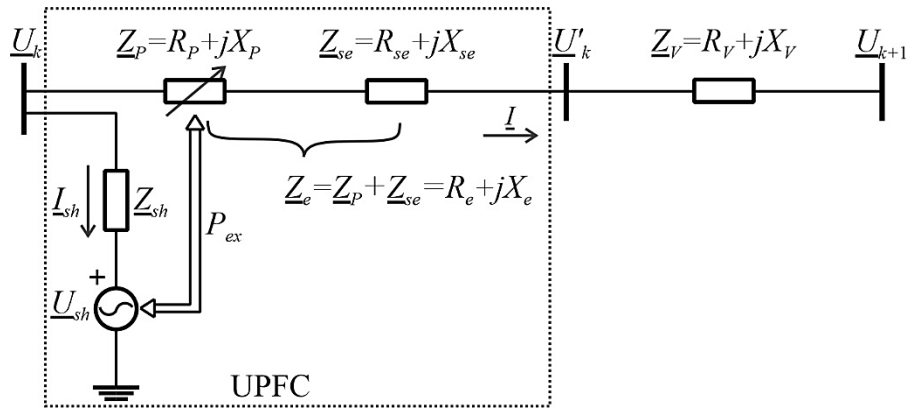
На основу излагања из претходног поглавља, може се закључити да постоји већи број развијених управљачких система како за контролу токова снага и регулацију напона, тако и за сузбијање осцилација активне снаге на водовима уз помоћ UPFC-а. Основна идеја је да се у оквиру овог поглавља, на бази искуства у вези са постојећим управљачким системима, дође до конкретног управљачког система UPFC-а који би на ефикасан начин утицао на сузбијање ширења електромеханичких таласа, што представља један од два основна циља дисертације. Будући да се тренутно у пракси користе конвенционални системи за управљање токовима снага и за смањење осцилација активне снаге, засновани на ПИ и POD регулаторима, управо ови регулатори ће бити искориштени као основа за формирање управљачког система за сузбијање ширења електромеханичких таласа. Током саме процедуре пројектовања и избора параметара регулатора доносиће се закључци о евентуалној модификацији основне верзије POD регулатора, која је описана у претходном поглављу.

На основу математичке формулације управљачког закона, који је изнесен у трећем поглављу, закључено је да се електромеханички таласи могу ефикасно сузбити модулацијом редне отпорности и индуктивности вода, симултано са адекватном модулацијом модула напона мреже на одговарајућим сабирницама у систему. Овај задатак треба да обавља UPFC уз помоћ одговарајућег управљачког система који треба да буде пројектован у текућем поглављу. Прије свега, важно је примјетити да у литератури није забиљежена употреба UPFC-а у тзв. импедантном режиму рада, који подразумијева одвојено управљање редном отпорношћу и индуктивношћу надземног вода. Постоје одговарајући покушаји употребе UPFC у режиму управљања искључиво редном реактансом вода [114-116]. Међутим, примјећује се да се овакви управљачки задаци могу испунити и кориштењем SSSC-а и као такви нису погодни за реализацију претходно предложеног управљачког закона. Поред тога, неки аутори режим управљања реактансом вода поистовјећују са импедантним режимом рада [116], што у овом случају не може да се учини будући да је из претходно објашњених разлога неопходно управљати са оба параметра редне импедансе вода. Будући да је овај задатак саставни дио управљачке стратегије за елиминацију ширења електромеханичких таласа, неопходно је најприје формирати одговарајући управљачки систем UPFC-а за ову сврху и исти тестирати на погодном тестном систему. Стога ће ово бити први задатак у склопу ширег проблема одређивања структуре и параметара управљачког система за потребе потискивања електромеханичког таласа. Дакле, у наставку ће се прво посветити пажња пројектовању управљачког система UPFC-а за независно управљање редним параметрима надземног вода, а касније ће тако добијен управљачки систем бити проширен како би се употпунило испуњавање дефинисаног управљачког закона.

### 5.1 Управљачки систем за управљање редним параметрима вода

Да би се дошло до управљачког система UPFC-а погодног за независно управљање активном отпорношћу и реактансом надземног вода, могуће је посматрати еквивалентну шему UPFC-а приказану на сл. 5.1.





Сл. 5.1 – Еквивалентна шема UPFC-а за импедантни режим рада

За разлику од основне еквивалентне шеме UPFC-а приказане на сл. 4.8а, еквивалентна шема приказана на сл. 5.1 умјесто серијски инјектираног напона  $\underline{U}_{se}$  користи еквивалентну промјенљиву импедансу  $\underline{Z}_e$ , која представља збир фиксне серијске импедансе UPFC-а  $\underline{Z}_{se}$  и промјенљиве импедансе  $\underline{Z}_P$ , односно вриједи  $\underline{Z}_e = \underline{Z}_{se} + \underline{Z}_P$ . Све остале ознаке са сл. 5.1 идентичне су претходно кориштеним ознакама на сл. 4.8а. Зависност еквивалентне промјенљиве импедансе  $\underline{Z}_e$  од серијски инјектираног напона UPFC-а  $\underline{U}_{se}$  може се извести поређењем израза за струју вода за шеме приказане на сликама 5.1 и 4.8а које су међусобне еквивалентне. Струја вода  $\underline{I}$  на основу базне еквивалентне шеме са сл. 4.8а може се изразити као

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_k + \underline{U}_{se} - \underline{U}_{k+1}}{\underline{Z}_{se} + \underline{Z}_V} \quad (5.1)$$

Израз за струју вода  $\underline{I}$  на основу еквивалентне шеме са сл. 5.1 дат је са

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_k - \underline{U}_{k+1}}{\underline{Z}_P + \underline{Z}_{se} + \underline{Z}_V} \quad (5.2)$$

Изједначавањем једначина (5.1) и (5.2), добија је израз за промјенљиву импедансу  $\underline{Z}_P$  дат са (5.3).

$$\underline{Z}_P = -\frac{\underline{U}_{se}}{\underline{I}} = R_P + jX_P \quad (5.3)$$

Из једначине (5.3) евидентно је да је промјенљива импеданса  $\underline{Z}_P$  зависи од серијски инјектираног напона  $\underline{U}_{se}$ . Другим ријечима, промјеном напона  $\underline{U}_{se}$  могуће је мијењати промјенљиву импедансу  $\underline{Z}_P$  а самим тим и укупну импедансу између посматраних сабирница  $k$  и  $k+1$ . Овим је показано да UPFC теоријски може да утиче на промјену активне отпорности и реактансе вода. Још је неопходно формирати одговарајући управљачки систем који је у стању да испуни овако дефинисане управљачке циљеве.

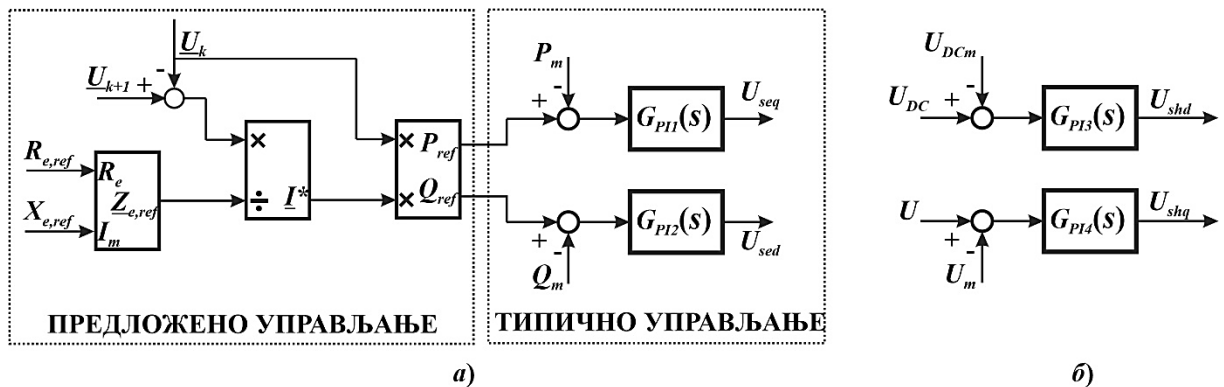
У претходном поглављу могло се уочити да управљачки систем серијског дијела UPFC-а типично као улазне, референтне, величине користи активну и реактивну снагу. Стога, на основу предложене еквивалентне шеме са сл. 5.1 могуће је одредити референтне вриједности активне и реактивне снаге, при чему ће у овом случају у датом математичком изразу да фигурише промјенљива импеданса  $\underline{Z}_P$  умјесто серијски

инјектираног напона  $\underline{U}_{se}$ . Тражена референтна комплексна привидна снага  $\underline{S}_{k,ref}$  дата је изразом (5.4).

$$\underline{S}_{k,ref} = \underline{U}_k \left( \frac{\underline{U}_k - \underline{U}_{k+1}}{Z_{e,ref}} \right)^* = P_{ref} + jQ_{ref} \quad (5.4)$$

У изразу (5.4) са  $Z_{e,ref}$  означена је еквивалентна референтна вриједност импедансе између сабирница  $k$  и  $k+1$ , која представља збир импедансе серијског дијела UPFC-а  $Z_{se}$ , импедансе надземног вода  $Z_V$ , које представљају фиксне импедансе, те промјенљиве импедансе  $Z_P$  коју је могуће подешавати адекватним генерисањем серијски инјектираног напона  $\underline{U}_{se}$ . Дакле, задавањем жељених вриједности отпорности и индуктивности система између посматраних сабирница, што се може окарактерисати као задавање жељених редних параметара надземног вода, могуће је индиректно генерисати референтне вриједности активне и реактивне снаге UPFC-а, које се могу одржавати на жељеном нивоу примјеном неког од претходно описаних управљачких система.

На основу изложеног, предложен је управљачки систем за управљање UPFC-ом чији је блок дијаграм приказан на сл. 5.2.



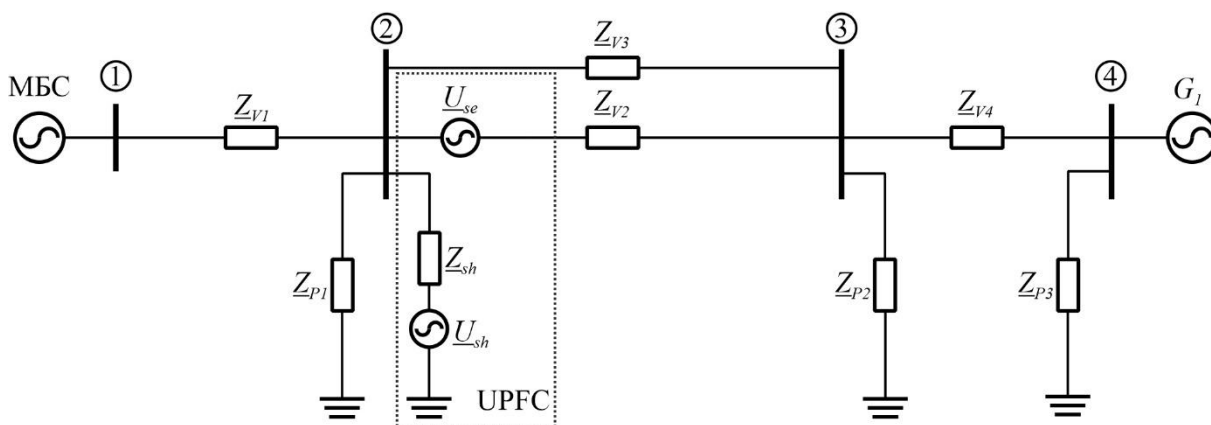
Сл. 5.2 – Управљачки блок дијаграм UPFC-а: а) серијски уређај, б) оточни уређај, за управљање у импедантном режиму рада

Управљачки систем серијског дијела UPFC-а приказан на сл. 5.2а представља типичан управљачки систем за одржавање константних токова активне и реактивне снаге, претходно приказан на сл. 4.9а, са додатком који омогућава израчунавање референци активне и реактивне снаге на бази задатих вриједности еквивалентне отпорности и индуктивности на основу једначине (5.4). Према томе овако предложен управљачки систем је веома једноставан и лако се интегрише у оквире постојећих управљачких система за контролу токова снага. Управљање оточним дијелом UPFC-а може се реализовати на основу блок дијаграма приказаног на сл. 5.2б. У овом случају извршено је додатно поједносављење управљачког система у односу на базни систем приказан на сл. 4.9б. Упростићење подразумјева изbacивање повратне спреге по струји, тако да се у овом случају користи само повратна спрега по напону мреже и напону једносмјерног кола. Будући да је акценат ове анализе стављен на демонстрацију могућности UPFC-а да одвојено управља активном отпорношћу и индуктивношћу вода, саме перформансе попут брзине одзива и прескока у одскочном одзиву, нису у фокусу ове анализе. Стога је управљачки систем максимално поједностављен.

Предложени управљачки систем потребно је даље теситрати на одговарајућем тестном систему, који је детаљно описан у наставку.

### 5.1.1 Опис тестног система

У литератури се за потребе тестирања перформанси UPFC-а користи већи број различитих тестних система. Типично се, за потребе тестирања управљачких система за управљање активним и реактивним снагама, користи четворомашински Кундуоров систем [117] или систем са једним генератором на мрежи бесконачне снаге са два паралелна вода (енгл. *Single Machine Infinite Bus – SMIB*) [118]. Због једноставности, у овом случају биће кориштен тестни систем са једним генератором прикљученим на мрежу бесконачне снаге, чија је једнополна шема приказана на сл. 5.3.

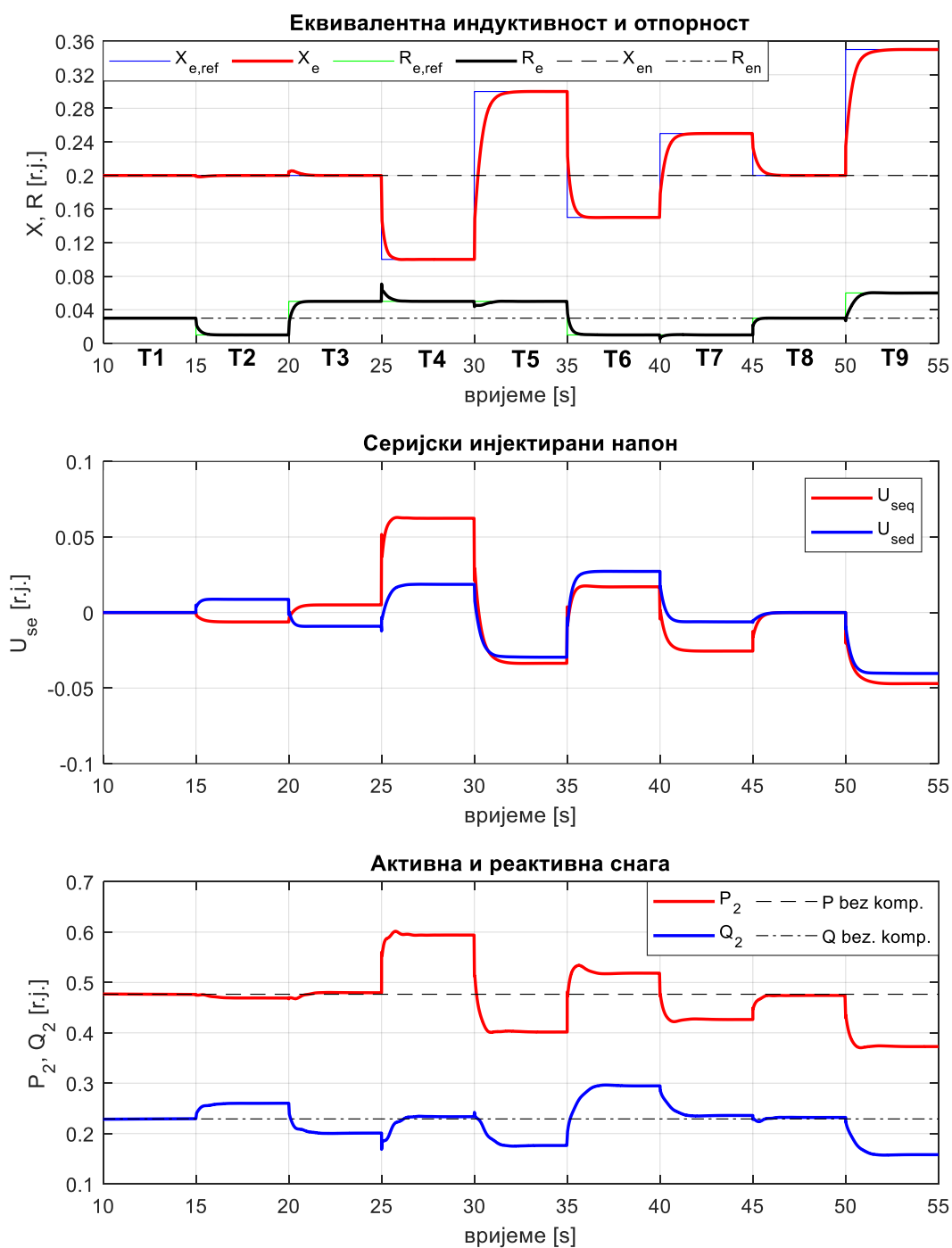


Сл. 5.3 – Једнополна шема тестног система за тестирање рада UPFC-а у импедантном режиму рада [119]

Тестни систем са сл. 5.3 састоји се из четири сабирнице. Сабирнице 1 и 4 су генераторске, при чему је на сабирнице 4 прикључен синхрони генератор, док је на сабирнице 1 везана мрежа бесконачне снаге (МБС). Све сабирнице су међусобно повезане надземним водовима чије су импедансе означене са  $Z_V$ . Сабирнице 2 и 3 повезане су међусобно са два паралелна вода чије су редне импедансе означене са  $Z_{V1}$  и  $Z_{V2}$ . На сабирнице 2 везан је UPFC чији задатак је да на воду са импедансом  $Z_{V2}$  врши управљање еквивалентном импедансом. Другим ријечима, UPFC треба да модулише активну отпорности и индуктивност вода на коме је прикључен, у складу са управљачким системом приказаним на сл. 5.2. Додатно, на сабирницама 2, 3 и 4 прикључени су потрошачи константне импедансе означене као  $Z_{P1}$ ,  $Z_{P2}$  и  $Z_{P3}$ , респективно. Генератор  $G_1$  моделован је математичким моделом шестог реда, чији је блок дијаграм приказан на сл. 2.4, а који је детаљно описан у другом поглављу. Кориштени математички модел UPFC-а је такође раније детаљно описан у оквиру четвртог поглавља. Параметри свих елемената тестног система, укључујући и параметре одговарајућих ПИ регулатора управљачког система UPFC-а, дати су у Додатку Б. Сви параметри еквивалентне шеме тестног ситета са сл. 5.3 нормализовани су у односу на номинални напон  $U_n=220[\text{kV}]$  и номиналну привидну снагу  $S_n=100[\text{MVA}]$ .

