

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Valentin Ažbe

**Energijske funkcije
elektroenergetskih sistemov
z napravami za krmiljenje pretokov moči**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Ljubljana, 2005

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Valentin Ažbe

**Energijske funkcije
elektroenergetskih sistemov
z napravami za krmiljenje pretokov moči**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Mentor: prof. dr. Rafael Mihalič, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, 2005

Tončki, Klari in Davidu ...

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju prof. dr. Rafaelu Mihaliču za vsestransko pomoč pri podiplomskem študiju in podporo pri nastajanju tega dela.

Zahvaljujem se vsem sedanjim in nekdanjim sodelavcem za prijetno in spodbudno delovno ozračje.

Zahvaljujem se tudi Ministrstvu za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo, ki mi je finančno omogočilo podiplomski študij.

Zahvaljujem se svoji družini – Tončki, Klari in Davidu – za razumevanje in podporo pri podiplomskem študiju.

Izjava

Podpisani Valentin Ažbe, rojen 18. 9. 1971 v Kranju, izjavljam, da sem doktorsko disertacijo z naslovom **Energijske funkcije elektroenergetskih sistemov z napravami za krmiljenje pretokov moči** v celoti izdelal samostojno pod vodstvom mentorja prof. dr. Rafaela Mihaliča, univ. dipl. inž. el. Izkazano pomoč drugih sodelavcev sem v celoti navedel v zahvali.

Valentin Ažbe

Izvirni prispevki k doktorski disertaciji

Doktorska disertacija obravnava tematiko razvoja energijskih funkcij elektroenergetskega sistema (EES) z upoštevanjem kompleksnih naprav FACTS druge generacije in podaja izvirne prispevke znanosti na področju elektroenergetike:

- *Razvoj energijske funkcije za poljubno število univerzalnih prečnih transformatorjev (UPFC) v EES;*

Definiran je injekcijski model naprave UPFC, na podlagi katerega je izpeljana energijska funkcija za to napravo. Ugotovljena energijska funkcija je izpeljana kot prvi integral injiciranih moči naprave UPFC v omrežje in velja za model omrežja z ohranjeno strukturo. Posledično se jo lahko doda k obstoječi energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo SPEF (*angl. structure-preserving energy function*), ki velja za sistem brez naprav FACTS in je bila izpeljana kot prvi integral nihajnih enačb EES.

- *razvoj energijske funkcije za poljubno število medlinijskih regulatorjev pretokov moči (IPFC) poljubne strukture v EES;*

Medlinijski regulator pretokov moči (IPFC) je naprava FACTS z več serijskimi napetostnimi viri, ki lahko med seboj izmenjujejo delovno moč. Na podlagi razvitega injekcijskega modela IPFC je bila določena energijska funkcija te naprave za različne regulacijske strategije, ki jo lahko dodamo obstoječi SPEF za EES brez naprav FACTS.

- *razvoj energijske funkcije za poljubno število posplošenih univerzalnih prečnih transformatorjev (GUPFC) poljubne strukture v EES;*

Posplošen univerzalni prečni transformator vsebuje podobno kot naprava IPFC več serijskih napetostnih virov, poleg tega pa vsaj en paralelni tokovni vir. Energijska funkcija za napravo GUPFC je izpeljana iz injekcijskega modela te naprave, ki je enak vsoti posameznih naprav UPFC s skupno paralelno vejo. Energijska funkcija velja za model EES z ohranjeno strukturo.

- *razvoj energijskih funkcij za poljubno število naprav FACTS s hranilniki energije v EES;*

Energijske funkcije so izpeljane za univerzalni prečni transformator s hranilnikom energije (UPFC-ESS), statični kompenzator s hranilnikom energije (STATCOM-ESS) in statični serijski sinhronski kompenzator s hranilnikom energije (SSSC-ESS). Po izdelavi injekcijskih modelov teh naprav je podobno kot za naprave UPFC, IPFC in

GUPFC določena energijska funkcija za model ESS z ohranjeno strukturo sistema za različne regulacijske strategije.

- *izpeljava metode upoštevanja odsekoma zveznih regulacijskih parametrov naprav FACTS pri določanju CCT z direktno metodo;*

Metoda razširja veljavnost energijskih funkcij, ki so bile razvite za regulacijske strategije s konstantnimi regulacijskimi parametri. Možnost uporabe energijskih funkcij razširi na odsekoma konstantne regulacijske parametre, s katerimi lahko aproksimiramo poljubno regulacijsko strategijo. Metoda je namenjena za ugotavljanje stabilnosti EES s pomočjo direktne metode po načinu PEBS (*angl. potential-energy boundary surface*).

- *postopek za določanje regulacijske strategije naprav FACTS z več regulacijskimi parametri za dušenje sistema na podlagi ekstremnega gradienta energijske funkcije.*

Postopek določa regulacijsko strategijo naprav FACTS, ki daje najbolj negativno vrednost gradienta energijske funkcije, s čimer je po teoriji Ljapunova dušenje sistema največje. Pri tem upoštevamo energijsko funkcijo celotnega EES in parametre celotnega EES. Regulacijska strategija je s tem globalno optimalna.

Povzetek

Naprave za krmiljenje pretokov moči v elektroenergetskem sistemu, ki jih označujemo tudi kot naprave FACTS, imajo glede na naraščajočo porabo, uvedbo trga električne energije in s tem povezano težnjo po vse večjih pretokih električne energije vedno večjo vlogo. Ker jih odlikuje velika hitrost odziva, lahko poleg povečanja zmogljivosti in regulacije pretokov delovnih in jalovih moči v EES s svojim vplivom bistveno spremenijo tudi dinamiko EES in s tem njegovo tranzientno stabilnost. Pri ugotavljanju dinamike EES, ki je matematično zahteven izračun z diferencialnimi enačbami, si lahko pomagamo z direktnimi metodami, pri katerih se uporabljajo energijske funkcije. V času, ko so razvijali direktne metode in ustrezne energijske funkcije, še niso poznali naprav FACTS, zato z njimi ne moremo dobro ocenjevati tranzientne stabilnosti EES, ki vsebujejo tovrstne naprave. S pojavom naprav FACTS so njihov vpliv na energijske funkcije za enostavnejše naprave FACTS že ugotovili, ostaja pa še nerešeno področje kombiniranih naprav FACTS, tj. naprav z več kot enim regulacijskim parametrom. Doktorska disertacija dopolnjuje to področje in določa vpliv kombiniranih tovrstnih naprav na energijske funkcije EES v obliki dodatnih členov k že znanim energijskim funkcijam EES. Te dodatne člene v energijskih funkcijah EES označujemo kot energijske funkcije posameznih naprav FACTS. Energijske funkcije so se v preteklosti izkazale za uporabne ne le za ugotavljanje tranzientne stabilnosti, temveč tudi za izdelavo regulacijskih strategij naprav FACTS za izboljšanje tranzientne stabilnosti. Zato smo za kombinirane naprave FACTS v okviru doktorske disertacije izdelali regulacijsko strategijo, ki temelji na energijski funkciji EES.

Doktorska disertacija vsebuje energijske funkcije za napravi UPFC, IPFC in GUPFC ter za naprave s hranilnikom energije BESS-STATCOM, BESS-SSSC in BESS-UPFC. Energijske funkcije naprav FACTS smo določili za EES z ohranjeno strukturo sistema, kar omogoča upoštevanje poljubnega števila naprav v EES hkrati, poleg tega pa v primerjavi z reduciranim EES omogoča podrobnejše obravnavanje bremen in generatorjev. Pri določanju energijskih funkcij smo v prvem koraku sledili že znanim postopkom oblikovanja prvega integrala nihajnih enačb EES, drugi korak, ki je eden od prispevkov k znanosti te doktorske disertacije, pa je analitično reševanje tega integrala, ki je za vsako napravo FACTS drugačen in ga načeloma lahko določimo le s pomočjo intuicije. Energijske funkcije namreč ni mogoče določiti drugače kot intuitivno, saj – kot je znano iz literature – ni determinističnega postopka za določitev funkcij Ljapunova, med katere spadajo energijske funkcije EES.

Energijske funkcije naprav FACTS so odvisne od načina obratovanja posamezne naprave FACTS, tj. od regulacijske strategije naprave. Poleg tega za poljubno regulacijsko strategijo energijska funkcija ne obstaja vedno, temveč jo lahko določimo le za nekatere – po navadi konstantne – regulacijske parametre. Doktorska disertacija določa energijske funkcije naprav FACTS pri konstantnih regulacijskih parametrih. Pri napravah FACTS s hranilnikom energije smo energijsko funkcijo kot algebrasko funkcijo lahko določili le, če je injicirana delovna moč naprave konstantna. Pri drugačni regulaciji delovne moči ostaja energijska funkcija delno v obliki integralnega zapisa. Možnost uporabe konstantnih regulacijskih parametrov smo razširili na odsekoma konstantne regulacijske parametre. S to razširitvijo postanejo energijske funkcije uporabne v direktnih metodah ugotavljanja tranzientne stabilnosti in za razvoj regulacijskih strategij naprav FACTS. Tu določena regulacijska strategija temelji na numeričnem odvajanju energijske funkcije in daje rezultate v obliki stopničastih oz. odsekoma konstantnih regulacijskih parametrov naprav FACTS. Ugotovili smo tesno povezanost energijske funkcije z jalovo energijo, ki jo naprava injicira v omrežje. Poleg tega smo ugotovili, da pri napravah FACTS s hranilnikom energije lahko njihovo injicirano delovno moč obravnavamo enako kot druga delovna bremena.