### 5.1.2 Резултати симулације

За потребе извођења рачунарских симулација, систем приказан на сл. 5.3 моделован је кориштењем софтвера MATLAB (Simulink). Изабрано је да симулација траје укупно 55[s], при чему је укупно вријеме трајања симулације подијељено у девет једнаких сегмената (Т1-Т9) у трајању од по 5[s]. На почетку сваког временског интервала дешава се промјена референтне вриједности еквивалентне отпорности или индуктивности. Да би се добили јаснији резултати и како би се прескочио почетни транзијентни период, приказани су резултати симулације почевши од тренутка  $t_l=10[\text{s}]$ .



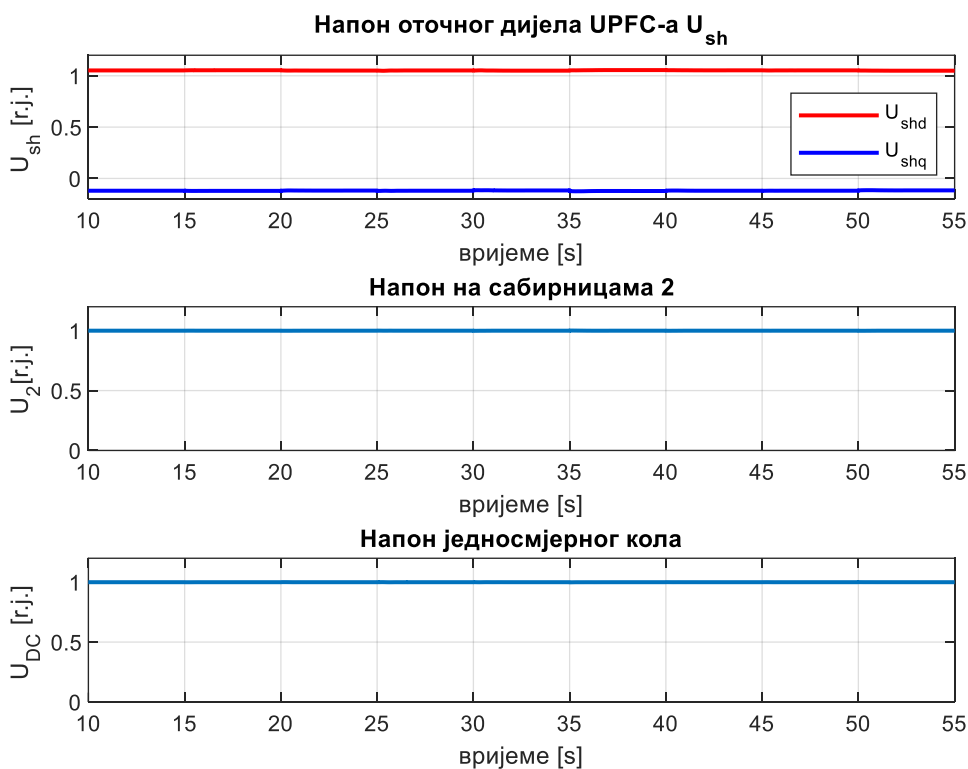
Сл. 5.4 – Резултати симулације рада UPFC-а у импедантном режиму рада за серијски дио

На сл. 5.4 испрекиданим линијама приказане су номиналне еквивалентне вриједности реактансе  $X_{en}=0.2$ [r.j.] и отпорности  $R_{en}=0.03$ [r.j.]. Црвеном и црном бојом приказани су одзиви (мјерене вриједности) реактансе  $X_e$  и активне отпорности  $R_e$ , респективно. Референтне вриједности реактансе  $X_{e,ref}$  и активне отпорности  $R_{e,ref}$  приказане су плавом и зеленом бојом, респективно. У интервалу T1 задате вриједности еквивалентне реактансе и отпорности једнаке су номиналним вриједностима. У овом случају серијски инјектирани напон UPFC-а једнак је нули, будући да није потребно

вршити никакву компензацију. Активне и реактивне снаге у овом интервалу једнаке су природним снагама које се преносе надземним водом у случају када UPFC није прикључен на систем. У временском интервалу T2, референца активне отпорности се смањује у односу на номиналну вриједност, док се референца реактансе задржава на номиналној вриједности. Са сл. 5.4 евидентно је да је одзив активне отпорности апериодичан, те да прати референцу без грешке у стационарном стању. Треба истаћи да је у овом случају посредством UPFC-а генерисана негативна отпорност како би се постигао жељени резултат. У ту сврху генерисане су одговарајуће  $d$  и  $q$  компоненте серијски инјектираног напона, што је узроковало прерасподјелу активних и реактивних снага у овом временском интервалу. У оквиру трећег временског интервала T3, активна отпорност је повећана у односу на номиналну вриједност, при чему је реактанса и даље задржана на номиналној вриједности. И у овом случају одзив активне отпорности је апериодичан без грешке у стационарном стању. У одзиву реактансе може се уочити прескок, који је последица тога што управљање није потпуно распрегнуто. Као што је раније наглашено, овај проблем се може једноставно превазићи пројектовањем додатног регулатора за распрезање. Због једноставности имплементације, у овом случају то није учињено. И поред тога уочава се да је посматрани прескок у одзиву реактансе незнатан те не утиче значајно на цјелокупну динамику система. У посматраном временском интервалу дошло је до генерисања нових компонената серијски инјектираног напона као и до нове расподјеле активних и реактивних снага. У четвртном временском интервалу T4, активна отпорност је задржана на вриједности из претходног интервала (већа од номиналне вриједности) док је жељена вриједност реактансе смањена за 50% у односу на номиналну вриједност. У овом случају се уочава апериодичан одзив еквивалентне реактансе, док је вриједност отпорности задржана на жељеном нивоу, уз прескок у одскочном одзиву. Упркос прескоку, одзив еквивалентне отпорности достиже референтну вриједност за приближно 1[s] што је указује на веома добре динамичке перформансе система. У овом случају се генеришу значајне вриједности компонената серијски инјектираног напона, као и значајна вриједност активне снаге. Може се уочити да се активна снага која се преноси водом у овом случају повећала у односу на претходни временски интервал T3, што је и очекивано, будући да се реактанса значајно смањила у односу на реактансу у интервалу T3. У наредном временском интервалу T5 вршено је повећање еквивалентне реактансе 50% у односу на номиналну вриједност, при константној вриједности отпорности која је иста као у претходном временском интервалу (већа од номиналне). Све посматране величине у овом интервалу имају апериодичан одзив, а њихове вриједности су у складу са очекивањима. У оквиру временског интервала T6 вршено је истовремено смањење и активне отпорности и индуктивности вода. И у овом случају добијени су одскочни одзиви мјерених вриједности отпорности и индуктивности. Обје компоненте серијски инјектираног напона имају апериодичан одзив. Само је код одзива активне снаге у овом случају уочен прескок од приближно 12%. У наредном, седмом временском интервалу, при константној вриједности отпорности, која је мања од номиналне, вршено је повећање реактансе вода. И у овом случају све посматране величине имају апериодичан одскочни одзив. У претпоследњем временском интервалу T8, референце еквивалентне отпорности и индуктивности једнаке су својим номиналним вриједностима, као што је то случај у интервалу T1. С тим у вези, добијени су исти одзиви као и у временском интервалу T1. Коначно, у последњем временском интервалу T9 вршено је истовремено повећање референтних вриједности еквивалентне отпорности и реактансе вода. Добијени одзиви ових величина су такође апериодични, без грешке у стационарном стању. Аналогно вриједи и за одзиве серијски инјектираних напона као и активне и реактивне снаге.

Генерално, на основу симулационих резултата датих на сл. 5.4 може се закључити да UPFC има могућност независног управљања еквивалентном отпорношћу и индуктивношћу вода са веома добрим динамичким карактеристикама кориштењем предложеног једноставног управљачког система. Боље перформансе система је, по потреби, могуће постићи пројектовањем додатних регулатора за распрезање како се промјена референтне вриједности једне величине не би значајно одражавала на промјену друге величине. Важно је примјетити да одзив система при одскочној промјени референци за мање од 2[s], у свим могућим сценаријима, улази у стационарно стање. Одзиви свих величина се претежно могу окарактерисати као апериодични. Веома је битно примјетити да се код одзива активне и реактивне снаге не јављају значајне осцилације ових величина што је битно са становишта транзијентне стабилности система. Поред тога, може се закључити да се  $q$  компонентном серијски инјектираног напона доминантно утиче на промјену активне снаге вода, док се промјеном  $d$  компоненте овог напона утиче на промјену реактивне снаге, што је у складу са управљачким блок дијаграмом система приказаном на сл. 5.2.

Претходна анализа тичала се величина на које утиче серијски дио UPFC-а. Да би се употпунила слика о могућности кориштења UPFC-а у сврху управљања отпорношћу и индуктивношћу вода, на сл. 5.5 приказани су одзиви величина на које утиче оточни дио UPFC-а.



Сл. 5.5 – Резултати симулације рада UPFC-а у импедантном режиму рада за оточни дио

На сл. 5.5 дати су одзиви  $d$  и  $q$  компонента напона  $U_{sh}$  оточног дијела UPFC-а, као и таласни облици ефективне вриједности напона на посматраним сабирницама 2, те напон једносмјерног кола. Недвосмислено се може закључити да су сви посматрани напони константни. Према томе, оточни дио уређаја, задужен за одржавање мрежног напона и напона једносмјерног кола на константном нивоу у потпуности испуњава сва теоријска очекивања.

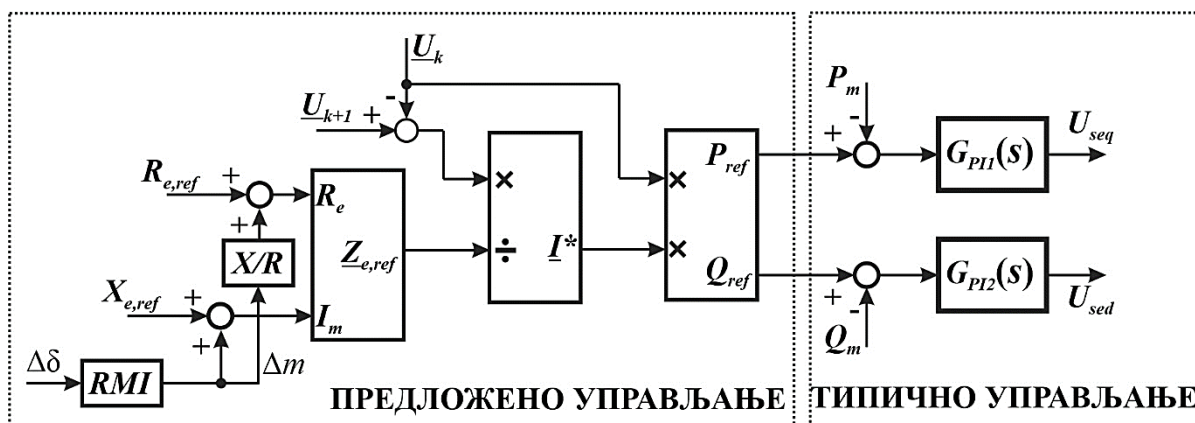
Дакле, закључак цјелокупне анализе је да се UPFC може ефикасно користити у сврху независног управљања отпорношћу и индуктивношћу вода. Према томе, сада су испуњене све претпоставке за успјешно пројектовање управљачког система UPFC-а на бази импедантног режима рада у сврху потискивања електромеханичких таласа, што ће бити реализовано у наставку рада.

## 5.2 Управљачки систем за сузбијање ширења електромеханичких таласа

У другом поглављу изведен је управљачки закон за потребе управљања UPFC-ом у сврху сузбијања ширења електромеханичких таласа. Суштина овог управљања огледа се у модулатији редних параметара надземног вода као и модулатији амплитуде напона мреже у случају појаве осцилација угла оптерећења синхроних генератора. Раније се дошло до закључка да је неопходно смањивати активну отпорност и индуктивност вода на коме је инсталиран UPFC у односу на номиналну вриједност ових параметара. Будући да је цјелокупан управљачки систем заснован на модулатији редних параметара вода и мрежног напона, као основа за пројектовање управљачког система за сузбијање ширења таласа може се узети управљачки систем приказан на сл. 5.2 задужен за управљање редним параметрима надземног вода. У оквиру овог система потребно је пројектовати додатне регулаторе који ће генерисати одговарајући стабилизациони сигнал који ће бити присутан искључиво у случају постојања осцилација у систему. У супротном, додатни регулатори треба да буду неактивни. Будући да је циљ да се симултано врши модулатија редних параметара вода и напона мреже, неопходно је одговарајуће регулаторе пројектовати како за серијски тако и за оточни дио UPFC-а.

### 5.2.1 Управљачки систем за сузбијање ширења осцилација за серијски дио UPFC-а

На основу базног управљачког система намијењеног управљању отпорношћу и индуктивношћу вода, предложен је управљачки систем за сузбијање ширења електромеханичких таласа који је приказан на сл. 5.6.



Сл. 5.6 – Предложени управљачки систем серијског дијела UPFC-а у сврху сузбијања ширења електромеханичких таласа [64]

У односу на класични управљачки систем за управљање редним параметрима вода, приказан на сл. 5.2, предложени управљачки систем серијског дијела UPFC-а за потребе сузбијања ширења електромеханичких таласа посједује додатни регулатор за модулатију импедансе (RMI). Овај регулатор има задатак да врши симултану модулатију реактансе

и редне отпорности вода у случају појаве осцилација у систему. За улаз овог регулатора изабрана је девијација угла оптерећења синхроног генератора. Треба уочити да се модулација редне отпорности врши пропорционално модулацији редне реактансе у складу са коефицијентом пропорционалности  $X/R$ . Разлог овоме је објашњен у другом поглављу приликом дефинисања управљачког закона гдје је наглашено да је приликом управљања неопходно задржати номиналан однос реактансе и отпорности вода ( $X/R$ ). Посматрањем управљачког блок дијаграма са сл. 5.6 може се закључити да је предложени управљачки систем за сузбијање ширења електромеханичких таласа једноставно интегрисан у оквиру постојећег управљачког система за контролу токова снага, што је био један од полазних циљева при пројектовању управљачког система. Поред тога, уочава се да је регулатор за модулацију импедансе у комбинацији са управљачким системом задуженим за управљање редним параметрима вода основа предложеног система за потискивање електромеханичких таласа. Стога ће у наставку бити детаљно описана процедура избора структуре и параметара овог регулатора.

### 5.2.1.1 Пројектовање регулатора за модулацију импедансе

Циљ регулатора за модулацију импедансе је да у случају појаве девијације угла оптерећења синхроног генератора  $\Delta\delta$ , узрокован појавом осцилација у систему, генерише стабилизациони сигнал  $\Delta m$  који треба да на погодан начин модулише редне параметре вода, што у складу са претходно изнесеним управљачким законом треба да доведе до смањења коефицијента трансмисије таласа чиме би се смањила амплитуда таласа који се простире кроз систем. Према томе, може се закључити да регулатор за модулацију импедансе треба да врши посао аналоган послу који врши претходно описани регулатор за смањење осцилација активне снаге (POD). Стога је логично да се за структуру регулатора за модулацију импедансе усвоји једнака структура као за POD регулатор или стабилизатор електроенергетског система, приказана на сл. 4.11. Општа функција преноса овог регулатора дата је са

$$G_{RMI}(s) = K_i \frac{sa_3}{s+a_3} \frac{s+a_1}{s+b_1} \frac{s+a_2}{s+b_2}. \quad (5.5)$$

За овако дефинисану структуру регулатора, неопходно је одредити нуле, полове и појачање регулатора како би се постигао жељени ефекат у систему. Аналогно POD регулатору, први корак је да се одреде осцилаторни модови у систему, односно да се одреди учестаност електромеханичких осцилација које је потребно сузбити. Осцилаторни модови у систему могу се одредити детаљном анализом система при малим поремећајима, са изворним називом *small signal stability*. Ова фраза означава проучавање стабилности система у случају кратких поремећаја у систему који узрокују разне типове осцилација, те могућности одржавања синхронизма у случају оваквих поремећаја. Значајну улогу у анализи стабилности система на мале поремећаје заузима одређивање сопствених вриједности система. Да би се предпочила комплексност поступка одређивања осцилаторних модова у систему, може се кренути од једначине (5.6) којом је описан систем у простору стања.

$$\dot{x} = Ax. \quad (5.6)$$

гдје је  $A$  матрица стања система, реда  $n$  а  $x$  вектор стања система. Ако постоји ненулти вектор  $v$  и скалар  $\lambda$  такви да важи



$$Av = \lambda v \quad (5.7)$$

тада се вектор  $v$  назива сопственим вектором матрице  $A$ , док се скалар  $\lambda$  назива сопственом вриједношћу матрице  $A$ , која одговара вектору  $v$ . Често се вектор  $v$  назива и десним сопственим вектором будући да у једначини (5.7) множи матрицу  $A$  са десне стране. Карактеристични полином матрице  $A$  дефинисан је као

$$p(\lambda) = \det(\lambda I - A) = c_n \lambda^n + c_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + c_1 \lambda + c_0 \quad (5.8)$$

гдје је са  $I$  означена јединична матрица реда  $n$ . Нуле карактеристичног полинома (5.8) линеарног система (5.6) представљају уједно сопствене вриједности  $\lambda_i$  матрице  $A$ . Познато је да је динамика система доминантно одређена распоредом сопствених вриједности, односно полова система. Поред тога, распоред полова система одређује и стабилност система. Будући да је карактеристични полином система  $p(\lambda)$  полином са реалним коефицијентима, нуле овог полинома могу да буду реалне или конјуговано – комплексне. Како је циљ анализе, утврђивање осцилаторних модова система, од интереса су комплексни полови јер њихов имагинарни дио одређује учестаност осциловања у систему. Дакле, да би се одредила тачна учестаност осцилација у систему, неопходно је утврдити све сопствене вриједности матрице стања система, односно одредити све полове у систему. Овдје треба уочити да је формирање система у облику (5.6) компликовано чак и за једноставан систем попут система приказаног на сл. 5.3. Додатно, важно је уочити да изложена теорија вриједи искључиво за линеарне и временски инваријанте системе. Будући да је електроенергетски систем изразито нелинеаран, први корак ка добијању система у облику (5.6) је линеаризација у околини стационарног стања. То подразумијева да добијени резултати важе само за један радни режим у систему. Уколико се нпр. промијени расподјела снага која се преноси из једног дијела система у други, било би потребно поново извршити линеаризацију и поново одредити сопствене вриједности а самим тим и учестаности осциловања, што је недостатак оваквог приступа. Међутим, искуствено је потврђено да се осцилаторни модови не мијењају значајно у зависности од промјене радног режима, па се регулатори подешавају за нешто шири опсег учестаности у односу на учестаност добијену спроведеном анализом, како би се покрио шири спектар евентуалних радних стања.

Због наведене комплексности одређивања осцилаторних модова у систему, које је нарочито изражено код компликованих, реалистичних, тестних система, какви ће бити кориштени у овом раду, могуће је тражене осцилаторне учестаности одредити користећи рачунарске симулације. На бази погодног симулационог модела тестног система, могуће је утврдити учестаност осциловања која ће бити кориштена у сврху подешавања регулатора. Као што је раније речено, субсинхроне учестаности осцилација у систему крећу се од приближно 0.2[Hz] до приближно 3[Hz]. Треба нагласити да наведени опсег учестаности није сасвим егзактан, те да се у пракси могу јавити учестаности осцилација које не припадају посматраном опсегу. Ипак, примјећено је да већина осцилаторних модова лежи у наведеном распону учестаности.

Након што је, на неки од претходно поменутих начина, утврђена учестаност осциловања и њен тип, може се приступити пројектовању регулатора за модулацију импедансе. Одређивања полова и нула регулатора (5.5) најчешће се врши примјеном фреквенцијских метода познатих и под називом обликовање петље (енгл. *Loop Shaping*). Ова процедура подразумијева да се погодним избором полова и нула подешава фреквенцијска карактеристика регулатора тако да регулатор на одређеној учестаности

осциловања коју је потребно потиснути унесе одговарајући фазни помјерај у систем. Код класичног стабилизатора ЕЕС-а, познато је да регулатор треба да унесе фазни помјерај од приближно  $\pi/2$ [rad] на учестаности осциловања како би резултантни фазни помјерај цјелокупног система са регулатором на посматраној учестаности био једнак нули. Због тога се користи диференцијални компензатор (енгл. *lead compensator*) који има могућност да врши „поправку“ фазне карактеристике у жељеном опсегу. Најчешће један компензатор овога типа није довољан да би се извршила тражена фазна компензација него се користе два. Параметри ових компензатора у једначини (5.5) дати су са  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  и  $b_2$ . У конкретном случају, неопходно је утврдити адекватан фазни помјерај који је потребно унијети у систем на учестаности осциловања, будући да се врши модулација импедансе а не модулација напона као код стабилизатора ЕЕС-а или РОД регулатора. Генерисање фазне карактеристике система без регулатора је изузетно компликовано, тако да је идеја да се у конкретном случају користи метод покушаја и погрешки за одређивање егзактне вриједности фазног помјераја који регулатор треба да унесе у систем. Потребно је кренути од номиналног фазног помјераја од приближно  $\pi/2$ [rad] те итеративним поступком постепено смањивати фазну компензацију (мијењати параметре диференцијалних компензатора) како би се дошло до адекватне вриједности за конкретан тестни систем. Валидација резултата може се вршити посматрањем временских одзива углова осциловања синхроних генератора у систему. Поред диференцијалних компензатора, у структури регулатора (5.5) фигурише и интегрални члан са параметром  $a_3$  чији је задатак да обезбједи нулту грешку стационарног стања. С тим у вези, параметар  $a_3$  бира се тако да дио фреквенцијске карактеристике који потиче од интегралног члана не утиче битно на фазну карактеристику претходно одређену подешавањем параметара диференцијалних компензатора. Коначно, укупно појачање регулатора  $K_i$  се, према препорукама за пројектовање стабилизатора ЕЕС-а, узима да износи трећину од граничне вриједности појачања којом се систем доводи на границу стабилности [67]. Примјећује се да је тражено појачање могуће једноставно одредити анализом геометријског мјеста коријена регулатора. Предложена вриједност појачања може се користити као полазна основа за фино подешавање које се опет може вршити итеративним поступком.

Резимирано, параметре траженог регулатора модулације импедансе могуће је подесити на сљедећи начин. Први корак је да се изврши синтеза диференцијалних компензатора анализом фазне фреквенцијске карактеристике система, тако да регулатор на учестаности осцилација од интереса унесе жељени фазни помак. Након тога могуће је изабрати параметре интегралног члана тако да дио фреквенцијске карактеристике који потиче од интегралног члана не утиче значајно на претходно одређену фазну компензацију. Коначно, почетну вриједност укупног појачања регулатора могуће је изабрати као трећину граничног појачања система.

Примјећује се да предложени поступак подешавања регулатора за модулацију итеративан, и биће додатно објашњен у поступку анализе резултата симулације у наредном поглављу.

### 5.2.2 Управљачки систем за сузбијање ширења осцилација за оточни дио UPFC-а

Анализом управљачког закона дефинисаног у другом поглављу дошло се до закључка да се у сврху сузбијања ширења електромеханичких таласа у систему, поред модулације редне импедансе вода, може симултано вршити и модулација амплитуде напона мреже у тачки у којој је прикључен UPFC. На основу тога, предложен је управљачки систем за оточни дио UPFC-а који је приказан на сл. 4.12. Дакле, предложен је класични управљачки систем оточног дијела UPFC-а са РОД регулатором. Једина разлика у односу на управљачки систем са сл. 4.12 јесте што се у конкретном случају

предлаже кориштење истог улазног сигнала као и за серијски дио управљачког система, односно умјесто девијације учестаности  $\Delta\omega$  како је приказано на сл. 4.12, предлаже се кориштење девијације угла оптерећења  $\Delta\delta$ . Пројектовање POD регулатора, који представља саставни дио оточног управљачког система, раније је детаљно објашњено. Треба истаћи да у литератури није забиљежен случај кориштења два засебна регулатора за модулацију у оквиру серијског и оточног управљачког система. Иначе се регулатор за модулацију користи искључиво у једном од два управљачка система UPFC-а. Стога, приликом пројектовања POD регулатора за оточни дио управљачког система треба нарочиту пажњу посветити одређивању егзактне вриједности фазне компензације коју регулатор треба да унесе у систем. Предлаже се да се, као у случају пројектовања регулатора за модулацију импедансе, користи итеративни поступак подешавања фазне компензације POD регулатора, на начин како је то претходно описано.

Уколико се погледа цјелокупна слика управљачког система UPFC-а задуженог за сузбијање ширења електромеханичких осцилација, може се уочити да се ради о изразито комплексном управљачком систему у коме је потребно подесити параметре укупно шест ПИ регулатора и два модулациона регулатора. Према томе, сама процедура подешавања регулатора и усклађивања њихових динамика и фреквенцијских карактеристика је веома захтијевна те је идеја да се спроведе итеративно. Најприје је потребно подесити параметре ПИ регулатора како би UPFC био у стању да испуњава основне управљачке законе везане за одржавање константних снага и напона у систему а затим, описаним итеративним поступком потребно је подесити и параметре регулатора за модулацију импедансе као и POD регулатора. Ова процедура ће бити детаљно размотрена, објашњена и верификована на симулационом моделу реалистичног електроенергетског система у оквиру наредног поглавља.

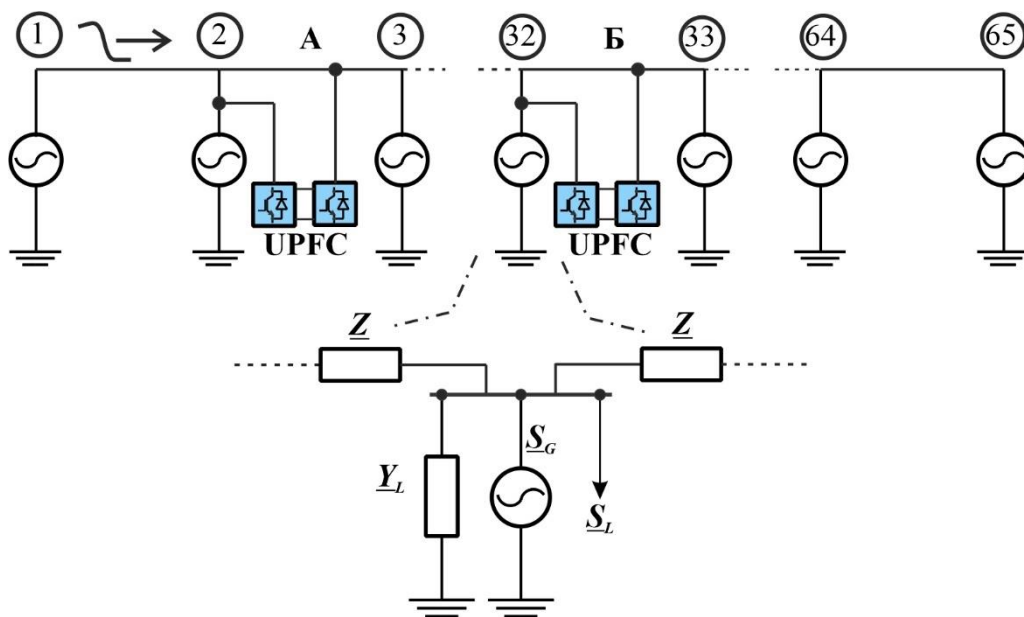
У наредном поглављу биће демонстрирана могућност UPFC-а да сузбије ширење електромеханичких таласа у реалистичним електроенергетским системима. Додатно, значајна пажња биће посвећена утицају локације UPFC-а у односу на тачку извора поремећаја у систему на могућност сузбијања електромеханичких таласа.

## 6 РЕЗУЛТАТИ СИМУАЛЦИЈА И ДИСКУСИЈА

Предложени управљачки систем за управљање UPFC-ом у сврху потискивања електромеханичких таласа потребно је тестирати у што реалистичнијем окружењу. Због комплексности самог UPFC-а али и сложености разматраног проблема електромеханичких таласа, експерименталну верификацију нажалост није могуће спровести. Стога ће валидација управљачког алгоритма бити заснована на рачунарским симулацијама. У ту сврху биће кориштена два симулациона тестна система. Хомогени тестни систем сачињен од низа од 65 синхроних генератора, претходно описан у другом поглављу, приказан на сл. 2.5 биће искориштен за почетну анализу перформанси предложеног управљачког система. На основу закључака изведених анализом резултата симулација на поменутом тестном систему, предложени управљачки алгоритам биће тестиран и на моделу поједностављеног електроенергетског система Аустралије, познатом и под називом IEEE 59 тестни систем, који ће бити детаљно описан у наставку. Треба нагласити да је за потребе проучавања електромеханичких таласа потребно користити што је могуће веће тестне системе, са великим бројем синхроних генератора, будући да је таласни феномен тешко уочити на системима са малим бројем синхроних генератора. С тим у вези, сматра се да предложени тестни системи представљају добру основу за проучавање таласних појава, те да се резултати симулација добијени на основу оваквих тестних система могу сматрати валидним.

### 6.1 Тестни систем од низа синхроних генератора

Почетна анализа предложеног управљачког система биће извршена на претходно описаном хомогеном тестном систему сачињеном од низа од 65 синхроних генератора. Основни циљ је да се изучи утицај локације UPFC-а у систему на могућност потискивања таласа у односу на мјесто настанка квара у систему. У ову сврху биће формиран симулациони модел кориштењем софтвера MATLAB (Simulink) у складу са сл. 6.1.

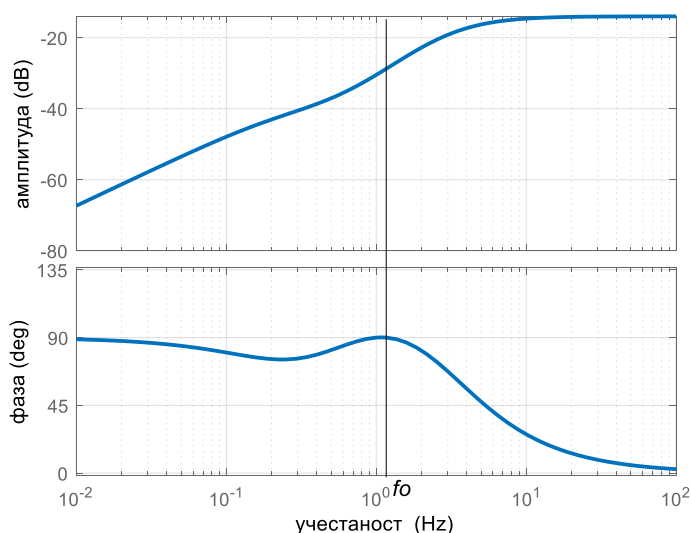


Сл. 6.1 – Шематски приказ хомогеног тестног система сачињеног из низа синхроних генератора погодног за анализу сузбијања ширења таласа

На сл. 6.1 приказан је хомогени тестни систем, претходно објашњен у другом поглављу, у присуству UPFC-а. Извор поремећаја у систему је први генератор у низу. Будући да се анализом приказаног тестног система у другом поглављу дошло до закључка да је поремећај механичке снаге синхроног генератора најзахтијевнији са аспекта сузбијања ширења осцилација кроз систем, изабрано је да се на првом генератору симулира овај тип поремећаја. Дакле, извор поремећаја у систему представља смањење механичке снаге на првом генератору са номиналне вриједности на вриједност од 0,75[r.j.] у трајању од 1[s]. Поремећај се дешава у тренутку  $t_I=20[s]$ .

У односу на извор поремећаја посматраће се двије локације на којима је смјештен UPFC. У случају који је на сл. 6.1 означен са А, UPFC је прикључен на сабирнице 2, односно на вод који спаја сабирнице 2 и 3. У овом случају UPFC се налази близу извора поремећаја. У случају означеном са Б (сл. 6.1), UPFC је смјештен на средини низа, на сабирницама 32, односно на надземном воду који спаја сабирнице 32 и 33. Може се закључити да је у случају Б, UPFC значајно удаљен од самог извора поремећаја, будући да дужина надземних водова код посматраног тестног система износи 100[km]. Циљ ове анализе је да се утврди утицај локације UPFC-а у систему на могућност сузбијања ширења таласа. Резултати добијени у оквиру ове симулације биће искориштени у сврху избора положаја UPFC-а у реалистичном окружењу поменутог IEEE 59 тестног система.

Сви ПИ регулатори у управљачком систему UPFC-а подешени су прелиминарно, без кориштења регулатора за сузбијање осцилација, путем покушаја и погрешки. Параметри ових регулатора дати су у Додатку В. Будући да се ради о нетипичном тестном систему, у овом случају није било потребе за кориштењем POD регулатора код оточног дијела управљачког система, будући да је UPFC смјештен на генераторским сабирницама те је динамика промјене амплитуде мрежног напона одређена управљачким системом синхроног генератора. Регулатор за модулацију импедансе подешен је кориштењем итеративне процедуре описане у претходном поглављу. На основу резултата симулација на посматраном тестном систему који су изложени у другом поглављу може се закључити да је учестаност електромеханичких осцилација у посматраном тестном систему једнака приближно  $f_o=1,2[Hz]$ , што је сврстава у међуобласни тип осцилација. На овој учестаности вршена је поправка фазне карактеристике у износу од  $\pi/2[rad]$ . Одговарајућа Бодеова карактеристика регулатора за потискивање импедансе дата је на сл. 6.2.



Сл. 6.2 – Бодеова карактеристика регулатора за модулацију импедансе за тестни систем од 65 генератора у низу

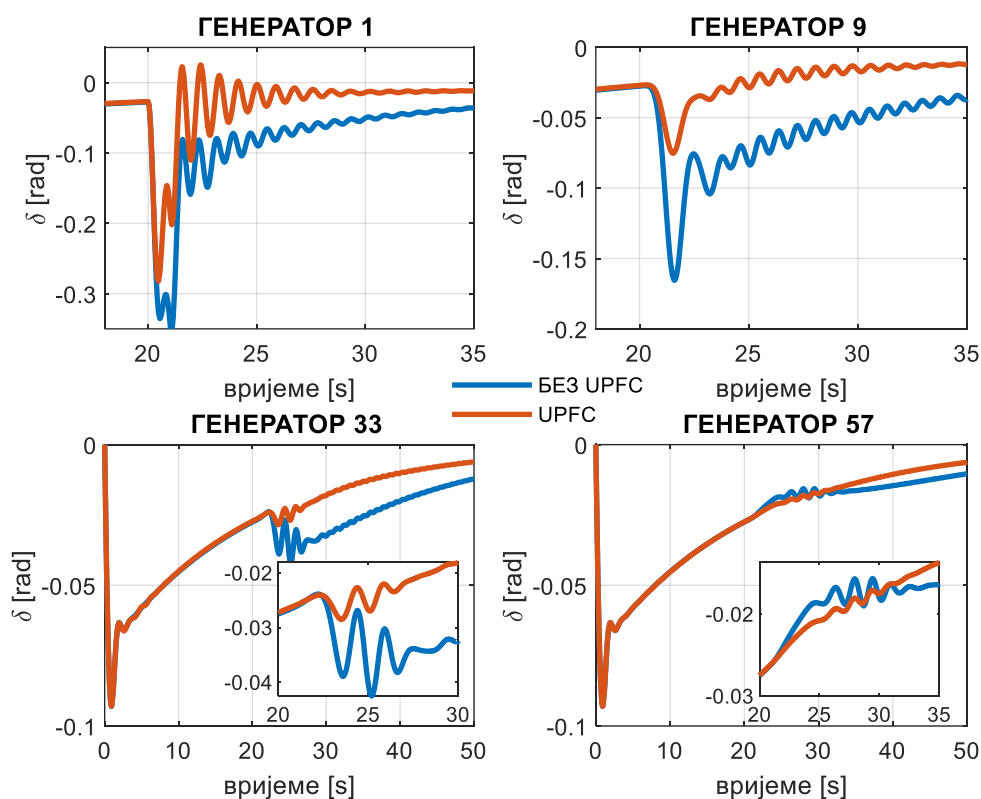
Са Бодеве карактеристике приказане на сл. 6.2. може се уочити да је у конкретном случају кориштен типичан начин подешавања регулатора за модулацију импедансе, као што је то случај са класичним POD регулатором или стабилизатором ЕЕС-а. Појачање регулатора изабрано је тако да на учестности осциловања укупно појачање износи приближно  $-30[\text{dB}]$ . Одговарајућа функција преноса посматраног регулатора за модулацију импедансе дата је са (6.1).

$$G_{RMI65}(s) = 0.2 \frac{s}{s+1.4} \frac{(s+3.9)^2}{(s+17.8)^2} . \quad (6.1)$$

Исти регулатор кориштен је у оба посматрана случаја А и Б.