Energijske funkcije EES s kombiniranimi napravami FACTS smo preverili in uporabili v direktnih metodah za ugotavljanje tranzientne stabilnosti, s katerimi smo določali kritične čase odstranitve motnje v testnem sistemu generator – toga mreža in v devetvozliščnem sistemu IEEE s tremi generatorji. Pravilnost energijskih funkcij smo preverili na testnem sistemu generator – toga mreža, pri katerem direktne metode zaradi ene same možne trajektorije sistema ob pravilnosti energijskih funkcij dajejo enake kritične čase odstranitve motnje, kot jih ugotovimo s ponavljanjem digitalne simulacije. V devetvozliščnem sistemu IEEE trajektorija sistema ni več enoumno določena, kljub temu pa se rezultati direktne in simulacijske metode dovolj dobro ujemajo, da ugotavljanje kritičnih časov odstranitve motnje po direktni metodi z energijskimi funkcijami lahko ocenimo kot uporabno.

Predstavljena regulacijska strategija temelji na numeričnem iskanju najbolj negativnega odvoda energijske funkcije EES in v kratkih časovnih intervalih reda 10 ms daje optimalne konstantne regulacijske parametre. Regulacijska strategija velja za poljubno napravo FACTS in smo jo uspešno uporabili za izboljšanje stabilnosti EES v prvem nihaju ter za dušenje nadaljnjega nihanja. Regulacijsko strategijo smo uporabili pri napravah UPFC in IPFC, ki sta s stališča regulacije najbolj kompleksni. Za izboljšanje stabilnosti prvega nihaja se

regulacijski parametri ne spreminjajo bistveno – amplituda serijsko injicirane napetosti ostaja tako kot paralelni jalovi tok konstantna, medtem ko se kot serijsko injicirane napetosti spreminja počasi in glede na testne primere s konstantno vrednostjo v območju $\pm 20^\circ$ okrog optimalne vrednosti skoraj enako vpliva na stabilnost prvega nihaja. Pri dušenju nihanj rezultati regulacijske strategije kažejo veliko podobnost z iz literature poznanimi bang-bang strategijami, ki se pri serijskih napravah FACTS z regulabilnim kotom injicirane napetosti, kot sta npr. UPFC ali IPFC, kaže v hitrih spremembah tega kota za približno 180° .

Na koncu podajamo energijske funkcije naprav FACTS v EES z ohranjeno strukturo omrežja za vse do zdaj znane naprave FACTS skupaj s kratkim opisom naprave in njene regulacijske strategije.

Povzamemo lahko, da so tu določene energijske funkcije ustrezne in jih lahko praktično uporabimo pri direktnih metodah za ugotavljanje tranzientne stabilnosti in v regulacijskih strategijah naprav FACTS za izboljšanje tranzientne stabilnosti EES.

Abstract

Flexible AC transmission systems (FACTS) devices might play an important role in increasing the amount of energy transported over the lines in deregulated electricity markets. Because FACTS devices can quickly change their parameters, they can also be used for oscillatory- and transient-stability enhancement, system reliability and controllability over the power flow for system operators. The transient-stability assessment of the electric-power system (EPS), which is a mathematically difficult task that includes the solving of a system of differential-algebraic equations, can be simplified by the use of direct methods that include energy functions. At the time when direct methods and proper energy functions for the EPS were developed, FACTS devices did not exist. Consequently, it was not possible to effectively apply direct methods for a transient-stability assessment in an EPS that incorporates FACTS devices. As FACTS devices became available, the energy functions of simple FACTS devices were established, but the field of multi-controllable FACTS devices, i.e., FACTS devices with more than one controllable parameter, is still unsolved. This doctoral thesis completes this field with the definition of the energy functions for multi-controllable FACTS devices in the form of additional terms to the existing energy function for an EPS. Energy functions proved to be useful not only in transient-stability assessment, but also in the control strategy of FACTS devices for transient-stability improvement. Consequently, for multi-controllable FACTS devices we developed a control strategy based on the energy function.

This doctoral thesis contains the energy functions for UPFC, GUPFC, IPFC and for the FACTS devices with the battery-energy storage system BESS-STATCOM, BESS-SSSC and BESS-UPFC. We developed the energy functions for these FACTS devices in the structure-preserving framework, which allows more realistic representations of the power-system components, especially generators and load behaviors. Additionally, different kinds of FACTS devices can be considered in the structure-preserving frame at different points of the network simultaneously. In the construction of the energy functions in the first step we follow the well-known procedure of building the first integral of the EPS' swing equations. The second step that represents one of the contributions of this thesis is to solve the obtained integral analytically. This second step is unique for each of the FACTS devices, and can be found only intuitively, i.e., there is no deterministic procedure that exists to obtain the energy function and consequently the energy function has always to be found intuitively.

The energy function for FACTS devices depends on the control strategy. Furthermore, the energy function cannot be found for any control strategy, but can be developed only for some simple—usually constant—controllable parameters. This thesis determines the energy functions for FACTS devices with constant controllable parameters. For FACTS devices with a battery energy-storage system the energy function can be analytically determined only if the injected active power is constant. For any other control strategy of these devices the energy function stays partially in the form of an integral. We generalized the application of constant controllable parameters to the sectional-constant parameters. Using this generalization, the energy functions become useful in direct methods for a transient-stability assessment and for the development of the control strategy of FACTS devices. The control strategy developed in this thesis is based on the numerical derivation of the energy function and gives the results in the form of sectional-constant controllable parameters. We established a strong correlation between the energy functions and the reactive power injected by the FACTS devices to the EPS. Additionally, we established that using the FACTS devices with the battery-energy storage system, their active power injections can be treated like any other active load.

We verified the constructed energy functions for FACTS devices using direct methods for transient-stability assessment in the single-machine infinite-bus test system. As the trajectory of this system is uniformly given, the critical clearing times (CCTs) obtained using the direct method should be exactly the same as the CCTs established using the repetition of the time-domain simulations. The constructed energy functions were then used for transient-stability assessment in an IEEE nine-bus three-machine test system. Because the trajectory of this system is not uniformly given, the resulting CCTs obtained using the direct method do not necessarily equal the CCTs established by the simulation. Nevertheless, the resulting CCTs do not differ much, and consequently we can treat the direct methods for transient-stability assessment as useful.

The presented control strategy is based on numerical searching of the highest negative value of the derivative of the EPS' energy function. In short time intervals (10 ms) it gives optimal, constant controllable parameters. The control strategy is valid for any of the FACTS devices and was successfully used for transient-stability improvement of the first swing and for damping of further power swings in the EPS. The use of the control strategy is presented for the case of a UPFC and an IPFC, which are from the controlling point of view the most complex. For the period of the first swing angles' propagation the control parameters do not

change much: the amplitude of the series injected voltage and the parallel injected current remain constant, while the angle of the series injected voltage changes slowly and in the range of $\pm 20^\circ$ it has an almost equal effect on the transient stability of the first swing. In the damping of power swings the results of the control strategy show a similarity with the well-known bang-bang control strategies. This similarity is, in the case of the series FACTS devices with the controllable angle of series injected voltage, e.g., a UPFC or an IPFC, reflected in quick changes of this angle of about 180° .

At the end we gathered the energy functions for all known FACTS devices in the structure-preserving framework together with a short description of each FACTS device and its control strategy.

We can conclude that the energy functions developed in this thesis are suitable and can be successfully used in direct methods for transient-stability assessment and in the control strategies of FACTS devices for transient-stability improvement.

Kazalo

Povzetek	I
Abstract	V
Kazalo	IX
Seznam uporabljenih simbolov in okrajšav	XIII
Uvod	1
1 Energijske funkcije EES	5
1.1 Tranzientna stabilnost.....	5
1.2 Teorem Ljapunova o stabilnosti	5
1.3 Funkcija Ljapunova EES.....	9
1.3.1 Modeliranje EES	9
1.3.2 Izpeljava funkcije Ljapunova za EES.....	13
1.4 Uporaba energijske funkcije Ljapunova v direktni metodi ugotavljanja stabilnosti EES.....	17
2 Energijske funkcije naprav FACTS	21
2.1 Univerzalni prečni transformator – UPFC	21
2.1.1 Prenosne karakteristike naprave UPFC	21
2.1.2 Energijska funkcija naprave UPFC	24
2.2 Medlinijski regulator pretokov moči – IPFC.....	29
2.2.1 Splošno o IPFC	29
2.2.2 Prenosne karakteristike posamezne veje IPFC	30
2.2.3 Združitev posameznih vej IPFC	32
2.2.4 Energijska funkcija IPFC	34
2.3 Posplošen UPFC.....	41
2.3.1 Prenosne karakteristike posplošenega UPFC-ja	41
2.3.2 Energijska funkcija naprave GUPFC	42
2.4 STATCOM z baterijskim hranilnikom energije – BESS-STATCOM.....	43
2.4.1 Prenosne karakteristike naprave BESS-STATCOM	43
2.4.2 Energijska funkcija naprave BESS-STATCOM	44
2.5 SSSC z baterijskim hranilnikom energije – BESS-SSSC	47

2.5.1	Prenosne karakteristike BESS-SSSC	47
2.5.2	Energijska funkcija BESS-SSSC	48
2.6	UPFC z baterijskim hranilnikom energije – BESS-UPFC	53
2.6.1	Prenosne karakteristike BESS-UPFC	53
2.6.2	Energijska funkcija BESS-UPFC.....	55
3	Dokaz ustreznosti izpeljanih energijskih funkcij in njihova uporaba v direktnih metodah	57
3.1	Uvod.....	57
3.2	Simulacijska metoda	59
3.3	Direktna metoda.....	61
3.4	Upoštevanje odsekoma konstantnih parametrov	63
3.5	Longitudinalni testni primer	65
3.5.1	Naprava UPFC	66
3.5.2	Naprava IPFC.....	67
3.5.3	BESS-STATCOM.....	71
3.5.4	BESS-SSSC	73
3.5.5	BESS-UPFC.....	75
3.6	Devetvozliščni sistem IEEE.....	78
3.6.1	Naprava UPFC	80
3.6.2	Naprava IPFC.....	85
3.6.3	Naprava BESS-STATCOM	88
3.6.4	Naprava BESS-SSSC.....	90
3.6.5	Naprava BESS-UPFC	95
4	Regulacija naprav FACTS za izboljšanje tranzientne stabilnosti.....	99
4.1	Regulacijske strategije naprav FACTS	99
4.1.1	Povzetek do zdaj znanih regulacijskih strategij naprav FACTS.....	99
4.1.2	Nova regulacijska strategija naprav FACTS.....	100
4.2	Izboljšanje stabilnosti prvega nihaja	105
4.2.1	Regulacija naprave UPFC	105
4.2.2	Regulacija naprave IPFC	111
4.3	Dušenje nihanj	115
4.3.1	Naprava UPFC	115