### 6.1.1 Резултати симулације за случај А

У случају када је UPFC смјештен веома близу извора поремећаја, одговарајући временски облици угла оптерећења одговарајућих синхорних генератора у низу дати су на сл. 6.3.



Сл. 6.3 – Резултати симулације за тестни систем са 65 генератора са UPFC-ом на почетку низа (случај А)

На сл. 6.3 приказани су временски одзиви угла оптерећења четири синхрона генератора из посматраног низа. За посматрање резултата изабран је генератор 1, који представља извор поремећаја. Поред тога изабран је један генератор са почетка низа (генератор 9), један генератор са средине низа (генератор 33), те један генератор који се налази на крају низа (генератор 57). Црвеном бојом приказан је таласни облик угла оптерећења синхроног генератора у присуству UPFC-а, а плавом бојом иста величина у случају када се не користи UPFC-а у систему. На основу добијених резултата може се уочити да је извршено потискивање амплитуде осцилација угла оптерећења на свим генераторима. На

овај начин извршено је сузбијање ширења електромеханичког таласа, односно смањење амплитуде овог таласа што је и био основни циљ.

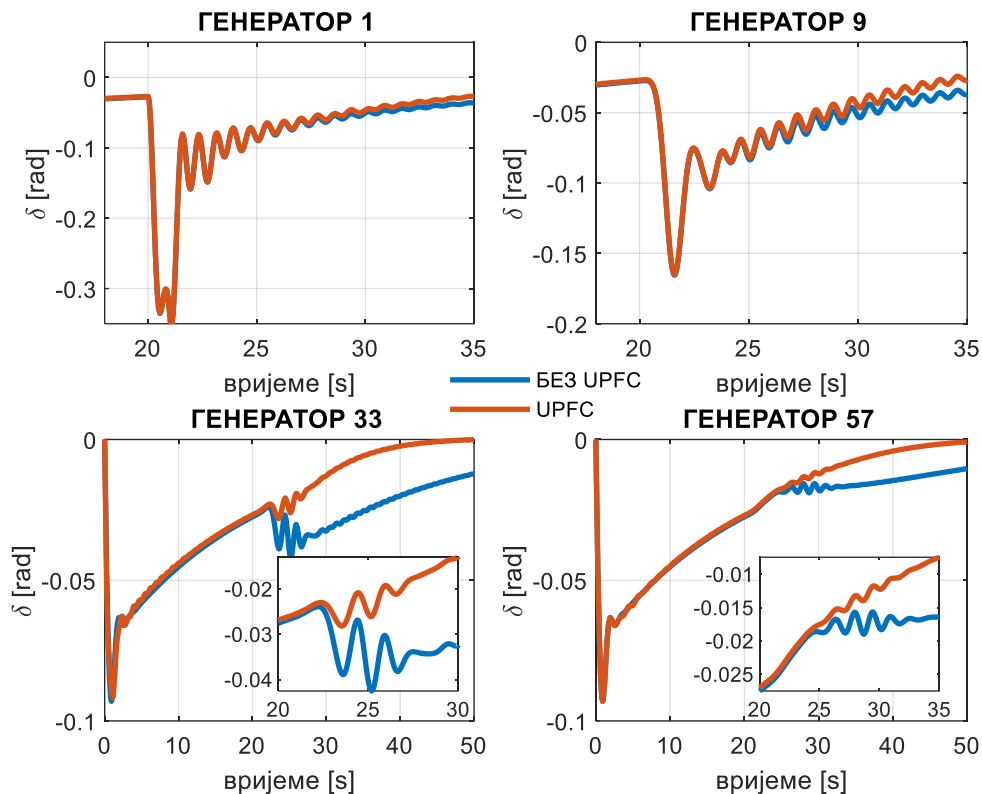
На првом генератору у низу, амплитуда прве осцилације у присуству UPFC-а смањена је за приближно 15,5% у односу на случај када се не користи UPFC. Међутим, треба уочити да у овом случају долази до накнадних осцилација чија је амплитуда већа него у случају када се не користи UPFC а које у потпуности ишчезавају за приближно 20[s] од тренутка настанка поремећаја. Узрок ових осцилација је близина UPFC-а. Дио таласа који путује од генератора 1 рефлектује се на сабирницама 2, будући да због присуства UPFC-а који врши модулацију импедансе на сусједном воду, наилази на тачку дисконтинуитета. Рефлектовани талас путује назад ка генератору 1 гдје поново наилази на тачку дисконтинуитета, која у овом случају представља бесконачну импедансу. Стога се талас поново рефлектује и путује назад ка сабирницама 2. Услјед тога долази до повећања осцилација на генератору 1. Другим ријечима, дио енергије таласа заробљен је у дијелу система између тачке настанка поремећаја и UPFC-а. Са становишта стабилности система, најкритичнија је прва осцилација, будући да је њена амплитуда најзначајнија. У овом случају је прва осцилација смањена, тако да остале осцилације, иако су повећане у односу на случај када се не користи UPFC, не могу довести до нестабилног рада цјелокупног система.

На генератору 9, који се налази на почетку низа, уочено је значајно смањење прве осцилације угла оптерећења које износи приближно 54.2%. Овим се потврђује да је трансмитовани талас значајно ослабљен у присуству UPFC-а чак и на самом почетку низа. Значајно слабљење таласа нарочито је уочљиво на генератору 33 који је смјештен на средини низа. Прва осцилација угла оптерећења на генератору 33 смањена је за приближно 73% у односу на случај када се не користи UPFC. Поред тога, уочљиво је да у присуству UPFC-а систем прије достиже стационарно стање, што је такође једна од предности кориштења предложеног управљачког система. Коначно, на крају низа, на генератору 57, посматрајући одзив са сл. 6.3 може се закључити да је талас практично у потпуности потиснут.

Резултати спроведене симулације су веома оптимистични и потврђују теоријска очекивања. Основни закључак је да се у присуству UPFC-а управљаног модулацијом редне импедансе вода постиже значајно смањење амплитуде електромеханичког таласа на свим генераторима у систему, а нарочито на генераторима који се налазе „иза“ UPFC-а посматрано у односу на тачку извора поремећаја, што је у складу са теоријским очекивањима. Треба имати у виду да дио таласа који осцилује између тачке извора поремећаја и UPFC-а може потенцијално изазвати повећање осцилација на посматраном дијелу система, на шта треба да се обрати значајна пажња.

### **6.1.2 Резултати симулације за случај Б**

Да би се подробније истражио утицај локације UPFC-а на могућност потискивања електромеханичког таласа, посматраће се и резултати симулације за случај Б, када је UPFC смјештен релативно далеко од извора поремећаја, на средини низа, на сабирницама 32. Аналогно резултатима симулације за случај А, одговарајући таласни облици угла оптерећења претходно поменути четири генератора од интереса приказана су на сл. 6.4.



Сл. 6.4 – Резултати симулације за тестни систем са 65 генератора са UPFC-ом на средини низа (случај Б)

Са сл. 6.4 може се уочити да се у случају када се UPFC налази на средини низа, не врши потискивање таласа у дијелу система који се налази између тачке извора поремећаја и самог UPFC-а, што у овом случају представља прва 32 генератора у низу. Евидентно је да се на генераторима 1 и 9 таласни облици угла оптерећења у случајевима са и без UPFC-а практично поклапају. Тек на средини низа, на генератору 33 долази до слабења електромеханичких осцилација, будући да је то први генератор „иза“ UPFC-а посматрано у односу на извор поремећаја. На генератору 57 може се уочити да су осцилације угла оптерећења практично потпуно потиснуте.

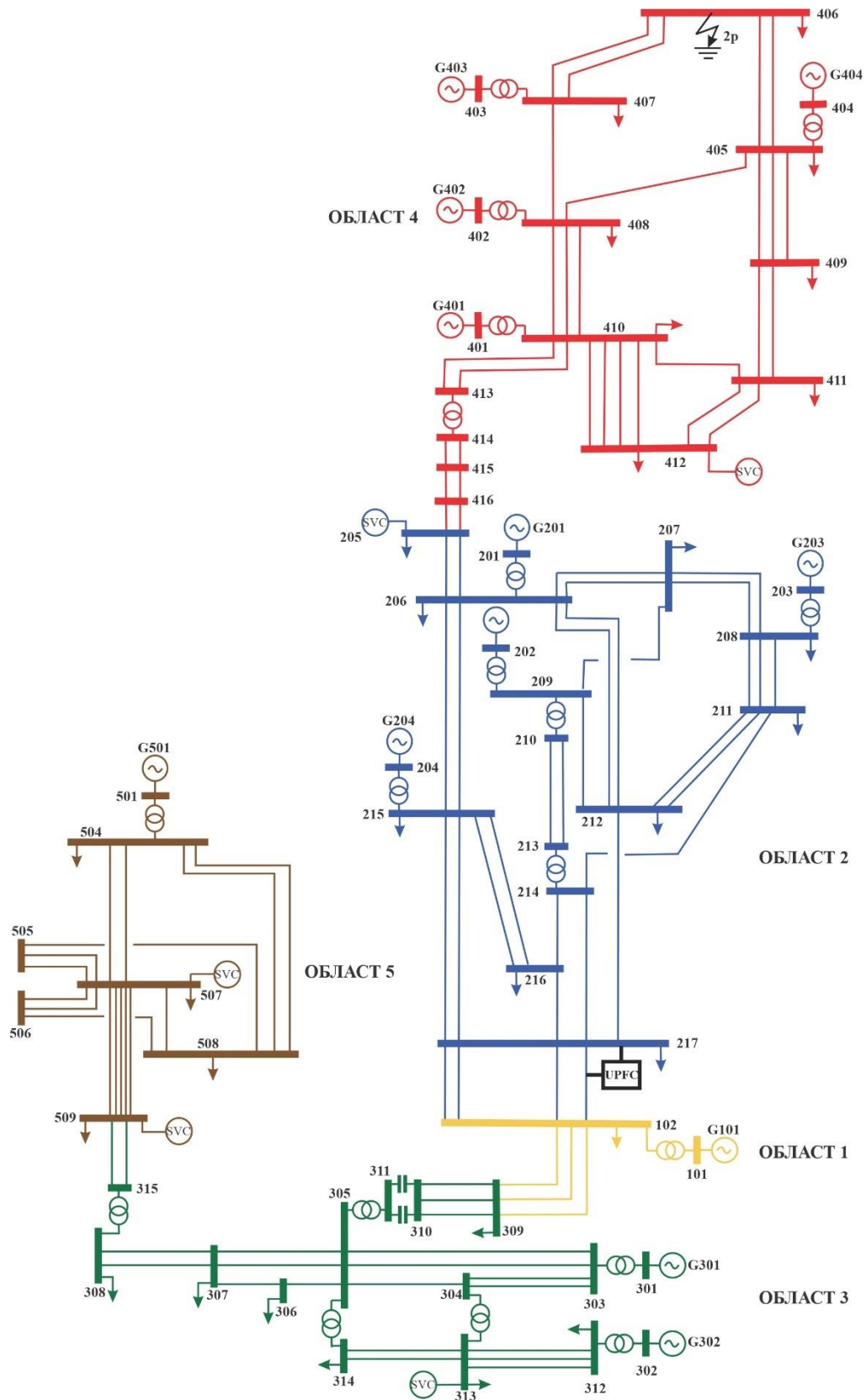
Према томе, на основу резултата симулације за случај Б, може се закључити да се најбољи резултати у смислу сузбијања ширења електромеханичког таласа добијају када се UPFC постави што ближе извору поремећаја. У том случају спрјечава се пропација таласа кроз систем у значајној мјери. Међутим, поремећаји у реалном електроенергетском систему су стохастичке природе и тешко их је предвидјети, што значајно отежава оптималан избор локације UPFC-а са становишта потискивања електромеханичких таласа. Стога је предложени управљачки систем UPFC-а потребно тестирати и на неком реалистичном електроенергетском систему у што је могуће захтијевнијим условима. У ту сврху одабран је IEEE 59 тестни систем, који ће у наставку бити детаљно описан и на бази којег ће бити тестиран предложени управљачки систем за сузбијање ширења електромеханичких таласа.

## 6.2 Тестни систем IEEE 59

У сврху тестирања перформанси предложеног управљачког система UPFC-а за потискивање електромеханичких таласа, биће искориштен поједностављени



електроенергетски систем Аустралије, односно IEEE тестни систем сачињен од 59 сабирница и 14 генератора, чија је топологија приказана на сл. 6.5.



Сл. 6.5 – Топологија тестног система IEEE 59

Са сл. 6.5 може се примјетити да је IEEE 59 тестни систем подијељен у пет засебних области означеним различитим бојама. Детаљан математички модел система дат је у [120], док је симулациони модел система за софтвер MATLAB (Simulink) дат у [121] и исти ће бити кориштен у овом раду. За извор поремећаја у систему изабран је двополни кратак спој са земљом преко отпорности од  $25[\Omega]$  на најсјевернијим сабирницама у систему (406). Овај тип кратког споја је најкритичнији у посматраном систему [120]. Будући да метални кратак спој тренутно доводи до нестабилности цјелокупног система и као такав није погодан за анализу управљачког система за сузбијање ширења таласа, струје кратког споја ограничене су отпорношћу од  $25[\Omega]$  како би систем након настанка квара остао стабилан. Изабрано је да је UPFC постављен на сабирнице 217, на један од четири паралелна надземна вода који спајају области 1 и 2. Локација UPFC-а одабрана је тако да се добије што захтијевнији случај са аспекта сузбијања ширења електромеханичких таласа. Будући да се из претходних резултата симулације дошло до закључка да се најбољи резултати добијају у случају када се UPFC постави што ближе мјесту квара, управо због тога је изабрано да у овом случају UPFC буде прилично удаљен од мјеста настанка квара како би се створили што захтијевнији услови за тестирање рада управљачког система. Са друге стране, изабрана локација UPFC-а приближно представља, географски гледано, средишњу тачку посматраног система. Треба нагласити да се у литератури може наћи велики број радова који се баве избором оптималне локације UPFC-а [122-125]. Међутим, оптимална локација UPFC-а бира се углавном са аспекта смањења губитака и побољшања напонских прилика [122], побољшања транзијентне стабилности [123] или најчешће оптималне расподеле токова снага у систему [124], [125]. Сматра се да ће се UPFC, као веома комплексан и скуп систем, првенствено градити да би се ријешили неки од претходно наведених системских проблема, те ће с тим у вези бити изабрана и његова оптимална локација. Управљачки систем за сузбијање ширења електромеханичких таласа би се у том случају користио као надоградња постојећем систему за управљање токовима снага, чија интеграција је, као што је показано у претходном поглављу, веома једноставна и практично изводљива. С тим у вези, у оквиру овог рада није бирана оптимална локација UPFC-а него је иста погодно одабрана како би се добили што захтијевнији услови са аспекта потискивања ширења електромеханичких таласа у систему.

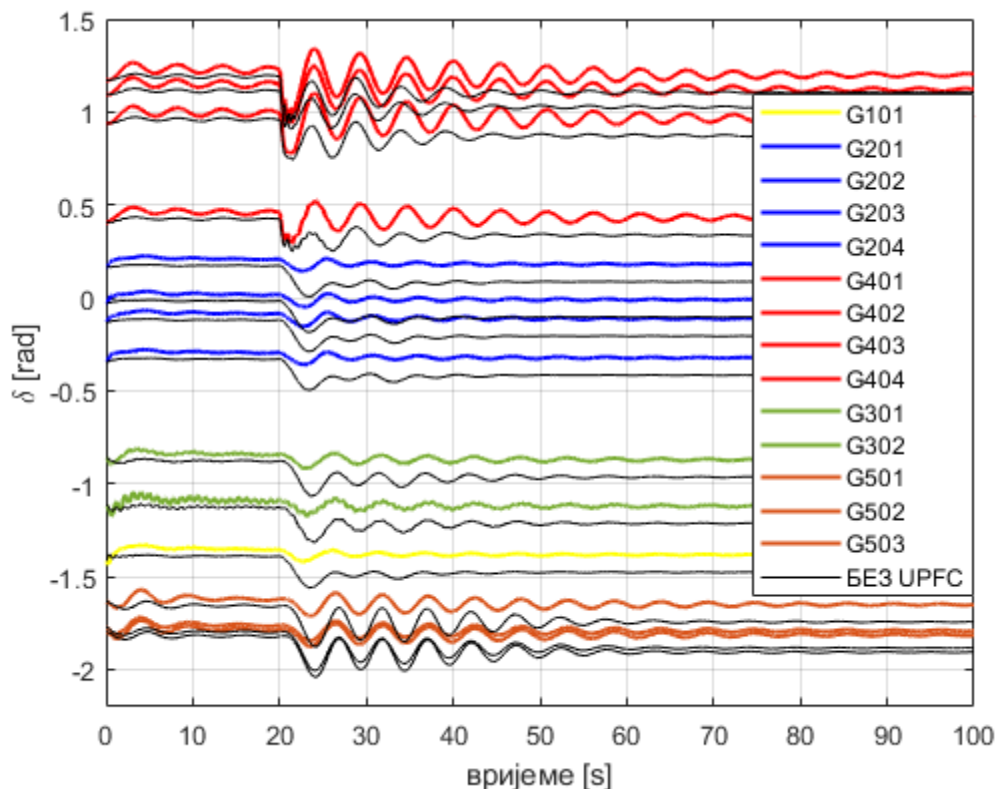
Подешавање управљачког система UPFC-а вршено је на сљедећи начин. Најприје су подешени одговарајући ПИ регулатори у систему како би се UPFC оспособио да успјешно одржава референтне вриједности активне и реактивне снаге, као и амплитуду напона на жељеном нивоу. Потом су у управљачки систем додати и регулатори за модулацију импедансе и напона, који су подешавани итеративном процедуром избором одговарајуће фазне компензације која треба да се оствари на учестаности осциловања. Поступак подешавања ових регулатора биће детаљно описан у наставку.

### 6.2.1 Резултати симулације за тестни систем IEEE 59

У сврху тестирања перформанси предложеног управљачког система за сузбијање ширења електромеханичких таласа, кориштен је симулациони модел система у MATLAB-у дат у [121]. Изабран је најкритичнији радни режим система који је у [120] окарактерисан као режим веома близак граници стабилности (енгл. *heavy load*), како би се створили што захтјевнији услови за рад управљачког система. Као што је претходно наглашено, поремећај у виду двополног кратког споја са земљом преко отпорности од  $25[\Omega]$  дешава се у тренутку  $t_p=20[s]$  на сабирницама 406, на напонском нивоу од  $330[kV]$ . Квар бива елиминасан након  $0,1[s]$ , што је вријеме потребно да одговарајуће заштите

потпуно елиминишу квар, укључујући и вријеме реаговања прекидача [120]. Укупна дужина трајања симулације износи 100[s].

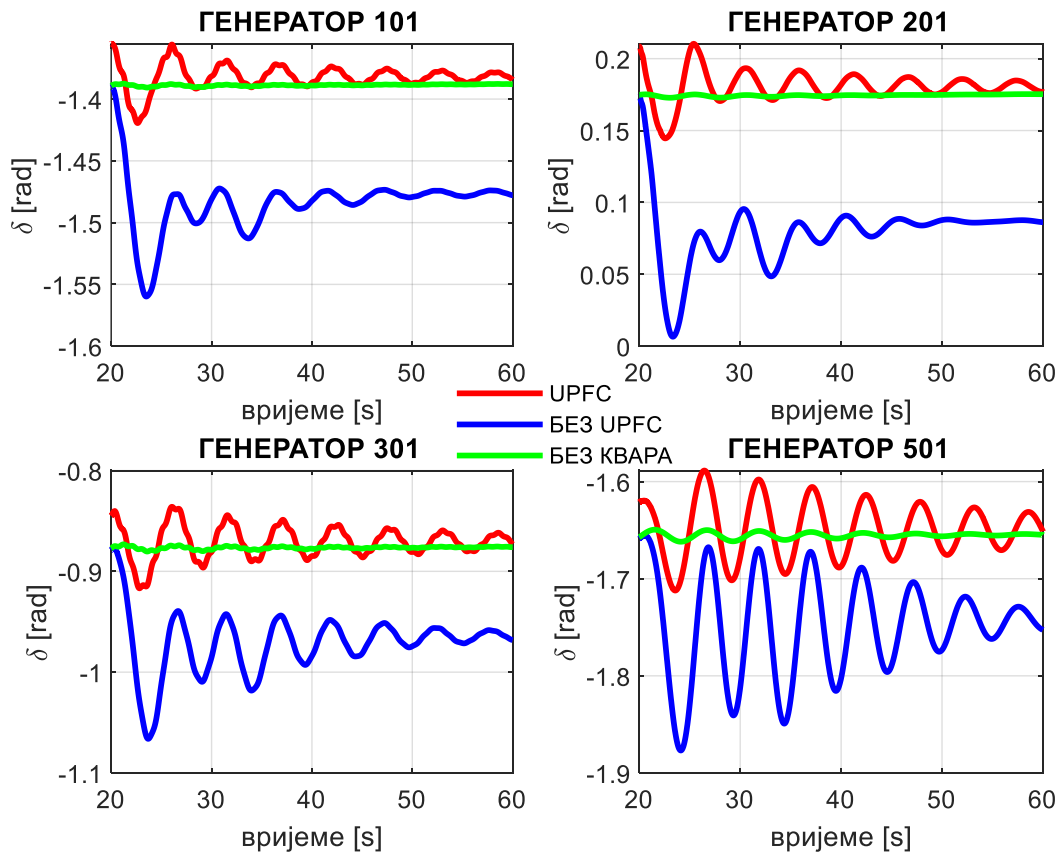
На сл. 6.6. приказани су таласни облици угла оптерећења синхроних генератора у систему у случају када се користи UPFC (обојено) те у случају када се у систему не користи UPFC (црна боја).



Сл. 6.6 – Таласни облици угла оптерећења синхроних генератора за IEEE 59 тестни систем у присуству UPFC-а (обојено) и без UPFC-а (црно)

Детаљним посматрањем резултата симулације са сл. 6.6 може се уочити значајно смањење осцилација у великом дијелу система. У области 4 се не може гарантовати да је дошло до смањења осцилација, те је стога потребно спровести детаљнију анализу.

На сл. 6.7 приказани су таласни облици угла оптерећења четири синхрона генератора, по једног из сваке области, осим области 4, која ће накнадно бити детаљно размотрена. У сврху детаљнијег приказа, таласни облици угла оптерећења на сл. 6.7 приказани су у временском распону од 20[s] до 60[s]. Плавом бојом приказани су таласни облици угла оптерећења у случају када се не користи UPFC у систему, црвеном бојом приказана је иста величина у случају када се користи UPFC у предложеном режиму рада, док су зеленом бојом означени таласни облици угла оптерећења синхроног генератора у случају када у систему није присутан UPFC али не постоји ни квар. Може се уочити да у случају када се користи UPFC углови оптерећења свих генератора, након настанка квара, попримају исту вриједност у стационарном стању као у случају када у систему не постоји квар. Другим ријечима, систем након настанка квара улази у исто стационарно стање у коме је радио прије настанка квара. У случају када се не користи UPFC у систему, након настанка квара систем улази у ново стационарно стање, различито од оног стања у коме је систем радио прије настанка квара.



Сл. 6.7 – Таласни облици угла оптерећења синхроних генератора за IEEE 59 тестни систем за генераторе 101, 201, 301 и 501

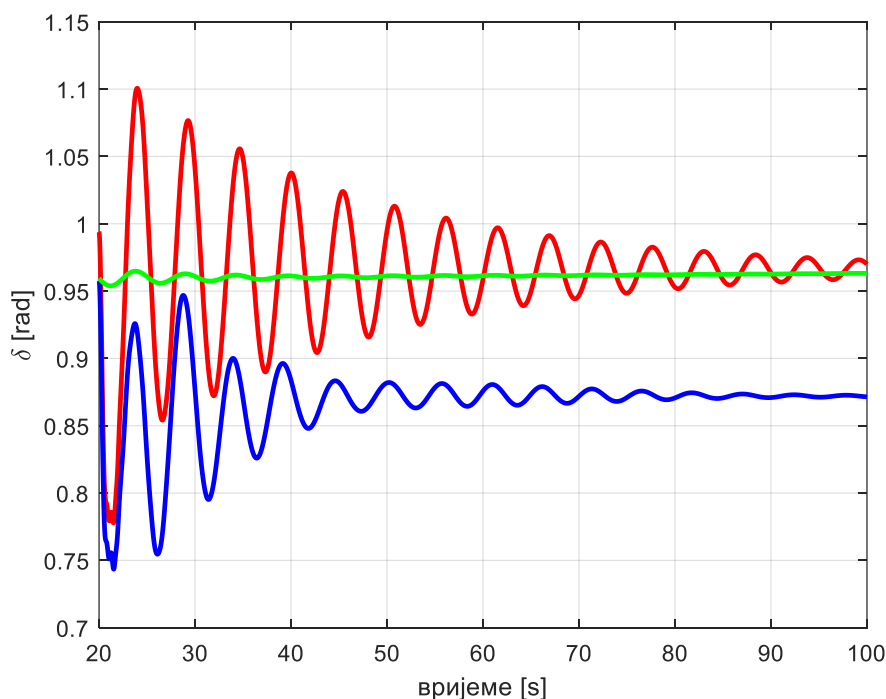
Детаљном анализом таласних облика са сл. 6.7 може се закључити да се код сва четири посматрана генератора јавља значајно смањење амплитуде прве осцилације угла оптерећења у случају када се користи UPFC у предложеном, импедантном, режиму рада. Најзначајније смањење амплитуде осцилација јавља се у областима 1 и 2, које су повезане путем UPFC-а. Конкретно, на генераторима 101 и 201 и смањење амплитуде прве осцилације угла оптерећења износи приближно 82,9% и 82,8% у односу на случај када у систему не постоји UPFC, респективно. На генератору 301 такође је забиљежено значајно смањење амплитуде прве осцилације угла оптерећења које износи приближно 80%. На генератору 501 који је најудаљенији од мјеста настанка квара, али и од UPFC-а, посматрано слабљење прве осцилације угла оптерећења износи приближно 75,6%. Генерално, може се закључити да се предложеним управљачким алгоритмом постиже значајно сузбијање ширења електромеханичког таласа кроз систем, што је и био један од основних циљева овог рада. Уочљиво је да се значајније смањење амплитуде осцилација јавља у областима које су ближе UPFC-у (области 1 и 2) док је код удаљенијих области, као што су области 3 и 5, ово смањење нешто мање изражено али и даље веома ефикасно.

Аутори у [53] су користили исти тестни систем за анализу сузбијања ширења електромеханичког таласа употребом, погодно управљаног, постојећег статичког напонског компензатора (енгл. *Static Voltage Compensator – SVC*) прикљученог на сабирнице 412, те је стога корисно добијене резултате упоредити са постојећим резултатима. Важно је истаћи да су аутори у [53] за сврху симулације користили исти радни режим који је кориштен у овом раду, с том разликом што је за потребе симулирања кориштен софтвер PSS/E за разлику од Simulink-а који је кориштен у овом раду. У сврху генерисања поремећаја у систему, аутори у [53] симулирали су трополни кратак спој на

сабирницама 406 у трајању од 0,26[s]. Уколико би се исти тип квара примијенио на овдје кориштени симулациони модел у Simulink-у, добио би се нестабилан систем, те стога није било могуће подесити једнаке услове као у [53]. Са друге стране, аутори симулационог модела наглашавају да је најкритичнији квар у систему двополни кратак спој са земљом, те да је реално вријеме отклањања квара 0,1[s] [121] што оправдава кориштење овакве поставке у овом раду. Због свега наведеног, нажалост, није могуће директно поредити резултате са онима у литератури. Међутим, и поред тога може се стећи извјестан увид у однос ефикасности предложених алгоритама.

На генератору 501, који је најудаљенији од извора поремећаја, аутори у [53] постигли су смањење амплитуде прве осцилације угла оптерећења у износу од приближно 11,49%, док је у овом случају то потискивање приближно 75,6%. Према томе, може се закључити да је предложени управљачки алгоритам за сузбијање ширења електроинергијских таласа неупоредиво ефикаснији у односу на једини алгоритам у литератури који је тестиран на реалистичном моделу електроенергетског система. Разлог значајно бољих резултата огледа се у чињеници да аутори у [53] користе искључиво модулацију амплитуде мрежног напона на сабирницама 412 за постизање управљачког циља, док се у овом раду паралелно са модулацијом напона користи и модулација реактансе вода у сврху смањења коефицијента трансмисије таласа, те се испоставља да је овакав принцип значајно супериорнији. Осим за генератор 501, у [53] нису наведени резултати за остале генераторе у систему, тако да није могуће извршити детаљније поређење.

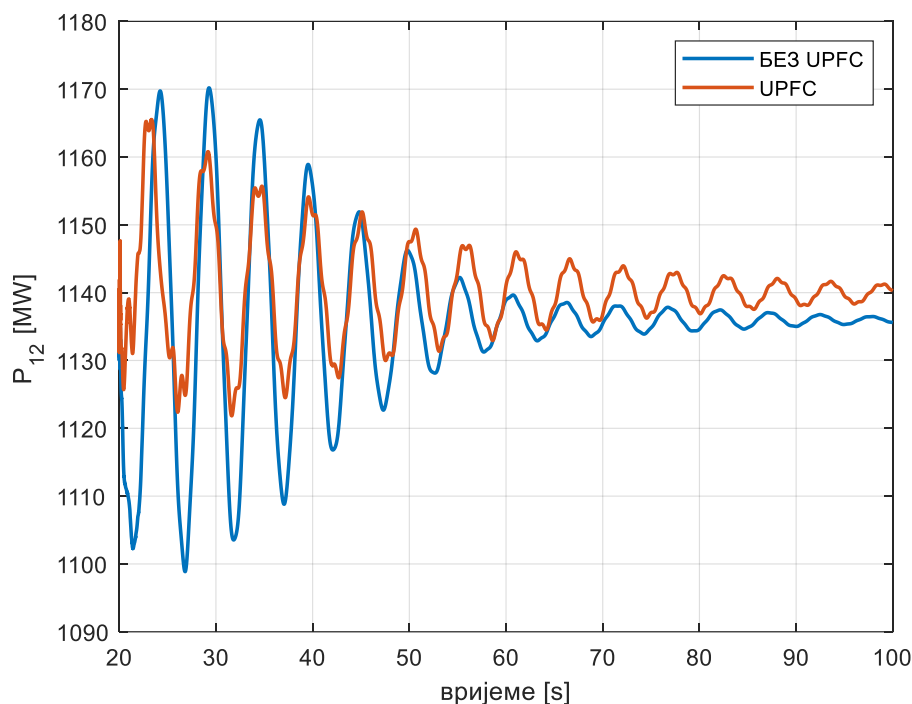
Још је преостало да се анализира ефекат предложеног управљачког система на генераторе у области 4 у којој се десио поремећај. С тим у вези, на сл. 6.8 дат је таласни облик угла оптерећења генератора у присуству UPFC-а (црвена боја), без UPFC-а (плава боја) и без UPFC-а и без квара (зелена боја).



Сл. 6.8 – Таласни облик угла оптерећења синхроног генератора 404 за IEEE 59 тестни систем

У складу са очекивањима, у области 4 у којој се десио поремећај а која је значајно удаљена од UPFC-а, долази до повећања амплитуде осцилација угла оптерећења генератора у односу на случај када се не користи UPFC што може да се види са сл. 6.8. Када се деси поремећај, инцидентни талас се шири кроз остатак система и доспијева до UPFC-а. У овој тачки талас се рефлектује и путује назад ка области 4 гдје се талас поново рефлектује од границе система. Ово је разлог због кога долази до повећања амплитуде осцилација на свим генераторима у области 4. На примјеру генератора 404 (сл. 6.8) може се уочити да је први екстрем угла оптерећења незнатно смањен док је други повећан за приближно 18% у односу на случај када се не користи UPFC. Ова појава је једини нежељени ефекат предложеног управљачког система. Међутим, уколико се са практичног аспекта сагледа цјелокупан учинак утицаја UPFC-а у предложеном радном режиму, може се закључити да се на укупно десет генератора добија значајно слабљење утицаја електромеханичког таласа, преко 75%, док се само на преостала четири генератора стационирана у области у којој је настао квар јавља повећање амплитуде осцилација за приближно 18%. Дио енергије таласа остаје доминантно стациониран у области гдје се десио поремећај што је и био почетни циљ. Битно је нагласити да систем након престанка квара остаје стабилан, што је најбитнији услов који је потребно испунити. Вријеме смирења угла оптерећења генератора 404 у овом случају продужено је за приближно 20[s] у односу на случај када се у систему не користи UPFC, што не угрожава рад цјелокупног система. Додатно, треба имати у виду да је разматран најзахтијевнији случај са аспекта управљања који подразумијева велику удаљеност UPFC-а од мјеста настанка квара, те радни режим система прије настанка квара који је близак граници стабилности и који се у пракси ријетко допушта.

Од нарочитог интереса је посматрање временског одзива активне снаге размјене између области 1 и 2, које су међусобно повезане UPFC-ом, а који је приказан на сл. 6.9. Плавом бојом приказана је активна снага размјене у случају када се не користи UPFC а црвеном иста величина у присуству UPFC-а.



Сл. 6.9 – Таласни облик активне снаге размјене између области 1 и 2 за IEEE 59 тестни систем

Са сл. 6.9 уочљиво је значајно смањење осцилација активне снаге  $P_{12}$  која се размјењује између области 1 и 2. Први екстрем у временском одзиву активне снаге смањен је за приближно 2,1%, што номинално износи око 23,7[MW]. Према томе, може се рећи да управљачки алгоритам намијењен сузбијању ширења електромеханичких таласа ефикасно утиче и на смањење осцилација активне снаге у систему, што је изузетно битно са аспекта транзијентне стабилности система и напрезања електроенергетске опреме.

Као резиме ове анализе може се истаћи успјешност предложеног управљачког алгоритма UPFC-а да изврши ефикасно потискивање ширења електромеханичког таласа у реалним условима експлоатације, која је у складу са теоријским очекивањима. Основна мана предложеног управљачког алгоритма огледа се у чињеници да се у области која представља извор поремећаја може јавити повећање осцилација угла оптерећења синхроних генератора у односу на случај када се не користи UPFC. Међутим, на практичном примјеру приказано је да ове осцилације не угрожавају стабилан рад система и незнатне су са аспекта бенефита који се постижу примјеном предложеног управљања. Поред сузбијања ширења електромеханичких таласа, алгоритам ефикасно врши и смањење осцилација активне снаге у систему што је још једна значајна претпоставка за практичну употребу.

У наставку ће се дати опис процедуре подешавања регулатора за модулацију импедансе и регулатора за модулацију напона, као што је то раније наведено.