4.3.2	Naprava IPFC	123
4.4	Sklepne ugotovitve uporabe nove regulacijske strategije	125
5	Povzetek energijskih funkcij naprav FACTS	127
5.1	Uvod	127
5.2	Energijske funkcije naprav FACTS.....	127
5.2.1	SVC	127
5.2.2	CSC.....	127
5.2.3	PST-PAR	128
5.2.4	PST-QBT	128
5.2.5	STATCOM	129
5.2.6	BESS-STATCOM	129
5.2.7	SSSC.....	129
5.2.8	BESS-SSSC	130
5.2.9	UPFC	131
5.2.10	BESS-UPFC	131
5.2.11	GUPFC	132
5.2.12	IPFC.....	132
5.3	Povzetek	133
6	Sklep.....	137
7	Izvirni prispevki doktorske disertacije	139
8	Literatura	141
9	Priloge.....	145
9.1	Longitudinalni testni sistem SMIB.....	145
9.1.1	Primer datoteke z napravo UPFC za določevanje CCT-jev po simulacijski metodi	145
9.1.2	Primer datoteke z napravo UPFC za določevanje CCT-jev po direktni metodi	147
9.2	Devetvozliščni IEEE testni sistem s tremi generatorji	152
9.2.1	Primer datoteke z dvema napravama UPFC na zbiralki 4 in 8 za določevanje CCT-jev po direktni metodi.....	152

9.2.2	Primer datoteke z dvema napravama UPFC na zbiralki 4 in 8 za določevanje optimalnega kota za prvi nihaj	157
-------	---	-----

Seznam uporabljenih simbolov in okrajšav

1. Zapis simbolov

- črtica pod simbolom označuje fazor ali kompleksno veličino (\underline{U});
- krepko označen simbol označuje matriko ali vektor (\mathbf{U});
- spremenljivke so zapisane v kurzivni pisavi (I).

2. Zapis uporabljenih okrajšav

BESS	baterijski hranilnik energije (<i>battery energy storage system</i>)
BESS-SSSC	SSSC z baterijskim hranilnikom energije
BESS-STATCOM	STATCOM z baterijskim hranilnikom energije
BESS-UPFC	UPFC z baterijskim hranilnikom energije
CCT	kritični čas odstranitve motnje (<i>critical clearing time</i>)
COI	center vztrajnostnih mas (<i>center of inertia</i>)
CSC	regulabilna serijska kompenzacija (<i>controlled series compensation</i>)
EES	elektroenergetski sistem
EPS	electric-power system
FACTS	naprave za krmiljenje pretokov moči v omrežju (<i>flexible AC transmission system</i>)
HVDC	enosmerni visokonapetostni prenos (<i>high voltage DC transmission</i>)
IPFC	medlinijski regulator pretokov moči (<i>interline power flow controller</i>)
PAR	prečni transformator z enakima amplitudama vhodne in izhodne napetosti (<i>phase angle regulator</i>)
PEBS	meja potencialne energije, ki določa področje privlačenja stabilne ravnovesne točke (<i>potential energy boundary surface</i>)
PST	prečni transformator (<i>phase-shifting transformer</i>)
QBT	prečni transformator s pravim kotom med fazorjema vhodne in injicirane napetosti (<i>quadrature boosting transformer</i>)

SMIB	generator – toga mreža (<i>single-machine infinite-bus</i>)
SPEF	energijska funkcija za EES z ohranitvijo strukturo (<i>structure-preserving energy function</i>)
SSSC	statični sinhronski serijski kompenzator (<i>static synchronous series compensation</i>)
STATCOM	statični kompenzator (<i>static compensator</i>)
SVC	statični var kompenzator (<i>static var compensator</i>)
UPFC	univerzalni prečni transformator (<i>unified power-flow controller</i>)

3. Seznam pogosto uporabljenih simbolov

B	susceptanca
D	koeficient dušenja generatorja
\underline{E}	fazor inducirane tranzientne napetosti za tranzientno reaktanco
\underline{I}	fazor toka
M	vztrajnostna konstanta generatorja;
P	delovna moč
P_m	mehanska moč na osi generatorja
P_T	serijsko injicirana delovna moč
Q	jalova moč
\underline{U}	fazor napetosti
U_T	amplituda serijsko injicirane napetosti
V	energijska funkcija
V_{cr}	kritična vrednost energijske funkcije
V_k	kinetični del energijske funkcije
V_p	potencialni del energijske funkcije
X	reaktanca
X_d'	tranzientna reaktanca generatorja
β	kot med fazorjem napetosti priključne sponke in fazorjem toka naprave BESS-STATCOM

δ	kot rotorja
ϕ	vektor rotorskih kotov in kotov fazorjev vozliščnih napetosti omrežja;
φ_r	kot serijsko injicirane napetosti
θ	kot fazorja vozliščne napetosti
ω	kotna hitrost generatorja

Uvod

Močnostna elektronika je s svojim razvojem in nižanjem cen vse bolj prisotna v elementih elektroenergetskih sistemov (EES). Njeni elementi se v funkciji hitro preklopljivih stikal uporabljajo večinoma kot pretvorniki med izmeničnim sistemom in vmesnim enosmernim sistemom. Vmesni enosmerni sistem je lahko kondenzator v sami napravi kot npr. pri nekaterih napravah FACTS (angl. *flexible AC transmission systems*), lahko pa tudi večji enosmerni sistem z enosmernim prenosnim vodom kot npr. podvodni kabel za povezavo otokov ali priključitev vetrnih elektrarn na morju ali enosmerni visokonapetostni prenos HVDC (angl. *high voltage DC transmission*) za prenos električne energije na velike razdalje. Poleg tega se v enosmerni sistem lahko vključijo hranilniki energije, ki lahko zagotavljajo neprekinjeno napajanje in izboljšujejo stabilnost EES.

Kot posledica naraščajoče porabe in uvedbe trga električne energije se pojavlja težnja po vse večjih pretokih električne energije. To lahko pomeni potrebo po gradnji novih prenosnih zmogljivosti, kar je lahko glede na vse večje omejitve pri umestitvi elementov EES v prostor vse težje izvedljiva naloga. Alternativa gradnji novih daljnovodov je povečanje zmogljivosti elektroenergetskega omrežja z boljšo izrabo obstoječih elementov, za kar pa potrebujemo možnost dinamične regulacije pretokov moči po omrežju. To omogoča koncept naprav FACTS. Pri tem EES pogosteje obratuje blizu svojih naravnih meja prenosa, to pa nas privede med drugim do vprašanja stabilnosti EES. Ker naprave FACTS odlikuje velika hitrost odziva, lahko poleg povečanja zmogljivosti in regulacije pretokov delovnih in jalovih moči v omrežju vplivajo tudi na izboljšanje tranzientne stabilnosti.

Sestavni del analize tranzientne stabilnosti je izračun kritičnega časa eliminacije motnje (angl. *critical clearing time – CCT*). CCT pomeni najdaljši čas trajanja motnje, po kateri vsi generatorji še ohranijo sinhronizem. Zaradi nelinearnosti sistema in velikega dinamičnega odstopanja od stacionarnega stanja ni mogoče uporabiti postopka linearizacije elementov EES, zato se tranzientna stabilnost najpogosteje ugotavlja z digitalno simulacijo EES. S tem se ugotovi stabilnost za vnaprej izbran čas odstranitve motnje, kar je lahko dolgotrajen proces, saj je potrebno ugibanje oz. poskušanje. V praksi se poleg tega postopka uporabljajo tudi direktne metode, katerih prednost je poleg velike hitrosti – potrebna je samo ena simulacija – tudi možnost izračuna raznih stabilnostnih indeksov, ki v splošnem izražajo oddaljenost obratovalne točke sistema od nestabilnosti.

Direktne metode temeljijo na energijskih funkcijah določenega EES. Natančnost izračuna CCT je v prvi vrsti odvisna od natančnosti energijske funkcije oziroma od stopnje poenostavitve sistema, ki se izvede v fazi določevanja energijske funkcije. V grobem delimo energijske funkcije na tiste, ki ohranijo strukturo EES, in tiste, ki zahtevajo njegovo redukcijo. Razvoj energijskih funkcij je doživel svoj vrhunec sredi osemdesetih let prejšnjega stoletja in se nadaljuje še danes. Z vključitvijo novih kombiniranih naprav FACTS v EES je treba energijske funkcije nadgraditi tako, da vsebujejo tudi vplive teh naprav FACTS na tranzientno stabilnost EES. V nasprotnem primeru so lahko rezultati izračunov s pomočjo direktnih metod daleč od realnosti.

Doktorska disertacija obravnava področje uporabe direktnih metod v EES s kombiniranimi napravami FACTS in daje rešitve v obliki dodatnih členov k energijskim funkcijam splošnega EES z ohranitvijo strukture omrežja. Ti dodatni členi opisujejo delovanje naprav FACTS glede na izbrano regulacijsko strategijo. Pri tem z izrazom kombinirane naprave FACTS označujemo tiste naprave FACTS, ki imajo več kot en regulacijski parameter.