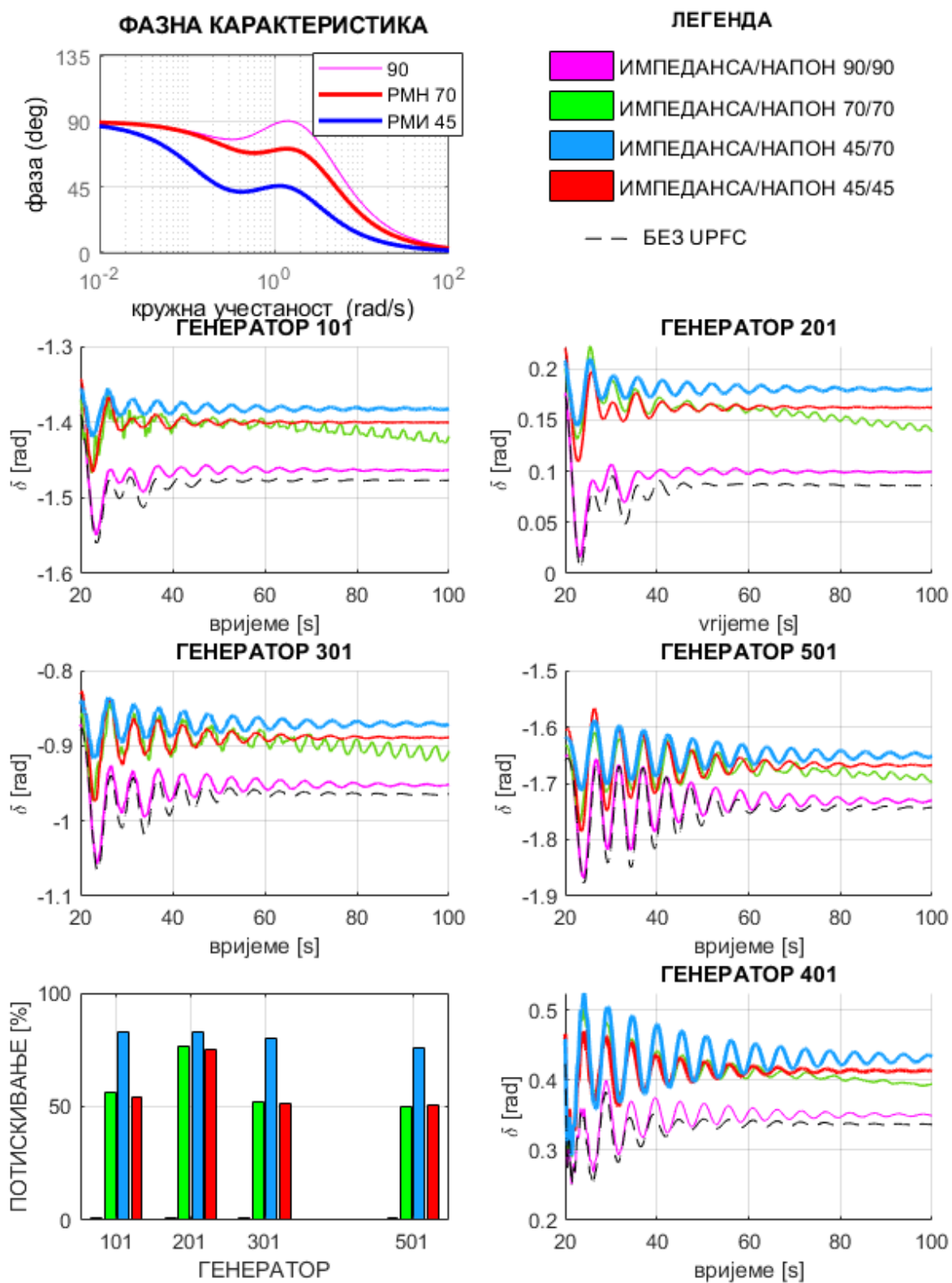
### 6.2.2 Процедура подешавања регулатора

Раније је наглашено да су приликом подешавања параметара управљачког система UPFC-а прво подешени параметри ПИ регулатора методом покушаја и погрешки. Након тога, у систем су додати регулатор за модулацију импедансе (РМИ) и регулатор за модулацију напона (РМН). Подешавање ова два регулатора вршено је итеративном методом, избором одговарајуће фазне компензације на учестаности осциловања за коју је, помоћу рачунарских симулација, утврђено да износи приближно 0,2[Hz], при чему одговарајућа кружна учестаност износи 1,2[rad/s]. Треба напоменути да је као улаз оба регулатора кориштена девијација угла оптерећења генератора 204 који смјештен релативно близу UPFC-а.

На учестаности осциловања, изабране су три карактеристичне фазне карактеристике приказане на сл. 6.10 и то са компензацијом од 90° (роза), компензацијом од 70° (црвена боја) и компензацијом од 45° (плава боја). Да би се што детаљније испитао утицај фазне компензације регулатора на сузбијање ширења електромеханичког таласа, потребно је посматрати укупно девет могућности, будући да постоје два регулатора и три дефинисане фазне карактеристике. Међутим, да би се смањила конфузност приказа резултата а да би се ипак вјеродостојно демонстрирао поступак подешавања регулатора, на сл. 6.10 приказани су одзиви по једног генератора из сваке од посматраних области IEEE 59 тестног система за четири различите комбинације фазних компензација регулатора модулације импедансе и регулатора за модулацију напона. На сл. 6.10 приказани су временски одзиви угла оптерећења синхроних генератора у случајевима када је извршена фазна компензација оба регулатора од 90° (роза боја), затим фазна компензација оба регулатора у вриједности од 70° (зелена боја), фазна компензација оба регулатора у износу од 45°, те фазна компензација регулатора за модулацију импедансе од 45° а регулатора напона у вриједности од 70° (плава боја). Испрекиданом линијом приказан је одзив система у случају када се не користи UPFC.

Са сл. 6.10 може се уочити да у случају фазне компензације од 90° код оба регулатора (роза боја) не добија се значајно потискивање амплитуде осцилација угла

оптерећења посматраних генератора. Са сл. 6.10 може се примјетити да у овом случају смањење осцилација износи у просјеку свега око 1%, што је незнатно.



Сл. 6.10 – Илустративни приказ подешавања регулатора за модулацију импедансе и регулатора за модулацију напона



Према томе, закључак је да у посматраном случају, типична фазна компензација од  $90^\circ$  није најпогоднија, те да је неопходно испитати и друге могућности.

У случају када се износ фазне компензације смањи на  $70^\circ$  код оба регулатора, добијају се одзиви угла оптерећења генератора приказани зеленом бојом на сл. 6.10. Очигледно се смањењем износа фазне компензације добијају значајно бољи резултати, при чему се у посматраном случају добија смањење амплитуде осцилација за просјечно 50% на свим генераторима осим на генератору 401 који се налази у области у којој се десио поремећај. На овом генератору, очекивано, долази до пораста осцилација из претходно описаних разлога. Додатно, треба уочити да при оваквим поставкама регулатора за модулацију импедансе и напона систем није у стању да, након настанка квара, задржи стационарно стање у коме је радио прије настанка квара. Тачније, посматрањем одзива угла оптерећења генератора из области 1, 2, 3 и 5 на самом крају симулационог интервала, може се уочити да у овом случају одзиви и не улазе у стационарно стање него у квазистационарно стање, будући да осцилације у одзивима не ишчезавају. Поред тога, посматране осцилације у квазистационарном стању имају учестаност од 0,3[Hz], те се не поклапају са основним модом електромеханичких осцилација који износи 0,2[Hz]. Стога, иако утичу на значајно смањење електромеханичких осцилација, овакве поставке регулатора за модулацију импедансе и напона нису практично пожељне.

Уколико се додатно смањи фазна компензација оба регулатора и то на вриједност од  $45^\circ$  добијају се временски одзиви угла оптерећења посматраних генератора приказани црвеном бојом на сл. 6.10. У односу на претходно посматрани случај, може се закључити да је у овом случају значајно поправљено само смањење осцилација на генератору 201, које сада износи око 75%, док је на свим осталим генераторима уочено готово једнако слабљење осцилација као и за претходни случај, у просјеку око 50%. Међутим, у овом случају елиминисане су осцилације у стационарном стању, што је значајна предност у односу на претходно разматрани случај.

Даљим спровођењем овакве анализе дошло се до закључка да се најбољи резултати у погледу одзива угла оптерећења посматраних генератора добијају за случај када се користи фазна компензација регулатора импедансе у износу од  $45^\circ$  (на фазној карактеристици на сл. 6.10 означена плавом бојом) те фазна компензација регулатора за модулацију напона у износу од  $70^\circ$  (на фазној карактеристици на сл. 6.10 означена црвеном бојом). Функције преноса споменутих регулатора дате су једначинама (6.2) и (6.3), респективно, при чему треба нагласити да су појачања регулатора бирана тако да се на учестаности осцилација добија слабљење од приближно 20[dB], за које се експериментално испоставило да дају најбоље резултате са аспекта смањења осцилација.

$$G_{RMI}(s) = 0.25 \frac{s}{s+0.15} \frac{(s+1)^2}{(s+2)^2} \quad (6.2)$$

$$G_{RMN}(s) = 2 \frac{s}{s+0.4} \frac{(s+1.15)^2}{(s+3.3)^2} \quad (6.3)$$

Одзиви угла оптерећења синхроних генератора за овај случај приказани су плавом бојом на сл. 6.10 и једнаки су претходно приказаним одзивима приказаним на сл. 6.8 и сл. 6.9. У овом случају добија се, претходно описано слабљење осцилација у износу од приближно 80%, што је најбољи забиљежен резултат. Поред тога, битно је уочити да се, у случају када се користи фазна компензација од  $70^\circ$  за оба регулатора, добијају значајно

мање осцилације угла оптерећења генератора 401 у односу на случај фазних компензација импедантног и напонског регулатора у износима од  $45^\circ$  и  $70^\circ$ , респективно. Међутим, као што је раније истакнуто, слабљење осцилација на осталим генераторима у систему је значајно мање у случају фазне компензације оба регулатора у износу од  $70^\circ$ . Према томе, може се закључити да се на вриједност осцилација на генераторима који се налазе у области извора поремећаја, може утицати правилним избором параметара регулатора за модулацију импедансе и напона. Уколико је потребно, на уштрб смањења нивоа потискивања електромеханичког таласа у остатку система, могуће је смањити осцилације на критичним генераторима који се налазе у области настанка квара. У овом случају изабрана је варијанта у којој су допуштене значајније осцилације у области настанка квара, док су осцилације у остатку система потиснуте у највећој могућој мјери. На основу свега наведеног може се закључити да избор параметара регулатора за модулацију импедансе и напона није једнозначан и представља ствар компромиса и техничких захтијева за конкретан систем.

## 7 ЗАКЉУЧАК

Кроз овај рад обрађена је релативно комплексна и савремена проблематика модерних електроенергетских система која се тиче математичког моделовања и сузбијања ширења електромеханичких таласа у систему. На почетку рада постављена су два основна циља: извођење математичког модела електромеханичког таласа на темељу Ојлер – Лагранжове једначине и развој и тестирање управљачког система за сузбијање ширења електромеханичких таласа. На путу до остварења зацртаних циљева дошло се до већег броја корисних закључака.

Са аспекта математичког моделовања електромеханичких таласа, потврђена је полазна хипотеза да је овај математички модел могуће извести на бази Ојлер – Лагранжове диференцијалне једначине гдје се као лагранжијан система користи разлика кинетичке и потенцијалне енергије у систему. Испоставило се да је предложени поступак моделовања електромеханичког таласа значајно елегантнији у поређењу са свим тренутно постојећим моделима. Поступак извођења је директан и једноставан, заснован на универзалним величинама као што су енергије и стога је лако примјенљив на друге системе који се баве таласном проблематиком, што истиче његову предност у односу на остале моделе из литературе чије је извођење углавном стриктно везано за појаве електромеханичке природе. Будући да је добијени математички модел идентичан као референтни математички модел који се тренутно користи као база за изучавање електромеханичких таласа, закључује се да је предложени модел практично употребљив и конкурентан са постојећим моделима од нарочитог значаја за предметну област истраживања. У поступку извођења математичког модела успјешно је отклоњен захтијеван изазов у погледу уврштавања просторно расподијељених губитака у Ојлер – Лагранжову једначину, чиме су потенцијали Ојлер – Лагранжове једначине у поступку математичког моделовања са временског домена проширене и на просторни домен, што је од изузетног значаја за моделовање таласа. Верификација предложеног математичког модела извршена је помоћу одговарајућих рачунарских симулација гдје је уочен значајан степен подударности резултата симулације и теоријских очекивања проистеклих из самог модела, чиме је вјеродостојност модела додатно потврђена.

На бази предложеног математичког модела, изведен је управљачки закон за потребе сузбијања ширења електромеханичких таласа. И у овом случају потврђена је полазна хипотеза да је могуће извршити потискивање електромеханичког таласа у систему промјеном коефицијента трансмисије таласа у погодну одабрану тачку система. Анализом изведене таласне једначине дошло се до битног закључка да на коефицијент трансмисије електромеханичког таласа доминантно утиче подужна импеданса вода, а у мањој мјери и модуо напона мреже у посматраној тачки. Ови закључци су успјешно верификовани помоћу одговарајућих рачунарских симулација. У сврху управљања активном отпорношћу и реактансом надземног вода, као и амплитудом мрежног напона, испоставило се да је најприкладније користити унифицирани контролер токова снага (UPFC). Стога је овај уређај такође био предмет детаљног истраживања у оквиру дисертације.

Испоставља се да је UPFC веома комплексан и скуп технички систем, те да тренутно у свијету постоји свега шест уређаја. Међутим, дошло се до закључка да је у скороје вријеме технологија израде енергетских претварача, који се користе као основна структурна јединица UPFC-а, значајно напредовала и омогућила је смањење цијене

израде уређаја, освајање виших напонских нивоа као и генерисање виших прекидачких учестаности, чиме су отворена врата за масовнију употребу ових уређаја у будућности.

Изведени управљачки закон за потребе сузбијања ширења електромеханичких таласа имплементиран је у оквирима постојећих управљачких система UPFC-а који се тренутно у пракси користе за потребе управљања токовима активних и реактивних снага. На тај начин учињен је један додатни искорак са техничког аспекта који би омогућио једноставнију практичну имплементацију предложеног управљачког система у оквиру постојећих UPFC уређаја. Сам управљачки систем базиран је на раду регулатора за модулацију импедансе и регулатора за модулацију напона. Као улазни сигнали ових уређаја користи се девијација угла оптерећења одговарајућег синхроног генератора. Излазни, модулишући, сигнали ових регулатора задужени су за адекватну модулацију активне отпорности и реактнине надземног вода као и модула мрежног напона у тачки прикључка UPFC-а на мрежу како би се остварио задати управљачки циљ који подразумева смањење амплитуде електромеханичког таласа у систему.

Овако конципиран управљачки систем тестиран је на два карактеристична тестна система: хомогеном тестном систему сачињеном од низа од 65 синхроних генератора, те на поједностављеном моделу електроенергетског система Аустралије, познатом под називом IEEE 59 тестни систем. Прелиминарна тестирања предложеног управљачког система на низу од 65 синхроних генератора показала су значајно смањење осцилација угла оптерећења синхроних генератора који се налазе „иза“ UPFC-а посматрано у односу на тачку извора поремећаја. На генераторима који се налази између UPFC-а и тачке извора поремећаја у овом случају није забиљежено значајно смањење амплитуде таласа. Важно је истаћи да су сви резултати симулација у складу са теоријским очекивањима.

Да би се на детаљнији начин испитала ефикасност предложеног управљачког система, тестирање је извршено и на реалистичном IEEE 59 тестном систему сачињеном од 59 сабирница и 14 синхроних генератора распоређених у пет области. Изабрани су веома сложени услови са аспекта управљања који подразумевају радни режим система прије квара који је веома близак граници стабилности те извор поремећаја у виду двополног кратког споја са земљом који се за посматрани систем сматра најзахтијевнијим. Додатно, локација UPFC-а изабрана је на споју области 1 и 2 које су значајно удаљене од мјеста настанка квара, што на бази закључка изведеног на основу симулација на низу од 65 генератора, представља нарочито захтијеван задатак. При овако комплексним условима, кориштењем предложеног управљачког система постигнуто је смањење прве осцилације угла оптерећења синхроног генератора од приближно 83% на генератору из области 1 до приближно 76% на генератору у области 5 који је најудаљенији од UPFC-а и од тачке извора поремећаја, гледано у односу на случај када се у систему при истом поремећају не користи UPFC. Може се закључити да су добијени резултати потискивања осцилација у систему веома значајни. То се нарочито истиче поређењем добијених резултата са јединим резултатима забиљеженим у литератури, гдје се на истом тестном систему, на генератору у области 5 постигло слабљење осцилација од приближно 11,5%, што је значајно скромније у односу на овдје поменутих 76%. Међутим, треба истаћи да због различитих типова извора поремећаја и различитих симулационих софтвера, директно поређење овдје истакнутих резултата са резултатима из литературе није могуће, али и поред тога може се стећи утисак о супериорности предложеног алгорита.

На свим осталим генераторима у систему забиљежено је смањење осцилација угла оптерећења у вриједности између 76% и 83% осим на генераторима у области 4 у којој је смјештен сам извор поремећаја. У овој области дошло је до повећања осцилација у

износу од приближно 18% у односу на режим рада без UPFC-а што је једини недостатак предложеног управљања. Разлог овог повећања огледа се у чињеници да је извор поремећаја смјештен на саму границу система те дио таласа осцилује између тачке настанка поремећаја и UPFC-а, што је и теоријски очекивано. При томе је остварено и смањење осцилација активне снаге која се размјењује између области 1 и 2, повезаних UPFC-ом, за приближно 2,1%, из чега се изводи закључак да UPFC у предложеном управљачком режиму рада индиректно утиче и на смањење осцилација активне снаге у систему што је нарочито битно са аспекта транзијентне стабилности система.