V literaturi so že ugotovljeni prispevki nekaterih naprav FACTS v energijskih funkcijah EES, kot sledi v nadaljevanju. V energijskih funkcijah z ohranitvijo strukture sistema (angl. *structure preserving energy function – SPEF*) so v [1], [2] in [3] podani prispevki za statični var kompenzator (angl. *static var compensator – SVC*), v [3] za regulabilno serijsko kompenzacijo (angl. *controllable series compensation – CSC*), v [4] za statični kompenzator (angl. *static compensator – STATCOM*), statični sinhronski serijski kompenzator (angl. *static synchronous series compensator – SSSC*) ter prečna transformatorja tipa PAR (angl. *phase angle regulator*) in QBT (angl. *quadrature boosting transformer*). V energijskih funkcijah reduciranega sistema SMIB (angl. *single-machine infinite-bus*) je poleg naštetih naprav v [3] podan prispevek za univerzalni prečni transformator (angl. *unified power flow controller – UPFC*). Vprašanje vključitve kombiniranih naprav – tj. naprav, ki imajo več kot en regulacijski parameter – v sistemu z ohranjeno strukturo še ni rešeno. Odgovor na to vprašanje daje ta doktorska disertacija.

Vsebina doktorske naloge definira prispevke kombiniranih naprav FACTS v energijskih funkcijah z ohranitvijo strukture sistema (SPEF) za naslednje naprave:

- univerzalni prečni transformator – UPFC (angl. *unified power flow controller*),

- medlinijski regulator pretokov moči – IPFC (angl. *interline power flow controller*),
- posplošeni univerzalni prečni transformator – GUPFC (angl. *generalized UPFC*),
- naprave z baterijskim hranilnikom energije BESS (angl. *battery energy storage system*): BESS-STATCOM, BESS-SSSC in BESS-UPFC.

Nove energijske funkcije bodo tipa SPEF, zato bo možna povezava z drugimi SPEF, npr. takimi, ki omogočajo obravnavanje natančno modeliranih generatorjev. Ker bo zagotovljena univerzalnost novih SPEF, jih bo mogoče uporabiti v katerem koli EES s poljubnim številom naprav FACTS.

Na novo definirane energijske funkcije smo poleg uporabe v direktnih metodah za ugotavljanje tranzientne stabilnosti uporabili tudi za izdelavo regulacijskih strategij kombiniranih naprav FACTS za izboljšanje tranzientne stabilnosti EES. Izboljšanje tranzientne stabilnosti pomeni povečanje CCT za stabilnost prvega nihaja in povečanje dušenja nadaljnjih nihanj. Regulacijsko strategijo smo prikazali na napravah UPFC in IPFC.

Poleg tega doktorska naloga povzema tudi že ugotovljene prispevke v energijskih funkcijah za naprave FACTS iz različne literature in tako pomeni sklenjeno enoto večine naprav FACTS v energijskih funkcijah EES.

Potek dela

V prvem poglavju smo predstavili teorijo direktne metode Ljapunova in njeno uporabo v EES. V tem poglavju smo izpeljali energijsko funkcijo EES z ohranjeno strukturo sistema brez naprav FACTS in predstavili njeno uporabo v direktni metodi za ugotavljanje tranzientne stabilnosti.

V drugem poglavju smo opisali karakteristike naprav UPFC, IPFC, BESS-STATCOM, BESS-SSSC in BESS-UPFC, njihove injekcijske modele in določili energijske funkcije teh naprav.

V tretjem poglavju smo opisali postopek ugotavljanja kritičnega časa odstranitve motnje po simulacijski in direktni metodi. Tu smo določili postopek upoštevanja odsekoma konstantnih

parametrov naprav FACTS v direktni metodi. To poglavje vsebuje numerične primere ugotavljanja kritičnih časov odstranitve motnje po simulacijski in direktni metodi pri različnih vrednostih regulacijskih parametrov naprav FACTS v testnih sistemih generator – toga mreža in v devetvozliščnem sistemu IEEE s tremi generatorji.

V četrtem poglavju smo definirali regulacijsko strategijo naprav FACTS, ki temelji na energijski funkciji EES s temi napravami. V tem poglavju smo prikazali izboljšanje stabilnosti prvega nihaja in dušenja nadaljnjih nihanjih z napravami UPFC in IPFC v testnih sistemih generator – toga mreža in v devetvozliščnem sistemu IEEE.

V petem poglavju smo v razpredelnici na enem mestu prikazali energijske funkcije naprav FACTS v EES z ohranjeno strukturo omrežja za vse do zdaj poznane naprave FACTS skupaj s kratkim opisom naprave in njene regulacijske strategije.

V šestem poglavju, tj. v sklepu, smo povzeli bistvene ugotovitve doktorske disertacije. V zadnjih treh poglavjih smo podali izvirne prispevke doktorske disertacije, uporabljeno literaturo in priloge, ki vsebujejo značilne primere datotek iz programskega okolja *Mathematica*.

1 Energijske funkcije EES

1.1 Tranzientna stabilnost

Izraz tranzientna ali prehodna stabilnost se nanaša na stabilnost kotov rotorjev ob velikih motnjah v EES kot npr. kratki stik na vodu. Odziv sistema je velika sprememba kotov rotorjev posameznih generatorjev, ki so nelinearno odvisni od električne moči generatorjev.

Tranzientna stabilnost je odvisna od velikosti motnje in izhodiščnega stanja EES. Nestabilnost ima po navadi obliko neperiodične odcepitve generatorja zaradi premajhnega sinhronizacijskega navora in se kaže kot nestabilnost prvega nihaja (angl. *first swing instability*). Poleg tega se v velikih EES lahko tranzientna nestabilnost pojavi ne le kot nestabilnost prvega nihaja, temveč tudi kot posledica hkratnega pojava nihanja med posameznimi območji EES (angl. *interarea mode oscillations*) in nihanja posameznega generatorja (angl. *local plant mode oscillations*) [5]. Časovni okvir proučevanja tranzientne stabilnosti je po navadi med 3 in 5 sekundami, ki se pri zelo velikih sistemih in nihanjih med posameznimi območji lahko podaljša na 10 do 20 sekund.

V literaturi se pojavlja tudi izraz dinamična stabilnost (angl. *dynamic stability*), ki se nanaša na stabilnost kotov rotorjev. Vendar izraz dinamična stabilnost avtorji uporabljajo za različne pojave. V severnoameriški literaturi so ga avtorji največkrat uporabljali za prehodne pojave pri majhnih motnjah (angl. *small-disturbance stability* ali *small-signal stability*) ob prisotnosti avtomatske regulacije vzbujanja generatorjev kot razloček k statični stabilnosti (angl. *steady-state stability*) brez regulacije generatorjev. V evropski literaturi so avtorji izraz dinamična stabilnost največkrat uporabljali za tranzientno stabilnost. Zaradi zmede, ki je večkrat nastala zaradi uporabe izraza dinamična stabilnost, avtorji v [5] odsvetujejo njegovo uporabo.

1.2 Teorem Ljapunova o stabilnosti

Sistem, kakršen je EES, lahko po [6] v splošnem zapišemo kot niz nelinearnih diferencialnih enačb:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}) \quad (1.1)$$

kjer je \mathbf{x} vektor spremenljivk stanja, $\dot{\mathbf{x}}$ njegov odvod in f odvedljiva funkcija spremenljivk stanja \mathbf{x} . Spremenljivke stanja v EES so fazorji napetosti v vozliščih EES ter koti rotorjev in hitrost oddaljevanja rotorjev od sinhronne osi. Enačbo (1.1) za EES zapišemo kot sistem enačb (1.5) in (1.6). Regulacija posameznih elementov EES v (1.1) ni posebej omenjena, ker je vsaka regulacija u vnaprej določena funkcija spremenljivk stanja \mathbf{x} , tj. $u(\mathbf{x})$, in zapis $f(\mathbf{x}, u(\mathbf{x}))$ ni potreben. Splošno definicijo stabilnosti podajamo v nadaljevanju.

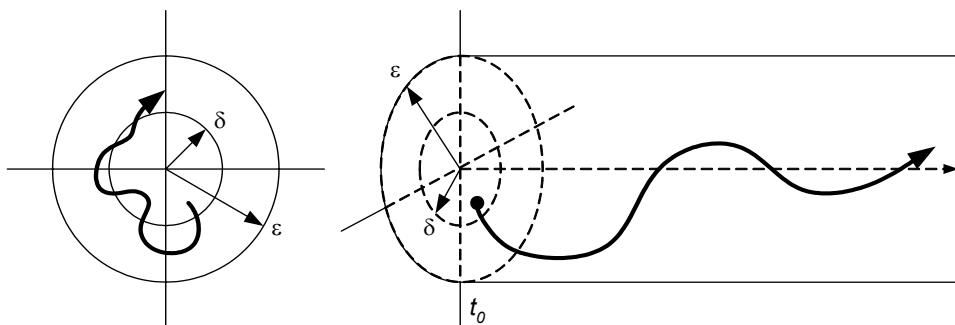
Definicija:

Ravnovesna točka $\hat{\mathbf{x}}$ sistema (1.1), za katero velja $f(\hat{\mathbf{x}}) = 0$ je:

- *stabilna*, če za vsak $\varepsilon > 0$ obstaja tak $\delta = \delta(\varepsilon, t_0) > 0$, da:

$$\|\mathbf{x}(t_0)\| < \delta \Rightarrow \|\mathbf{x}(t)\| < \varepsilon, \quad \forall t \geq t_0 \geq 0 \quad (1.2)$$

Slika 1.1 prikazuje trajektorijo sistema $\mathbf{x}(t)$ v okolici stabilne ravnovesne točke v prostoru spremenljivk stanja $\mathbf{x} \in R^2$, tj. v dvodimenzionalnem prostoru realnih spremenljivk. Če je začetna točka trajektorije znotraj kroga s polmerom δ , potem trajektorija sistema $\mathbf{x}(t)$ ves čas $t > t_0$ leži znotraj cilindra s polmerom ε .



Slika 1.1: Definicija stabilnosti sistema

- *nestabilna*, če ni stabilna;
- *asimptotično stabilna*, če je stabilna in se poleg tega trajektorija sistema $\mathbf{x}(t)$ vrne v ravnovesno točko, ko gre $t \rightarrow \infty$.

Klasični način ugotavljanja stabilnosti je računanje trajektorije sistema $\mathbf{x}(t)$ z numeričnim reševanjem diferencialnih enačb (1.1) korak po koraku. Na ta način za vnaprej določen čas odstranitve motnje t_{cl} ugotovimo potek trajektorije ter glede na potek kotov in hitrosti generatorjev določimo, ali sistem ohrani stabilnost ali ne. S ponavljanjem računanja trajektorije pri različnih časih odstranitve motnje t_{cl} ugotovimo kritični čas odstranitve motnje t_{cr} (angl. *Critical Clearing Time – CCT*). Ta način ugotavljanja CCT-jev v nadaljevanju označujemo kot simulacijska metoda.

A. M. Ljapunov je že leta 1892 pokazal, da stabilnost sistema, zapisanega kot (1.1), lahko ugotovimo brez reševanja diferencialnih enačb. Metoda temelji na konstrukciji skalarnе funkcije $V(\mathbf{x})$, definirane v prostoru spremenljivk stanja sistema. Metoda je postala znana kot direktna metoda ugotavljanja stabilnosti sistemov. Glavni problem direktne metode je najti primerno skalarno funkcijo $V(\mathbf{x})$.

Teorem Ljapunova o stabilnosti:

Ravnovesna točka $\hat{\mathbf{x}}$ sistema (1.1), za katero velja $f(\hat{\mathbf{x}}) = 0$, je:

- *stabilna*, če obstaja zvezno odvedljiva pozitivno definitna funkcija $V(\mathbf{x})$, tako da je njen odvod po času manjši ali enak nič ($\dot{V}(\mathbf{x}) \leq 0$) in ima stabilno ravnovesno točko v isti točki, kot jo ima sistem po odstranitvi motnje;
- *asimptotično stabilna*, če je stabilna in je poleg tega $\dot{V}(\mathbf{x}) < 0$.

Skalarna funkcija $V(\mathbf{x})$, ki zadostuje zgoraj navedenim pogojem za stabilnost ali asimptotično stabilnost, imenujemo funkcijo Ljapunova. Teorem Ljapunova ne govori o tem, kdaj je ravnovesna točka $\hat{\mathbf{x}}$ nestabilna, kajti pogoj za stabilnost po tem teoremu je zadosten, ne pa tudi potreben. Če funkcija $V(\mathbf{x})$, ki je kandidat za funkcijo Ljapunova (angl. *Lyapunov function candidate*), ne zadosti pogojem teorema Ljapunova, ne pomeni, da ravnovesna točka $\hat{\mathbf{x}}$ ni stabilna ali asimptotično stabilna. Pomeni le, da s funkcijo $V(\mathbf{x})$ ne moremo ugotoviti stabilnosti ali asimptotične stabilnosti.

Ko je ravnovesna točka $\hat{\mathbf{x}}$ asimptotično stabilna, nas pogosto zanima, koliko proč od te točke $\hat{\mathbf{x}}$ je lahko trajektorija $\mathbf{x}(t)$, da bo še konvergirala proti $\hat{\mathbf{x}}$, ko gre t proti ∞ . To nas vodi k definiciji območja privlačenja (angl. *region of attraction*). Naj bo $\phi(t; \mathbf{x}_0)$ rešitev (1.1), ki ima izhodišče \mathbf{x}_0 v času $t = 0$. Potem je območje privlačenja definirano kot množica vseh \mathbf{x}_0 , za

katere velja $\lim_{t \rightarrow \infty} \phi(t; \mathbf{x}_0) = 0$. Analitično najti točno območje privlačenja je težko ali celo nemogoče. Lahko pa s pomočjo funkcije Ljapunova ocenimo območje privlačnosti, tj. poiščemo neko območje ali podmnožico, ki jo območje privlačnosti kot množica prej določenih \mathbf{x}_0 vsebuje. Če funkcija Ljapunova $V(\mathbf{x})$ zadosti pogojem za asimptotično stabilnost in če obstaja območje $\Omega_c = \{V(\mathbf{x}) \leq c\}$, ki je omejeno, potem vsaka trajektorija z začetkom v Ω_c ostane v območju Ω_c , ko gre $t \rightarrow \infty$. Tako območje Ω_c pomeni oceno območja privlačnosti. Ta ocena območja privlačnosti je lahko precej konservativna, kar pomeni, da je ocenjeno območje privlačnosti lahko precej manjše od dejanskega območja privlačenja.

Največjo vrednost skalarne funkcije $V(\mathbf{x})$, pri kateri je območje Ω_c še omejeno, označimo kot kritično vrednost V_{cr} . Direktna metoda ugotavljanja stabilnosti sistema temelji na iskanju kritičnega časa t_{cr} , ko vrednost skalarne funkcije $V(\mathbf{x})$, računane po trajektoriji sistema $\mathbf{x}(t)$, doseže kritično vrednost V_{cr} .

Sistem (1.1) ima lahko več funkcij Ljapunova $V(\mathbf{x})$, ki dajejo različno oceno območja privlačenja. Dobra funkcija Ljapunova je tista, ki daje največjo oceno območja stabilnosti in je s tem najbližje dejanskemu območju privlačnosti. Običajno imajo dobre funkcije Ljapunova fizikalni pomen [7] in opisujejo npr. energijo sistema.

1.3 Funkcija Ljapunova EES

Uporaba teorije Ljapunova v EES je doživela svoj razcvet v zadnjih treh desetletjih prejšnjega stoletja. Različni avtorji so raziskovali možnosti njene uporabe za ugotavljanje tranzientne stabilnosti EES in za regulacijo posameznih elementov v EES. Ključni elementi raziskovanja uporabe teorije Ljapunova so bili osredotočeni na iskanje ustreznih funkcij Ljapunova, na določevanje čim bolj točnih oz. realističnih območji stabilnosti – področij privlačjenja in na upoštevanje čim bolj natančnih modelov omrežja. V tej doktorski disertaciji določene energijske funkcije kombiniranih naprav FACTS temeljijo na energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo omrežja, ki je določena kot prvi integral nihajnih enačb in je bila predstavljena v [8]. Povzetek izpeljave te energijske funkcije podajamo v nadaljevanju.

1.3.1 Modeliranje EES

Za potrebe tranzientne stabilnosti smo sistem modelirali z upoštevanjem teh predpostavk:

1. Mehanska moč generatorjev je konstantna.
2. Dušenje sistema zanemarimo.
3. Sinhronski generatorji so predstavljeni klasično, tj. kot konstantna napetost za tranzientno reaktanco.
4. Mehanski kot rotorja generatorja je enak kotu napetosti za tranzientno reaktanco.
5. Bremana so predstavljena kot konstantne moči ali kot konstantne impedance.

Predpostavko 2 v določenih primerih lahko izboljšamo tako, da predpostavimo dušenje sistema, ki je linearno odvisno od hitrosti oddaljevanja rotorja generatorja od sinhronske osi. Koeficient dušenja sistema D pri tem obsega različna dušenja, mehanska in električna.

V nadaljevanju hitrost oddaljevanja rotorja generatorja od sinhronske osi poenostavljeno označujemo kot hitrost rotorja, ki je pravzaprav razlika kotne hitrosti vrtenja rotorja glede na kotno hitrost vrtenja sinhronske osi.

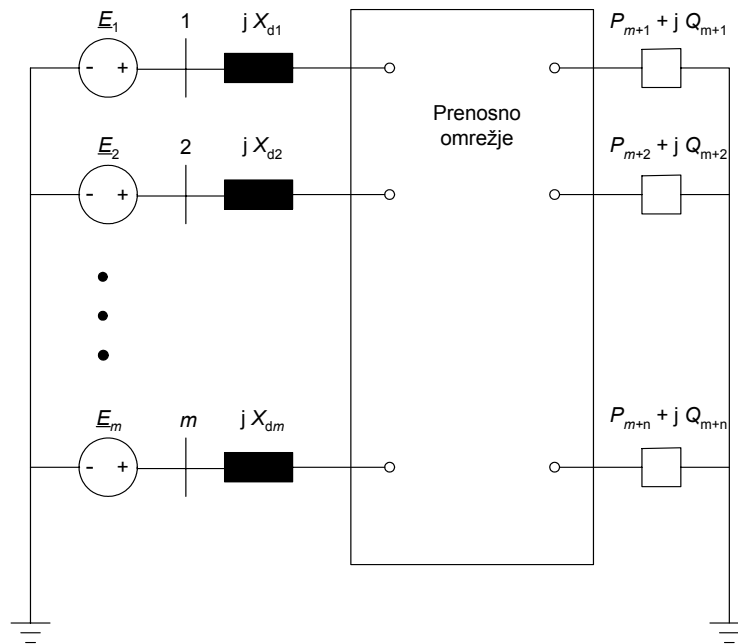
Predpostavka 5 glede bremen je upoštevana zaradi pripravnosti. Obnašanje bremen je na splošno dinamično, saj po navadi ni povsem natančno znano in se giblje nekje med

konstantno impedanco in konstantno močjo. Način upoštevanja bremen lahko občutno vpliva na rezultate analize stabilnosti.

Shema EES z m generatorji in n bremenski vozlišči prikazuje slika 1.2. Konstantne amplitude napetosti $\underline{E}_1, \underline{E}_2, \dots, \underline{E}_m$ so izračunane na podlagi stacionarnih razmer v omrežju pred pojavom motnje na podlagi pretokov moči.