Треба напоменути да се детаљном анализом избора параметара регулатора за модулацију импедансе и модулацију напона дошло до закључка да је погодним избором износа фазне компензације који поменути регулатори треба да унесу у систем на учестаности електромеханичких осцилација могуће постићи значајно смањење осцилација угла оптерећења генератора у области у којој се десио поремећај на уштрб повећања осцилација у другим областима. Конкретно, уколико се параметри регулатора изаберу тако да оба регулатора за модулацију уносе корекцију фазе на учестаности осциловања у износу од  $45^\circ$ , тада је могуће постићи да осцилације угла оптерећења генератора у области у којој се десио поремећај не прелазе 2%. У том случају у осталим областима смањење осцилација угла оптерећења генератора износило би приближно 50%, док у би ово смањење у области 2 било нешто значајније и износило би око 75%. Треба истаћи да је и овакав резултат је такође веома значајан и практично употребљив. Према томе, закључује се да се погодним избором параметара предложених регулатора може постићи извјестан компромис са техничког аспекта што је додатна предност предложеног управљања.

Конечно, када се сумирају сви изнесени резултати рада, може се закључити да су сви задати циљеви дисертације успјешно испуњени, те да поред теоријског аспекта посједују и практичну конотацију и као такви могу бити кандидат за тестирање на реалним системима.

На бази истраживања спроведеног у оквиру овог рада, дошло се до бројних идеја и наговјештава за будућа истраживања. Прије свега, потребно је детаљно истражити могућности простирања и потискивања таласа у електроенергетским системима са значајним удјелом обновљивих извора енергије који се путем енергетске електронике вежу са системом, будући да је степен пенетрације обновљивих извора временом све већи. У оквиру тога, нарочито је интересантно обратити пажњу на могућност самих обновљивих извора да врше сузбијање ширења електромеханичких таласа. Ово би захтијевало и проширење математичког модела електромеханичког таласа на потенцијално нехомогени модел у присуству обновљивих извора помоћу којег би се детаљније сагледали сви таласни феномени у комплекснијим условима. Један од будућих праваца истраживања може се тицати и оптималног избора генератора у систему чија се девијација угла оптерећења користи као улаз предложеног управљачког система, будући да је у овом раду одабран генератор који је физички најближи UPFC-у, што не потврђује оптималност избора, међутим даје значајно добре резултате. Конечно, употреба управљачких алгоритама UPFC-а базираних на методама вјештачке интелигенције може такође да представља једно усмјерење ка изналажењу нових и ефикаснијих метода за сузбијање ширења електромеханичких таласа.

## 8 ЛІТЕРАТУРА

- [1] A. Semlyen, "Analysis of disturbance propagation in power systems based on a homogenous dynamic model," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, no. 2, pp. 676–84, March 1974.
- [2] R. L. Cresap, J. F. Hauer, "Emergence of a new swing mode in the western power system," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-100, no. 4, pp. 2037–2045, Apr. 1981.
- [3] J. S. Thorp, C. E. Seyler, A. G. Phadke, "Electromechanical wave propagation in large electric power systems," IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl., vol. 45, no. 6, pp. 614–622, Jun. 1998.
- [4] D. Wang, X. Wang, J. S. Thorp, "Study on electromechanical wave continuum model for power systems in mechanics," 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, QC, Canada, pp. 9, 2006
- [5] D. Wang, X. Wang, Y. Fang, W. Hao, "Study on Dynamic Characteristics of Electromechanical Wave in the Continuum Model for Power System," 2006 International Conference on Power System Technology, Chongqing, China, pp. 1-7, 2006.
- [6] M. Parashar, J. S. Thorp, C. E. Seyler, "Continuum Modeling of Electromechanical Dynamics in Large-Scale Power Systems," IEEE Transactions on Circuits and Systems - I: Regular Papers, vol. 51, no. 9, pp. 1-7, 2004.
- [7] T. Bi, J. Qin, Y. Yan, H. Liu, K. E. Martin, "Disturbance propagation mechanism based on the electromechanical wave theory," IET Generation, Distribution and Transmission, vol. 10, no. 12, pp. 2891–2898, 2016.
- [8] A. J. Thomas, S. M. Mahajan, "Electromechanical Wave Analysis Through Transient Magnetic Modeling," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 24, no. 4, pp. 2336-2343, Oct. 2009.
- [9] D. Wang, X. Wang, "Analysis on Electromechanical Disturbance Propagation in a Finite Length Uniform Chain Discrete Power System," 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, China, pp. 1-4, 2010.
- [10] Y. Yan, W. Bao, H. Zhang, B. Liu, L. Xin, "Study of the disturbance propagation in the discrete model of power networks," 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha, China, pp. 2436-2441, 2015.
- [11] D. Wang, X. Wang, "Analytical study on electromechanical wave propagation in a non-uniform continuum power system," 2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, China, pp. 958-963, 2008.
- [12] D. Huang, J. Qin, H. Liu, J. H. Chow, J. Zhao, T. Bi, L. Mili, Q. Yang, "An Analytical Method for Disturbance Propagation Investigation Based on the Electromechanical Wave Approach," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 36, no. 2, pp. 991-1001, March 2021.
- [13] D. Wang, N. Ma, C. Guo, "Characteristics of electromechanical disturbance propagation in non-uniform power systems," IET Generation, Distribution and Transmission, vol. 11, no. 8, pp. 1919-1925, May 2017.

- [14] Y. Yan, T. Bi, S. M, Q. Yang, "The sectionalized homogeneous model of power systems and its analytical solution," 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, Canada, pp. 1-5, 2013.
- [15] Y. Xu, F. Wen, G. Ledwich, Y. Xue, "Electromechanical wave in power systems: theory and applications," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 2, no. 2, pp. 163-172, 2014.
- [16] G. Tzounas, I. Dassios, F. Milano, "Frequency Divider as a Continuum," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 6, pp. 4970-4973, Nov. 2022.
- [17] J. Nutaro, V. Protopopescu, "A New Model of Frequency Delay in Power Systems," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 59, no. 11, pp. 840-844, Nov. 2012.
- [18] A. Semerow, L. Muth and M. Luther, "Simulation Study on Electromechanical Disturbance Propagation in Large Power System," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 3, pp. 155-161, 2015.
- [19] T. Li, G. Ledwich, Y. Mishra, "Role of electromechanical wave propagation in power systems," 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, Canada, pp. 1-5, 2013.
- [20] U. Rudez, R. Mihalic, "A method of detecting the time of arrival for an electromechanical wave in large power systems," 2013 IEEE Grenoble Conference, Grenoble, France, pp. 1-6, 2013.
- [21] U. Rudez, R. Mihalic, "Understanding the electromechanical wave propagation speed," 2013 IREP Symposium Bulk Power System Dynamics and Control - IX Optimization, Security and Control of the Emerging Power Grid, Rethymno, Greece, pp. 1-8, 2013.
- [22] L. Wang, D. Yang, G. Cai, J. Ma, J. Tian, B. Wang, "Synchronised ambient data-driven electromechanical oscillation modes extraction for interconnected power systems using the output-only observer/Kalman filter identification method," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 19, pp. 4000-4009, 2020.
- [23] P. Huynh, Q. Chen, A. Elbanna, H. Zhu, "Studying the Electromechanical Oscillations using Ambient Synchrophasor Data," *Proc. 10th Bulk Power Systems Dynamics & Control Symp.(IREP)*, 2017.
- [24] J. Qin, W. Wu, J. Yang, L. Song, D. Zhang, J. Zhang, "An on-line Disturbance Location Algorithm for Power Networks Based on Electromechanical Waves Theory," 2020 4th International Conference on HVDC (HVDC), Xi'an, China, pp. 802-807, 2020.
- [25] C. Chen, B. Hu, X. Wang, "Simulation Study on Electromechanical Disturbance Propagation in Large Power System," *Journal of Power and Energy Engineering*, vol. 3, pp. 155-161, 2015.
- [26] A. Semerow, L. Muth, M. Luther, "Investigation of impacts on the disturbance propagation in power systems," 2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON), Wollongong, NSW, Australia, pp. 1-6, 2016.
- [27] T. Li, G. Ledwich, Y. Mishra, J. Chow, "Power system stability implications from electromechanical wave propagation," 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Brisbane, QLD, Australia, pp. 1-5, 2015.

- [28] D. Wang, Y. Li, N. Ma, "Dynamic mechanism on electromechanical wave propagation in power systems," 2014 International Conference on Power System Technology, Chengdu, China, pp. 480-484, 2014.
- [29] S. J. Tsai et al., "Frequency Sensitivity and Electromechanical Propagation Simulation Study in Large Power Systems," IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 54, no. 8, pp. 1819-1828, Aug. 2007.
- [30] K. Dasgupta, A. M. Kulkarni, S. Soman, "Studying Electromechanical Wave Propagation and Transport Delays in Power Systems," International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 14, no. 2, pp. 105-114, 2013.
- [31] T. Bi, J. Qin, Y. Yan, H. Liu and K. E. Martin, "An Approach for Estimating Disturbance Arrival Time Based on Structural Frame Model," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 32, no. 3, pp. 1741-1750, May 2017.
- [32] S. Luo, D. Cai, Q. Huang, J. Li, W. Hu, "A Novel Approach Based on Process Identification for Estimating the Time of Arrival of Electromechanical Wave," 2018 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Singapore, pp. 334-339, 2018.
- [33] A. J. Arana, J. N. Bank, R. M. Gardner, Y. Liu, "Estimating Speed of Frequency Disturbance Propagation Through Transmission and Distribution Systems," 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, pp. 1286-1290, 2006.
- [34] Y. Liu, S. You, L. Wu, P. Markham, D. Zhou, Y. Su, "An Approach for Estimating Disturbance Arrival Time Based on Structural Frame Model," IFAC-PapersOnLine, vol. 50, no. 1, pp. 73-78, July 2017.
- [35] R. M. Gardner, J. N. Bank, J. K. Wang, A. J. Arana, Y. Liu, "Non-Parametric Power System Event Location Using Wide-Area Measurements," 2006 IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, USA, pp. 1668-1675, 2006.
- [36] R. M. Gardner, J. K. Wang, Yilu Liu, "Power system event location analysis using wide-area measurements," 2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, QC, Canada, pp. 7 pp.-, 2006.
- [37] P. N. Markham and Y. Liu, "Electromechanical speed map development using FNET/GridEye frequency measurements," 2014 IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition, National Harbor, MD, USA, pp. 1-5, 2014.
- [38] S. Prakash, D. Sanjay, P. Ashutosh, "An Approach for Estimating Disturbance Arrival Time Based on Structural Frame Model," International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 5, no. 1, pp. 69-75, January 2014.
- [39] S. You, Y. Liu, X. Zhang, M. T. Gonzalez, Y. Liu, "U.S. Eastern Interconnection (EI) Electromechanical Wave Propagation and the Impact of High PV Penetration on its Speed," 2018 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Denver, CO, USA, pp. 1-5, 2018.
- [40] J. Till, S. You, Y. Liu, P. Du, "Impact of High PV Penetration on Voltage Stability," 2020 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), Chicago, IL, USA, pp. 1-5, 2020.
- [41] S. N. Vukosavic, A. M. Stankovic, "Electronic Power Waves in Networks of Inverters," 2018 North American Power Symposium (NAPS), Fargo, ND, USA, pp. 1-6, 2018.



- [42] H. Cui et al., "Disturbance Propagation in Power Grids With High Converter Penetration," *Proceedings of the IEEE*, vol. 111, no. 7, pp. 873-890, July 2023.
- [43] B. C. Lesieutre, E. Scholtz, G. C. Verghese, "Impedance matching controllers to extinguish electromechanical waves in power networks," *Proceedings of the International Conference on Control Applications*, Glasgow, UK, pp. 25-30 vol.1, 2002.
- [44] B. C. Lesieutre, E. Scholtz, G. C. Verghese, "A Zero-Reflection Controller for Electromechanical Disturbances in Power Networks", *Proceedings of 14th Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Sevilla, Spain, 2002.
- [45] L. Huang, "Electromechanical Wave Propagation in Large Electric Power Systems". Ph D. Theses, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2003.
- [46] W. Sabry, "Application of zero-reflection controllers on two-dimensional power systems," 2008 12th International Middle-East Power System Conference, Aswan, Egypt, pp. 183-186, 2008.
- [47] M. Ali, J. Buisson and Y. Phulpin, "Improved control strategy to mitigate electromechanical wave propagation using PSS," *Melecon 2010 - 2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Valletta, Malta, pp. 35-40, 2010.
- [48] O. Agamalov, "Power Systems Oscillations Damping with Regard the Finite Speed of Propagation the Electromechanical Waves," *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 71-82, 2015.
- [49] M. Ali, J. Buisson, W. Sabry, "PSS tuning to extinguish the spatial propagation of electromechanical disturbance in power system," *Proceedings of the 41th North American Power Symposium NAPS2009*, Mississippi, USA, October 2009.
- [50] M. N. Ali, "Fuzzy Logic PSS Assisted by Neighboring Signals to Mitigate the Electromechanical Wave Propagation in Power Systems," *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 363-375, June 2015.
- [51] M. Mahmoudi, J. Dong, K. Tomsovic, S. Djouadi, "Application of distributed control to mitigate disturbance propagations in large power networks," 2015 North American Power Symposium (NAPS), Charlotte, NC, USA, pp. 1-6, 2015.
- [52] P. Zhang, J. S. Thorp, X. Wang, X. Wei, "The effect of electromechanical wave controllers on inter-area modes," 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, pp. 1-8, 2012.
- [53] T. Li, G. Ledwich, Y. Mishra, J. H. Chow, A. Vahidnia, "Wave Aspect of Power System Transient Stability—Part I: Finite Approximation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2493-2500, July 2017.
- [54] T. Li, G. Ledwich, Y. Mishra, J. H. Chow, A. Vahidnia, "Wave Aspect of Power System Transient Stability—Part II: Control Implications," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 2501-2508, July 2017.
- [55] A. Esmaeilian, M. Kezunovic, "Impact of electromechanical wave oscillations propagation on protection schemes," *Electric Power Systems Research*, vol. 138, pp. 85-91, January 2016.
- [56] E. O. Schweitzer, A. Guzman, M. V. Mynam, V. Skendzic, B. Kasztenny, S. Marx, "Protective Relays with Traveling Wave Technology Revolutionize Fault Locating," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 14, no. 2, pp. 114-120, March-April 2016.

- [57] A. Esmailian, M. Kezunovic, "Fault Location Using Sparse Synchrophasor Measurement of Electromechanical-Wave Oscillations," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 31, no. 4, pp. 1787-1796, Aug. 2016.
- [58] K. K. Dasgupta, "Wide Area Measurement Applications in Line Parameter Estimation and understanding Electromechanical Wave Propagation". Ph. D. Theses, Indian Institute of Technology Bombay, India, December 2013.
- [59] D. Cline, "Variational Principles in Classical Mechanics – Third edition," University of Rochester, USA, August 2021.
- [60] J. Scherpen, D. Jeltsema, J. B. Klaassens, "Lagrangian modeling of switching electrical networks," *Systems & Control Letters*, vol. 48, pp. 365–374, 2003.
- [61] Z. Biolek, D. Biolek, "Euler-Lagrange Equations of Networks with Higher-Order Elements," *Radioengineering*, vol. 26, no. 2, pp. 397-405, June 2017.
- [62] J. Aminuddin, Nurhayati, A. Widiyani, P. Razi, Wihantoro, A.N. Aziz, R.F. Abdullatif, A. Arifin, "Estimation of Ideal Configuration and Dimension of Pico Hydropower using Euler-Lagrange Equation and Runge-Kutta Method," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1494, 2020.
- [63] С. Фемпл, „Елементи варијационог рачуна“, Грађевинска књига, Београд, 1965.
- [64] A. A. Markovic, S. Vukosavic, "Novel approach for modeling and attenuation of power waves in large – scale power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 155, Part B, 2024.
- [65] Jan Machowski, Zbigniew Lubosny, Janusz W. Bialek, James R. Bumby, "Power System Dynamics: Stability and Control, 3rd Edition", John Wiley & Sons Ltd, 2020
- [66] IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices and Parameter Verification with Applications in Power System Stability Analyses, IEEE Std 1110-2002 (Revision of IEEE Std 1110-1991), 2020
- [67] P. W. Sauer, M. A. Pai, J. H. Chow, "Power System Dynamics and Stability With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox, Second Edition," John Wiley and Sons Ltd, USA, 2018.
- [68] S. Alinhac, "Hyperbolic partial differential equations," Springer, USA, 2009.
- [69] Н. Рајаковић, „Анализа електроенергетских система 1“, Академска мисао, Београд, 2002.
- [70] H. J. Pain, "The Physics of Vibrations and Waves – Sixth Edition," John Wiley & Sons, USA, 2005.
- [71] Н. Рајаковић, „Анализа електроенергетских система 2“, Академска мисао, Београд, 2008.
- [72] C. Schauder et al., "AEP UPFC project: installation, commissioning and operation of the /spl plusmn/160 MVA STATCOM (phase I)," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1530-1535, Oct. 1998.
- [73] Y. S. Han, I. Y. Suh, J. M. Kim, H. S. Lee, J. B. Choo, B. H. Chang, "Commissioning and Testing of the KangJin UPFC in Korea", 21, rue d'artois, F Paris B4-211 Session 2004 CIGRÉ, Paris, 2004

- [74] S.Y. Kim, J. S. Yoon, B.H. Chang, D. H. Baek, "The Operation Experience of KEPCO UPFC", 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, China, Sept. 2005
- [75] B. Fardanesh A. Schd, "Dynamic Studies of the NYS Transmission System With the Marcy CSC in the UPFC and IPFC Configurations", 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Dallas, USA, Sept. 2003
- [76] X. Yang, W. Wang, H. Cai, P. Song, Z. Xu, "Installation, system-level control strategy and commissioning of the Nanjing UPFC project", 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, IL, USA, July 2017
- [77] T. Yin, X. Wu, S. Bu, H. Cai, W. Qi, J. Huang, Z. Xie, "Analysis on operation conditions of UPFC in Nanjing western power system in 2016", 2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Saskatoon, SK, Canada, Oct. 2017
- [78] Y. Cui , Y. Yu, W. Bao, Y. Feng, Q. Guo, W. Xie, M. Jin, "Analysis of application effect of 220 kV UPFC demonstration project in Shanghai grid", The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2018), The Journal of Engineering, 2018.
- [79] X. Wang, H. Wang, J. Yang , Z. Xu, W. Sun, C. Wu, C. Li, "Application of 500 kV UPFC in Suzhou southern power grid", The 14th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2018), The Journal of Engineering, 2018.
- [80] A.S, Mehraban, A. Edris, C.D. Schauder, J.H. Provanzana, "Installation, commissioning, and operation of the world's first UPFC on the AEP system", POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings, Beijing, China, Aug. 1998
- [81] R. Adapa, S. Nilsson, B. Andersen, Y. Yang, "Technical Description of the Unified Power Flow Controller (UPFC) and Its Potential Variations" Flexible AC Transmission Systems, CIGRE Green Books, Springer, 2020
- [82] A. M. Vural, E. N. Wirsy, "Three-phase modular multilevel converter based unified power flow controller", Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 23, Issue 2, April 2020
- [83] F. M. Rodrigo, D. R. Alexis, B. Rey-Boué, S. de Pablo, L. C. Herrero-de Lucas, "Modular Multilevel Converters: Control and Applications", Energije, Volume 10, Issue 11, October 2017
- [84] J. Liu, Z. Xu, L. Xiao, "Comprehensive Power Flow Analyses and Novel Feedforward Coordination Control Strategy for MMC-Based UPFC", Energies, MDPI, Vol. 12(5), March 2019
- [85] Y. Xu, F.o Tao, T. Xie, Z. Zhang, S. Chen, J. Xu, "Research on Insulation Coordination of 500kV Unified Power Flow Controller", 2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Beijing, China, Nov. 2018
- [86] S. Yang, D. Gunasekaran, Y. Liu, U. Karki, F. Z. Peng, "Application of Transformer-less UPFC for Interconnecting Synchronous AC Grids", 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, Sept. 2015
- [87] H. Li, T. Zheng, S. Huang, Y. Wang, "UPFC fault ride-through strategy based on virtual impedance and current limiting reactor," International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 125, Feb. 2021.