EES na sliki 1.2 je popolnoma opisan s temi spremenljivkami [8]:

- m rotorskih kotov $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_m$
- m rotorskih hitrosti $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m$; pri tem velja: $\omega_i = \dot{\delta}_i$
- m konstantnih amplitud napetosti E_1, E_2, \dots, E_m
- n amplitud napetosti bremenskih vozlišč $U_{m+1}, U_{m+2}, \dots, U_{m+n}$
- n kotov napetosti bremenskih vozlišč $\theta_{m+1}, \theta_{m+2}, \dots, \theta_{m+n}$



Slika 1.2: Shema EES z m generatorji in n bremenski vozlišči

Zaradi lažjega nadaljnega opisovanja EES poenotimo označevanje kotov s simbolom ϕ in označevanje vseh napetosti, generatorskih in drugih, s simbolom U . Skupni vektor kotov ϕ zapišemo kot:

$$\phi = [\phi_1 = \delta_1, \dots, \phi_m = \delta_m, \phi_{m+1} = \theta_{m+1}, \dots, \phi_{m+n} = \theta_{m+n}]^T \quad (1.3)$$

Koti ϕ_1 do ϕ_m so koti m rotorjev δ_1 do δ_m in koti ϕ_{m+1} do ϕ_{m+n} koti napetosti n bremenskih vozlišč θ_{m+1} do θ_{m+n} . Podobno zapišemo skupni vektor napetosti U kot:

$$U = [U_1 = E_1, \dots, U_m = E_m, U_{m+1}, \dots, U_{m+n}]^T \quad (1.4)$$

Napetosti U_1 do U_m so inducirane napetosti m generatorjev E_1 do E_m in napetosti U_{m+1} do U_{m+n} napetosti n bremenskih vozlišč U_{m+1} do U_{m+n} . Zaradi lažjega zapisovanja razlike med posameznimi koti uporabimo zapis $\phi_{ij} = \phi_i - \phi_j$.

Model EES na sliki 1.2 z ohranjeno strukturo sistema zapišemo s temi diferencialnimi in algebrskimi enačbami:

$$\dot{\phi}_i = \omega_i \quad ; \quad i = 1 \dots m \quad (1.5)$$

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - \sum_{j=1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \sin(\phi_{ij}) \quad ; \quad i = 1 \dots m \quad (1.6)$$

$$P_i(U_i) = - \sum_{j=1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \sin(\phi_{ij}) \quad ; \quad i = m+1 \dots m+n \quad (1.7)$$

$$Q_i(U_i) = \sum_{j=1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \cos(\phi_{ij}) \quad ; \quad i = m+1 \dots m+n \quad (1.8)$$

Pri tem je:

- M_i vztrajnostna konstanta generatorja;
- P_{mi} mehanska moč, ki se prenaša na os generatorja in jo upoštevamo kot konstantno v obdobju tranzientnega pojava;
- B_{ij} susceptanca med vozliščema i in j . Pri tem velja, da je B_{ii} vsota vseh susceptanc

med vozliščem i in sosednjimi vozlišči: $B_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m+n} B_{ij}$

- $P_i(U_i)$ delovna moč bremena, ki je odvisna od napetosti priključnega vozlišča U_i
- $Q_i(U_i)$ jalova moč bremena, ki je odvisna od napetosti priključnega vozlišča U_i

Diferencialne enačbe, ki jih konstruiramo na podlagi (1.5) in (1.6), so nihajne enačbe sistema (angl. *swing equations*), na katere se nanaša teorija Ljapunova in smo jih v splošnem zapisali kot (1.1). Vendar samo nihajne enačbe sistema ne zadostujejo, ker sta napetosti U_i in U_j odvisni od pretokov moči v omrežju, kar se matematično kaže v tem, da na podlagi (1.5) in (1.6) dobimo $2m$ enačb, spremenljivk pa je $2(m+n)$. Zato za popoln opis EES potrebujemo še $2n$ enačb pretokov moči, ki jih konstruiramo na podlagi (1.7) in (1.8). Pri tem naj omenimo, da z (1.7) in (1.8) zajamemo vsa vozlišča EES razen generatorskih, torej tudi tista, ki nimajo priključenih bremen in so vmesna vozlišča prenosnega sistema, ki definirajo njegovo strukturo. Za lažje razumevanje naj še poudarimo, da se indeksi i v (1.5) in (1.6) nanašajo na generatorska vozlišča, medtem ko se v (1.7) in (1.8) nanašajo na vsa druga vozlišča EES. S tem vsote v (1.6) in (1.7) ne moremo enačiti.

Tu naj prikažemo transformacijo nihajnih enačb na fiktivno točko centra vztrajnostnih mas EES (angl. *Center Of Inertia – COI*). Transformacija je potrebna pri iskanju in uporabi funkcije Ljapunova, medtem ko pri numeričnem reševanju spremeni obliko zapisa trajektorije in s tem nazorneje prikaže stabilnost ali stopnjo dušenja posameznih generatorjev. Transformacijo definirajo te enačbe [8]:

$$M_T = \sum_{i=1}^m M_i \quad (1.9)$$

$$\delta_{\text{COI}} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \delta_i \quad (1.10)$$

$$\dot{\delta}_{\text{COI}} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \dot{\delta}_i \quad (1.11)$$

$$\omega_{\text{COI}} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \omega_i \quad (1.12)$$

$$\dot{\omega}_{\text{COI}} = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^m M_i \dot{\omega}_i \quad (1.13)$$

Kote rotorjev in kote napetosti vozlišč označimo s COI kot:

$$\tilde{\phi}_i = \phi_i - \delta_{\text{COI}} = \begin{cases} \tilde{\delta}_i = \delta_i - \delta_{\text{COI}} & ; \quad i = 1 \dots m \\ \tilde{\theta}_i = \theta_i - \delta_{\text{COI}} & ; \quad i = m+1 \dots m+n \end{cases} \quad (1.14)$$

Odvode kotov oz. hitrosti rotorjev s COI označimo kot:

$$\dot{\tilde{\phi}}_i = \dot{\phi}_i - \dot{\delta}_{\text{COI}} = \begin{cases} \tilde{\omega}_i = \omega_i - \omega_{\text{COI}} & ; & i = 1 \dots m \\ \tilde{\theta}_i = \dot{\theta}_i - \dot{\delta}_{\text{COI}} & ; & i = m+1 \dots m+n \end{cases} \quad (1.15)$$

Moč centra vztrajnostnih mas definiramo kot:

$$P_{\text{COI}} = M_T \cdot \dot{\tilde{\omega}}_i \quad (1.16)$$

S COI izražene enačbe EES (1.5) do (1.8) zapišemo kot:

$$\dot{\tilde{\phi}}_i = \tilde{\omega}_i \quad ; \quad i = 1 \dots m \quad (1.17)$$

$$M_i \dot{\tilde{\omega}}_i = P_{mi} - \sum_{j=1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \sin(\tilde{\phi}_{ij}) - \frac{M_i}{M_T} P_{\text{COI}} \quad ; \quad i = 1 \dots m \quad (1.18)$$

$$P_i(U_i) = - \sum_{j=1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \sin(\tilde{\phi}_{ij}) \quad ; \quad i = m+1 \dots m+n \quad (1.19)$$

$$Q_i(U_i) = \sum_{j=1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \cos(\tilde{\phi}_{ij}) \quad ; \quad i = m+1 \dots m+n \quad (1.20)$$

1.3.2 Izpeljava funkcije Ljapunova za EES

Osnovni pogoj za uporabo direktne metode Ljapunova je konstrukcija primerne funkcije Ljapunova, ki predstavlja EES z nizom algebraskih enačb. V preteklosti so uspeli skonstruirati več različnih funkcij Ljapunova, vendar se je kot edina uporabna izkazala funkcija, ki predstavlja sistem kot vsoto kinetične in potencialne energije po odpravi motnje [9]. Tako je funkcija Ljapunova hkrati energijska funkcija EES, ki jo dobimo z integriranjem nelinearnih diferencialnih enačb sistema. Izpeljavo funkcije Ljapunova EES, predstavljenega v prejšnjem poglavju, povzemamo po [8] in [10]. Funkcijo Ljapunova dobimo kot prvi integral enačb EES (1.17) do (1.20), ki jih preoblikujemo po naslednjem postopku. Najprej (1.20) delimo z napetostjo U_i in množimo z odvodom napetosti \dot{U}_i in seštejemo po vseh

vozliščih. Pri tem upoštevamo, da je \dot{U}_i v generatorskih vozliščih enak 0, ker smo generatorje definirali kot konstantne napetosti za tranzientno reaktanco.

$$\sum_{i=m+1}^{m+n} \frac{Q_i(U_i)}{U_i} \dot{U}_i = \sum_{i=m+1}^{m+n} B_{ii} U_i \dot{U}_i + \sum_{i=m+1}^{m+n} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{m+n} B_{ij} \dot{U}_i U_j \cos(\tilde{\phi}_{ij}) \quad (1.21)$$

V zadnjem delu izraza (1.21) se par (i,j) vedno pojavlja dvakrat, zato ga lahko z drugačno določitvijo indeksov i ni j v vsoti izrazimo tako, da se pojavi samo enkrat:

$$\sum_{i=m+1}^{m+n} \frac{Q_i(U_i)}{U_i} \dot{U}_i = \sum_{i=m+1}^{m+n} B_{ii} U_i \dot{U}_i + \sum_{i=m+1}^{m+n-1} \sum_{j=i+1}^{m+n} B_{ij} (\dot{U}_i U_j + U_i \dot{U}_j) \cos(\tilde{\phi}_{ij}) \quad (1.22)$$

Nadalje izraz (1.18) pomnožimo z $\tilde{\omega}_i = \dot{\tilde{\phi}}_i$, seštejemo po m generatorskih vozliščih in glede na [8] upoštevamo, da je $\sum_{i=1}^m P_{\text{COI}i} = 0$:

$$\sum_{i=1}^m M_i \tilde{\omega}_i \dot{\tilde{\omega}}_i = \sum_{i=1}^m P_{\text{mi}} \dot{\tilde{\phi}}_i - \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \sin(\tilde{\phi}_{ij}) \cdot \dot{\tilde{\phi}}_i \quad (1.23)$$

Podobno izraz (1.19) pomnožimo z $\dot{\tilde{\phi}}_i$ in seštejemo po vseh n omrežnih vozliščih:

$$\sum_{i=m+1}^{m+n} P_i(U_i) \cdot \dot{\tilde{\phi}} = - \sum_{i=m+1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \sin(\tilde{\phi}_{ij}) \cdot \dot{\tilde{\phi}} \quad (1.24)$$

Izraza (1.23) in (1.24) seštejemo in podobno kot v izrazu (1.22) vsoto zapišemo tako, da se par (i,j) pojavi samo enkrat:

$$\sum_{i=1}^m M_i \tilde{\omega}_i \dot{\tilde{\omega}}_i + \sum_{i=m+1}^{m+n} P_i(U_i) \cdot \dot{\tilde{\phi}} = \sum_{i=1}^m P_{\text{mi}} \dot{\tilde{\phi}}_i - \sum_{i=1}^{m+n-1} \sum_{j=i+1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \sin(\tilde{\phi}_{ij}) \cdot (\dot{\tilde{\phi}}_i - \dot{\tilde{\phi}}_j) \quad (1.25)$$

Izraza (1.25) in (1.22) seštejemo:

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^m M_i \tilde{\omega}_i \dot{\tilde{\omega}}_i + \sum_{i=m+1}^{m+n} P_i(U_i) \cdot \dot{\tilde{\phi}} + \sum_{i=m+1}^{m+n} \frac{Q_i(U_i)}{U_i} \dot{U}_i \\
& - \sum_{i=1}^m P_{mi} \dot{\tilde{\phi}}_i + \sum_{i=1}^{m+n-1} \sum_{j=i+1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \sin(\tilde{\phi}_{ij}) \cdot (\dot{\tilde{\phi}}_i - \dot{\tilde{\phi}}_j) \\
& - \sum_{i=m+1}^{m+n} B_{ii} U_i \dot{U}_i - \sum_{i=m+1}^{m+n-1} \sum_{j=i+1}^{m+n} B_{ij} (\dot{U}_i U_j + U_i \dot{U}_j) \cos(\tilde{\phi}_{ij}) \\
& = 0
\end{aligned} \tag{1.26}$$

Izraz (1.26) je seštevek preoblikovanih enačb EES (1.17) do (1.20). Prvi integral izraza (1.26) po času je funkcija Ljapunova EES, ki jo želimo poiskati. Integrale posameznih členov (1.26) poskušamo določiti analitično. Za člene, ki ne vsebujejo delovnih ali jalovih bremen P_i ali Q_i , integral določimo brez težav. Člena, ki vsebujeta delovna ali jalova bremena P_i ali Q_i , pa obravnavamo glede na definicijo posameznega bremena. Ob upoštevanju, da so M_i , P_{mi} in B_{ij} konstante in da je izraz $U_i U_j \cos(\tilde{\phi}_{ij})$, odvajan per-partes, po času enak $\dot{U}_i U_j \cos(\tilde{\phi}_{ij}) + U_i \dot{U}_j \cos(\tilde{\phi}_{ij}) + U_i U_j \sin(\tilde{\phi}_{ij}) \cdot \dot{\tilde{\phi}}_{ij}$, lahko integral izraza (1.26) zapišemo kot:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^m P_{mi} \tilde{\phi}_i + \sum_{i=1}^{m+n-1} \sum_{j=i+1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \cos(\tilde{\phi}_{ij}) - \frac{1}{2} \sum_{i=m+1}^{m+n} B_{ii} U_i^2 \\
& + \int \sum_{i=m+1}^{m+n} P_i(U_i) \cdot \dot{\tilde{\phi}} + \int \sum_{i=m+1}^{m+n} \frac{Q_i(U_i)}{U_i} \dot{U}_i + K \\
& = 0
\end{aligned} \tag{1.27}$$

Zadnja dva člena (1.27) obravnavamo glede na 5. predpostavko iz poglavja 1.3.1, kjer smo predpostavili bremena kot konstantne moči ali kot konstantne impedance. Tako je člen izraza (1.27), ki vsebuje delovna bremena P_i , analitično rešljiv le, če je delovna moč P_i konstantna, medtem ko je člen, ki vsebuje jalova bremena Q_i , analitično rešljiv, če je jalova moč Q_i konstantna ali kvadratno sorazmerna napetosti, tj. predstavljena kot konstantna impedanca. Ob predpostavki, da je P_i konstantna in $Q_i = B_{\text{breme}} \cdot U_i^2$, pri čemer je B_{breme} konstantna susceptanca bremena, lahko izraz (1.27) zapišemo kot:

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \tilde{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^m P_{mi} \tilde{\phi}_i + \sum_{i=1}^{m+n-1} \sum_{j=i+1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \cos(\tilde{\phi}_{ij}) - \frac{1}{2} \sum_{i=m+1}^{m+n} B_{ii} U_i^2 \\
& + \sum_{i=m+1}^{m+n} P_i \cdot \tilde{\phi} + \frac{1}{2} \sum_{i=m+1}^{m+n} B_{\text{breme}} U_i^2 + K \\
& = 0
\end{aligned} \tag{1.28}$$

Izraz (1.28) je funkcija Ljapunova EES in jo v lahko zapišemo kot:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + K \quad (1.29)$$

pri čemer velja:

$$V_k(\tilde{\omega}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m M_i \tilde{\omega}_i \quad (1.30)$$

$$\begin{aligned} V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) = & -\sum_{i=1}^m P_{mi} \tilde{\phi}_i + \sum_{i=m+1}^{m+n} P_i \cdot \tilde{\phi} + \sum_{i=1}^{m+n-1} \sum_{j=i+1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \cos(\tilde{\phi}_{ij}) - \frac{1}{2} \sum_{i=m+1}^{m+n} B_{ii} U_i^2 \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=m+1}^{m+n} B_{\text{breme}} U_i^2 + K \end{aligned} \quad (1.31)$$

Zapis (1.30) v splošnem označujemo kot kinetično energijo, medtem ko izraz (1.31) označujemo kot potencialno energijo. Zato funkcijo Ljapunova EES označujemo tudi kot energijsko funkcijo EES. Kinetična energija je energija, ki se kopiči v rotorjih generatorjev zaradi pospeševanja glede na sinhronsko hitrost vrtenja, medtem ko izraz za potencialno energijo pomeni kot generatorjev glede na COI oziroma zmožnost sistema, da sprejme energijo, ki je nakopičena v rotorjih generatorjev.

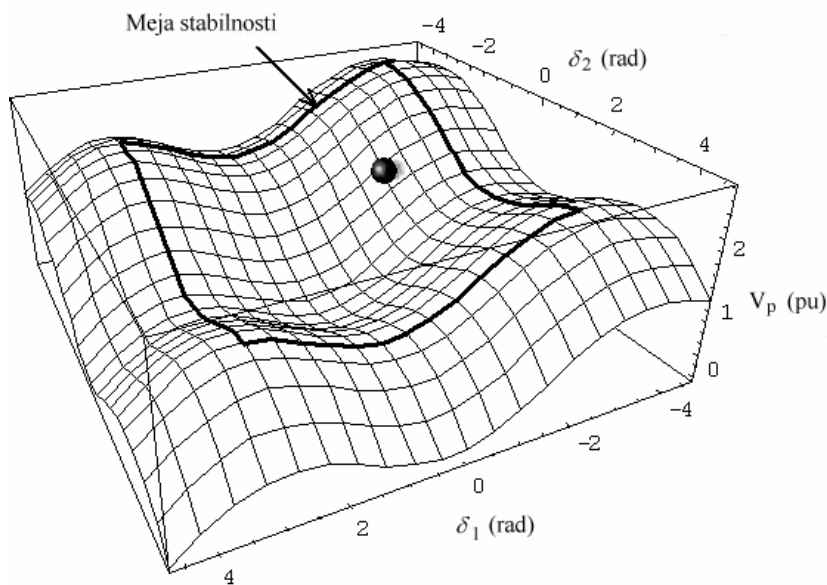
1.4 Uporaba energijske funkcije Ljapunova v direktni metodi ugotavljanja stabilnosti EES

Uporaba omenjene energijske funkcije Ljapunova v direktni metodi ugotavljanja stabilnosti EES lahko nazorno prikažemo na mehanskem modelu kroglice na skledasto oblikovani površini kot v [11]. Model je prikazan na sliki 1.3. Površina skledaste oblike predstavlja potencialno energijo V_p (1.31) sistema po odpravi motnje. Model velja za omrežje s tremi generatorji, kjer vodoravni osi pomenita rotorski kot posameznega generatorja, tj. δ_1 in δ_2 v sistemu COI glede na sliko 1.3. Potencialna energija ima lokalni minimum v stabilni ravnovesni točki, ki ustreza rotorskim kotom po končanem prehodnem pojavu po odpravi motnje. Okrog te točke potencialna energija tvori površino skledaste oblike, ki predstavlja stabilno področje obratovanja sistema. Obratovalno točko EES predstavlja kroglica, katere kinetična energija pomeni kinetično energijo sistema V_k (1.30) in se kotali po površini potencialne energije. V stacionarnem stanju kroglica miruje na dnu površine v stacionarni ravnovesni točki. Ko se pojavi motnja, npr. kratek stik, kroglica pospešuje proti vrhu površine, vse dokler motnja ni odstranjena. Glede na vsoto kinetične in potencialne energije kroglice se lahko ta odkotali čez rob oz. prevoj, kar pomeni nestabilno stanje, ali pa niha znotraj vdolbine in se vrne na dno, kar pomeni stabilno stanje.