- [88] J. Zhang, W. Du, H. Wang, X. Wang, L. Fan, "Damping Torque Analysis of a UPFC Installed in a Real Chinese Power Grid", 2016 IEEE PES Asia – Pacific Power and Energy Conference - Xi'an – China, 2016
- [89] L. Liu, Y. Zhang, P. Zhu, Y. Kang, J. Chen, "Control Scheme and Implement of a Unified Power Flow Controller", 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, China, Sept. 2005
- [90] L. Liu, P. Zhu, Y. Kang, J. Chen, "Power-Flow Control Performance Analysis of a Unified Power-Flow Controller in a Novel Control Scheme, " IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 3, July 2007
- [91] L. H. Hassan, M. Moghavvemi, H. A. F. Almurib, O. Steinmayer, "Application of genetic algorithm in optimization of unified power flow controller parameters and its location in the power system network", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Elsevier, 46(1):89-97, November 2013
- [92] L. L. Lai, J. T. Ma, "Power flow control with UPFC using genetic algorithms", Proceedings of International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, Orlando, USA, August 2002
- [93] M. M. Farsangi, Y. H. Song and K. Y. Lee, "Choice of FACTS device control inputs for damping interarea oscillations," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, no. 2, pp. 1135-1143, May 2004
- [94] M. A. Furini, A. L. S. Pereira, P. B. Araujo, "Pole placement by coordinated tuning of Power System Stabilizers and FACTS-POD stabilizer", Electrical Power and Energy Systems, bol. 33, Issue 3, pp. 615-622, March 2011
- [95] R. Sadikovic, G. Andersson, P. Korba, "Damping Controller Design for Power System Oscillations", Intelligent Automation & Soft Computing, vol. 12, no. 1, pp. 51-62, 2006
- [96] H. Shayeghi, H. A. Shayanfar, F. Shalchi, "Robust Loop-Shaping Based POD Controller Design For UPFC", International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering" (IJTPE), 3, vol. 2, no. 2, Jun. 2010
- [97] P. K. Dash, S. Mishra, G. Panda, "A Radial Basis Function Neural Network Controller for UPFC", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No. 4, November 2000
- [98] S. Mishra, "Neural – Network – Based Adaptive UPFC for Improving Transient Stability Performance of Power System", IEEE Transactions on Neural Networks, Vol. 17, No. 2, March 2006
- [99] S. Ray, G. K. Venayagamoorthy, "Wide-Area Signal-Based Optimal Neurocontroller for a UPFC", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 3, July 2008
- [100] H. C. Tsai, J. H. Liu, C. C. Chu, "Integrations of Neural Networks and Transient Energy Functions for Designing Supplementary Damping Control of UPFC", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 55, Issue 6, November – December 2019
- [101] H. C. Tsai, C. C. Chu, "UPFC Supplementary Damping Control Synthesis: A Forward Neural Networks Approximated Energy Function Approach", 2018 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), Portland, USA, 2018

- [102] A. M. Shotorbani, A. Ajami, M. P. Aghababa, S. H. Hosseini, "Direct Lyapunov theory-based method for power oscillation damping by robust finite-time control of unified power flow controller", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 7, Issue: 7, July 2013
- [103] P. K. Dash, S. Mishra, G. Panda, "Damping Multimodal Power System Oscillation Using a Hybrid Fuzzy Controller for Series Connected Facts Devices", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 4, November 2000
- [104] Fadi M. Albatsh, Saad Mekhilef, Shameem Ahmad, Hazlie Mokhlis, "Fuzzy Logic Based UPFC and Laboratory Prototype Validation for Dynamic Power Flow Control in Transmission Lines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, Issue 12, December 2017
- [105] P. C. Pradhan, R. K. Sahu, S. Panda, "Firefly algorithm optimized fuzzy PID controller for AGC of multi-area multi-source power systems with UPFC and SMES", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 19, Issue 1, pp.338-354, March 2016
- [106] S. Tiwari, R. Naresh, R. Jha, "Neural network predictive control of UPFC for improving transient stability performance of power system", *Applied Soft Computing*, Vol. 11, Issue 8, pp. 4581-4590, December 2011
- [107] Kai-Hung Lu, Hsin-Chuan Chen, Chiou-Jye Huang, Zhi-Feng Huang, "Design of IRFNN for Reconfigured UPFC to Power Flow Control and Stability Improvement", 2017 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Ningbo, China, 9-12 July, 2017
- [108] H. Li, J. Wang, J. Meng, H. J. Pain, "Learning Control - Chapter 4 - Nonlinear control," Elsevier, pp. 93-102, 2021
- [109] M. Januszewski, J. Machowski, J.W. Bialek, "Application of the Direct Lyapunov Method to Improve Damping of Power Swings by Control of UPFC", *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 151, Issue: 2, March 2004
- [110] L. Nogal, S. Robak, J. Machowski, "Control Algorithm for UPFC Based on Non-linear Model of Power System", *Electric Power Components and Systems*, Vol. 47, Issue: 6-7, pp. 605-618, 2019
- [111] A .M. Shotorbani, A. Ajami, M. P. Aghababa, S. H. Hosseini, "Direct Lyapunov theory-based method for power oscillation damping by robust finite-time control of unified power flow controller" *IET Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 7, Issue 7, pp. 691-699, July 2013
- [112] M. Chandhari, G. Andersson, I. A. Hiskens, "Control Lyapunov functions for controllable series devices," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 16, No. 4, November 2001
- [113] C. C. Chu, H. D. Chiang, "Constructing analytical energy functions for network-preserving power system models," *Circuits, Systems, and Signal Processing*, Vol. 24, No. 4, pp. 363–383, 2005.
- [114] L. Liu, Y. Zhang, P. Zhu, Y. Kang, J. Chen, "Control Scheme and Implement of a Unified Power Flow Controller", 2005 International Conference on Electrical Machines and Systems, Nanjing, China, Sept. 2005
- [115] M. A. Sayed, Member, T. Takeshita, "Line Loss Minimization in Isolated Substations and Multiple Loop Distribution Systems Using the UPFC", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 11, November 2014

- [116] M. H. Haque, "Application of UPFC to Enhance Transient Stability Limit", 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, USA, July 2007
- [117] E. Akbari et al., "Improved Salp Swarm Optimization Algorithm for Damping Controller Design for Multimachine Power System," IEEE Access, vol. 10, pp. 82910-82922, 2022.
- [118] R. Kumar and M. Kumar, "Improvement power system stability using Unified Power Flow Controller based on hybrid Fuzzy Logic-PID tuning In SMIB system," 2015 International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT), Greater Noida, India, pp. 815-819, 2015.
- [119] A. A. Markovic, S. Vukosavic, "Control of Series Impedance of Power Lines Using Power Flow Controller," Facta Universitatis, Series: Electronics and Energetics, vol. 35, no. 3 pp. 421-435, 2022.
- [120] M. Gibbard, D. Vowels, "Simplified 14-Generator Model of the South East Australian Power System", Power Systems Dynamics Group, School of Electrical & Electronic Engineering, The University of Adelaide, South Australia, February 2014
- [121] A. Moeini, I. Kamwa, P. Brunelle, G. Sybille, "Open data IEEE test systems implemented in SimPowerSystems for education and research in power grid dynamics and control", 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), pp. 1-6, Stoke on Trent, UK, 2015
- [122] C. Hermanu, M. Nizam, F. I. Robbani, "Optimal Placement of Unified Power Flow Controllers (UPFC) for Losses Reduction and Improve Voltage Stability Based on Sensitivity Analysis in 500 kV Java-Bali Electrical Power System," 2018 5th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), Surakarta, Indonesia, pp. 83-87, 2018
- [123] B. Vijay Kumar, N.V. Srikanth, "Optimal location and sizing of Unified Power Flow Controller (UPFC) to improve dynamic stability: A hybrid technique", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 64, pp. 429-438, 2015
- [124] R. B. Magadum, S. N. Dodamani and D. B. Kulkarni, "Optimal Placement of Unified Power Flow Controller (UPFC) using Fuzzy Logic," 2019 Fifth International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES), Chennai, India, pp. 1-4, 2019
- [125] S. A. Taher, M. K. Amooshahi, "Optimal placement of UPFC in power systems using immune algorithm", Simulation Modelling Practice and Theory, vol. 19, Issue 5, pp. 1399-1412, 2011

## ДОДАТАК А

Параметри кориштени приликом симулације на реалистичном тестном систему сачињеном од низа од 65 синхроних генератора дати су како слиједи:

- *Параметри синхроног генератора*

$$S_n = 900[MVA], R = 0.0025[r.j.], X = 0.2[r.j.], X_d = 1.8[r.j.], X_q = 1.7[r.j.], X'_d = 0.3[r.j.], X'_q = 0.55[r.j.], X''_d = 0.25[r.j.], X''_q = 0.25[r.j.]$$

- *Параметри турбине*

$$T_m = 3.3[s]$$

- *Параметри турбинског регулатора*

$$T_{sv} = 0.15[s], R_d = 0.03$$

- *Параметри побудног система*

$$K_A = 200, T_m = 0.001[s]$$

- *Параметри надземног вода*

$$r_v = 0.02[r.j.], x_v = 0.2[r.j.]$$

## ДОДАТАК Б

Параметри тестног система са једним генератором прикљученим на мрежу бесконачне снаге дати су у наставку.

- *Параметри синхроног генератора*

$$X_d = 1.2[r.j.], X_q = 1[r.j.], X'_d = 0.3[r.j.], X'_q = 0.55[r.j.], T'_{d0} = 5[s], H = 6[s], D = 0.02$$

- *Параметри турбине*

$$T_m = 0.4[s]$$

- *Параметри турбинског регулатора*

$$T_{sv} = 0.2[s], R_d = 0.02$$

- *Параметри побудног система*

$$K_A = 20, T_m = 0.04[s]$$

- *Параметри надземних водова*

$$\underline{Z}_{V1} = 0.01 + j0.1 \text{ [r.j.]}, \underline{Z}_{V2} = 0.03 + j0.2 \text{ [r.j.]}, \underline{Z}_{V3} = 0.03 + j0.4 \text{ [r.j.]}, \underline{Z}_{V4} = 0.01 + j0.2 \text{ [r.j.]}$$

- *Параметри потрошње*

$$\underline{Z}_{P1} = 2 + j1 \text{ [r.j.]}, \underline{Z}_{P2} = 0.8 + j0.6 \text{ [r.j.]}, \underline{Z}_{P3} = 0.8 + j0.6 \text{ [r.j.]}$$

- *Параметри UPFC-а*

$$\underline{Z}_{se} = 0.01 + j0.05 \text{ [r.j.]}, \underline{Z}_{sh} = 0.001 + j0.08 \text{ [r.j.]}$$

## ДОДАТАК В

Параметри ПИ регулатора управљачког система UPFC-а за тестни систем сачињен од низа од 65 синхроних генератора дати су у наставку.

- *ПИ регулатор 1 – серијски дио UPFC-а*

$$K_p = 0.5, K_i = 0.5$$

- *ПИ регулатор 2 – серијски дио UPFC-а*

$$K_p = 0.5, K_i = 0.5$$

- *ПИ регулатор 3 – оточни дио UPFC-а*

$$K_p = 10, K_i = 10$$

- *ПИ регулатор 4 – оточни дио UPFC-а*

$$K_p = 20, K_i = 20$$

- *ПИ регулатор 5 – оточни дио UPFC-а*

$$K_p = 15, K_i = 15$$

- *ПИ регулатор 6 – оточни дио UPFC-а*

$$K_p = 25, K_i = 25$$

Параметри ПИ регулатора управљачког система UPFC-а за тестни систем IEEE 59 дати су у наставку.

- *ПИ регулатор 1 – серијски дио UPFC-а*

$$K_p = 0.025, K_i = 5.5$$

- *ПИ регулатор 2 – серијски дио UPFC-а*



$$K_p = 0.025, K_i = 5.5$$

- ПИ регулатор 3 – оточни дио UPFC-a

$$K_p = 50, K_i = 1600$$

- ПИ регулатор 4 – оточни дио UPFC-a

$$K_p = 10^{-4}, K_i = 20 \cdot 10^{-3}$$

- ПИ регулатор 5 – оточни дио UPFC-a

$$K_p = 50, K_i = 1600$$

- ПИ регулатор 6 – оточни дио UPFC-a

$$K_p = 0,067, K_i = 0,083.$$

## БИОГРАФИЈА АУТОРА

Александар Ацо Марковић рођен је 6. новембра 1991. године у Завидовићима у Босни и Херцеговини. Основну школу у Шамцу (Република Српска) завршио је 2006. године као ученик генерације и носилац Вукове дипломе. Гимназију у Шамцу завршио је 2010. године такође као ученик генерације у носилац Вукове дипломе. У основној и средњој школи учествовао је и освајао награде на бројним такмичењима из математике, физике као и на спортским такмичењима у фудбалу, одбојци и кошарци.

Основне студије на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци уписао је 2010. године на одсјеку за Електроенергетске и индустријске системе. Током студија више пута је награђиван за најбољег студента у генерацији на одсјеку за Електроенергетске и индустријске системе. Дипломски рад под насловом „Развој алгорита модулације просторног вектора напона за примјену у електромоторним погонима“ одбранио је 2014. године са оцјеном 10. На основним студијама остварио је просјечну оцјену 9,43.

Мастер студије уписао је 2014. године на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци. Остварио је просјечну оцјену 10 током мастер студија а истом оцјеном одбранио је 2016. године и мастер рад под насловом „Алгоритми за директну контролу момента шестофазне асиметричне асинхроне машине“.

Докторске студије уписао је 2019. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду на модулу Енергетски претварачи и погони. До сада је положио све испитије и друге обавезе предвиђене планом докторских студија са просјечном оцјеном 10, сакупивши 120 ЕСПБ.

У периоду од 2015. до 2016. године радио је у предузећу „Институт за грађевинарство – ИГ“ Бања Лука на пословима пројектовања надземних водова и електричних инсталација у објектима. Од 2016. до 2017. радио је у ЈУ „Техничка школа“ Бања Лука као наставник стручно теоријске наставе. Од 2017. године запослен је у предузећу „Електропренос – Електропријенос БиХ“ а.д. Бања Лука на пословима испитивања енергетских и мјерних трансформатора, уземљивачких система, термовизијским испитивањима као и другим видовима испитивања у трансформаторским станицама називних напона 110kV и већим гдје ради и данас. Године 2018. биран је у звање асистента на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци на Катедри за аутоматику гдје је био ангажован на предметима: Системи аутоматског управљања, Основи система аутоматског управљања, Синтеза система аутоматског управљања, Нелинеарни системи, Стохастички системи и естимација, Управљање у реалном времену и уграђени рачунарски системи, Управљање у реалном времену, Увод у теорију система, Идентификација система, те на предмету Мултиваријабилни системи на мастер студијама. Поред тога, вјежбе је изводио и на предмету Аутоматско управљање 1 на Машинском факултету Универзитета у Бањој Луци. На студентским анкетама за период од 2018. до 2022. године оцијењен просјечном оцјеном 4,7/5. Тренутно у допунском радном односу на Електротехничком факултету у Бањој Луци изводи вјежбе на предметима Системи аутоматског управљања и Основи система аутоматског управљања. Године 2022. биран је у звање вишег асистента на Електротехничком факултету у Бањој Луци.

Аутор је четири научна рада, од којих је један рад објављен на међународној научној конференцији, један рад на домаћем стручном савјетовању, један рад у националном

часопису међународног значаја (M24), те један рад у врхунском међународном научном часопису (M21).

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: Александар Ацо Марковић

Број индекса: 5028/2019

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:


#### **Математичко моделовање и сузбијање електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

У Београду,

5.4.2024.

Потпис аутора



## **Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада**

Име и презиме аутора: Александар Ацо Марковић

Број индекса: 5028/2019

Студијски програм: Енергетски претварачи и погони

Наслов рада:

**Математичко моделовање и сузбијање електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима**

Ментор: академик проф. др Слободан Вукосавић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

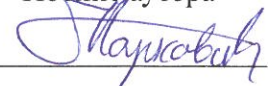
Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду,

5.4.2024.

Потпис аутора



## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### Математичко моделовање и сузбијање електромеханичких таласа у великим електроенергетским системима

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

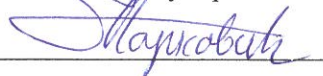
1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду,

5.4.2024.

Потпис аутора



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.