Načelo ugotavljanja stabilnosti sistema je, da primerjamo vsoto potencialne in kinetične energije kroglice s potencialno energijo na meji stabilnosti. Katero točko na tej meji stabilnosti vzamemo kot kritično vrednost V_{cr} , ki je vsota kinetične in potencialne energije kroglice ne sme preseči, je poleg iskanja same energijske funkcije $V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U})$ (1.29) druga bistvena naloga direktne metode. Dejanske točke, v kateri kroglica prečka mejo stabilnosti, za sistem z več generatorji analitično ni mogoče določiti, zato njeno vrednost lahko samo približno ocenimo z različnimi metodami [12], ki jih lahko v splošnem razdelimo na tri metode:

- a) V osnovi direktna metoda Ljapunova za kritično vrednost V_{cr} določa vrednost energijske funkcije $V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U})$ v najnižji sedelni točki na meji stabilnosti. Slabost te

- metode je, da po navadi daje preveč pesimistične rezultate, poleg tega pa je treba poiskati vrednosti funkcije $V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U})$ v vseh sedelnih točkah EES.
- b) Druga možnost določitve kritične vrednosti V_{cr} je, da jo določimo kot vrednost funkcije $V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U})$ v sedelni točki, ki je najbližja trajektoriji sistema med motnjo. To je zahteven računski postopek, lahko pa uporabimo digitalno simulacijo, kar nas privede do hibridnih metod ugotavljanja stabilnosti, pri katerih se kombinirajo direktne metode in digitalna simulacija.
- c) Pri naših izračunih bomo uporabili metodo, ki kritično vrednost V_{cr} določi kot vrednost $V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U})$ v točki, v kateri kroglica prečka mejo stabilnosti, če motnje ne odpravimo. Ta metoda je v literaturi predstavljena kot metoda PEBS (angl. *potential energy boundary surface*) in daje dobre rezultate, če se trajektorija kritično odstranjene motnje dobro prilega trajektoriji sistema z motnjo. Prednost te metode je v enostavnosti izračuna vrednosti V_{cr} .



Slika 1.3: Kroglica na površini potencialne energije

Stabilnost EES se s pomočjo direktne metode in energijske funkcije Ljapunova ugotavlja po teh korakih:

- a) Izračun stacionarne ravnovesne točke EES, tj. izračun vseh napetosti (1.4) in kotov (1.3).
- b) Določitev energijske funkcije Ljapunova $V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U})$.
- c) Izračun kritične vrednosti V_{cr} . Po metodi PEBS to vrednost določimo z numeričnim integriranjem nihajnih enačb (1.17) do (1.20) okvarjenega sistema (sistema z motnjo), dokler potencialna energija V_p (1.31), ki se računa za sistem brez motnje, ne doseže maksimalne vrednosti V_p^{\max} . Ta vrednost je obenem tudi kritična vrednost V_{cr} .
- d) Iskanje kritičnega časa odstranitve motnje t_{cr} , ki pomeni čas, ko je vrednost energijske funkcije $V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_{cr}$ na trajektoriji okvarjenega sistema. Trajektorijo okvarjenega sistema smo določili že v koraku c) pri iskanju kritične vrednosti V_{cr} .

Ker s pomočjo direktne metode stabilnost EES ugotavljamo analitično, lahko s to metodo tudi ocenimo oddaljenost trenutnega stanja sistema od meje stabilnega območja.

2 Energijske funkcije naprav FACTS

2.1 Univerzalni prečni transformator – UPFC

2.1.1 Prenosne karakteristike naprave UPFC

Za lažje razumevanje delovanja na kratko opišimo osnovne lastnosti naprave UPFC, ki so pomembne za nadaljnje izpeljave. Za sistem brez upoštevanja izgub UPFC lahko opišemo kot serijsko vezan napetostni vir z reaktanco X_{TRS} in paralelno priključenim tokovnim virom. Shemo in model naprave, nameščene med zbiralki i in j , ter diagram fazorjev napetosti in tokov prikazuje slika 2.1 (a-c). Tok I_T je v fazi z \underline{U}_i in predstavlja izmenjavo delovne moči med serijsko in paralelno vejo naprave UPFC. I_q predstavlja jalovi tok paralelne veje in je v večjem delu operacijskega območja neodvisen od velikosti napetosti U_i . Regulabilni parametri so U_T , φ_T in I_q , medtem ko je I_T odvisen od injicirane delovne moči v serijski veji. U_T predstavlja velikost injicirane napetosti \underline{U}_T , medtem ko φ_T predstavlja kot injicirane napetosti \underline{U}_T glede na napetost zbiralke \underline{U}_i . Injekcijski model serijske veje naprave UPFC je predstavljen v [13]. Je enak splošnemu injekcijskemu modelu statičnega sinhronskega serijskega kompenzatorja (angl. *Static Synchronous Series Compensator – SSSC*). Dodamo še jalovi tok paralelne veje in po nekaj matematičnih operacijah dobimo izraze za injekcijski model naprave UPFC.

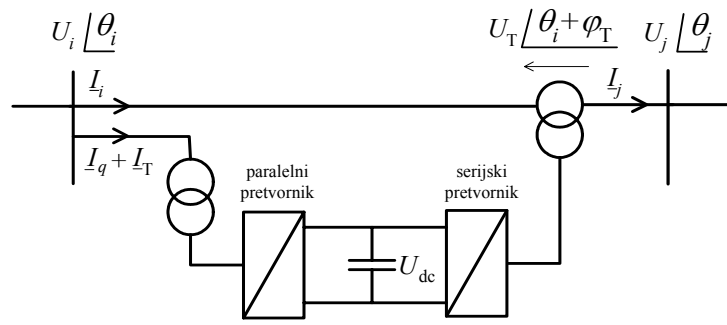
$$P_{si} = \frac{U_i U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\varphi_T) + U_i \cdot I_T \quad (2.1)$$

$$P_{sj} = -\frac{U_j U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.2)$$

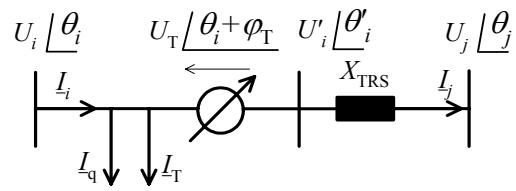
$$Q_{si} = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\varphi_T) + U_i \cdot I_q \quad (2.3)$$

$$Q_{sj} = -\frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.4)$$

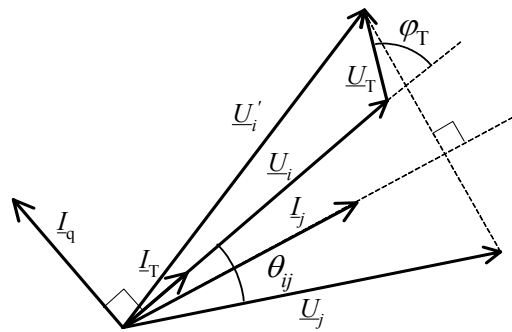
kjer je $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ glede na sliko 2.1.



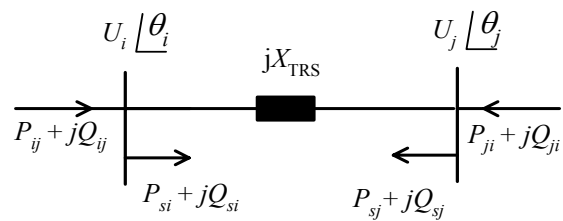
a)



b)



c)



d)

Slika 2.1: a) shema UPFC
 b) model UPFC
 c) diagram fazorjev napetosti
 d) injekcijski model UPFC

V nadaljevanju zamenjamo izraz za delovno moč paralelne veje z delovno močjo serijske veje. Ta delovna moč je enaka realnemu delu skalarnega produkta fazorjev serijske injicirane napetosti \underline{U}_T in konjugirane vrednosti toka serijske veje \underline{I}_j .

$$U_i \cdot I_T = \text{Re}[\underline{U}_T \cdot \underline{I}_j^*] \quad (2.5)$$

Tok \underline{I}_j lahko označimo kot:

$$\underline{I}_j = \left(\frac{\underline{U}'_i - \underline{U}_j}{jX_{\text{TRS}}} \right) \quad (2.6)$$

Velikost in kot napetosti \underline{U}'_i lahko označimo kot:

$$|\underline{U}'_i| = \sqrt{(U_i + U_T \cdot \cos(\varphi_T))^2 + (U_T \cdot \sin(\varphi_T))^2} \quad (2.7)$$

$$\arg(\underline{U}'_i) = \theta_i + \arctan\left(\frac{U_T \cdot \sin(\varphi_T)}{U_i + U_T \cdot \sin(\varphi_T)}\right) \quad (2.8)$$

Po nekaj algebrskih operacijah lahko delovno moč paralelne veje zapišemo kot:

$$\underline{U}_i \cdot \underline{I}_T = \frac{U_j U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) - \frac{U_i U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\varphi_T) \quad (2.9)$$

Na podlagi (2.9) lahko zapišemo delovno moč injekcijskega modela naprave UPFC kot:

$$P_{si} = \frac{U_j U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) = -P_{sj} \quad (2.10)$$

Enačbe (2.5) do (2.10) prikazujejo analitično metodo potrjevanja enakosti delovnih moči injekcijskega modela naprave UPFC ($P_{si} = -P_{sj}$).

Naj tu omenimo večkrat napačno predstavljen model naprave UPFC, ki ga v svojih raziskavah uporabljajo različni avtorji, kot npr. v [13], [14], [15]. V teh modelih je amplituda injicirane

serijske napetosti U_T definirana kot linearno odvisna od amplitude napetosti priključne sponke U_i .

$$U_T = r \cdot U_i \quad (2.11)$$

Enačba (2.10) velja za naprave, pri katerih je serijska veja pasivni element, kot npr. pri CSC in pri klasičnih prečnih transformatorjih, in je serijsko injicirana napetost sorazmerna napetosti \underline{U}_j . Posledično je pri teh napravah regulacijski parameter lahko r . Pri obravnavi naprave UPFC taka formulacija ni primerna, ker serijsko injicirano napetost proizvaja napetostni pretvornik in velikost serijsko injicirane napetosti v večini delovnega območja naprave UPFC ni odvisna od napetosti priključnih sponk \underline{U}_j .

2.1.2 Energijska funkcija naprave UPFC

Za konstrukcijo energijske funkcije sledimo postopku iz [8], ki opisuje konstruiranje energijske funkcije za elektroenergetski sistem brez naprav FACTS. Injicirane delovne moči naprave UPFC P_{si} in P_{sj} pomnožimo s časovnim odvodom posameznih kotov napetosti $\dot{\theta}_i$ in $\dot{\theta}_j$ in jih seštejemo:

$$P_{si} \dot{\theta}_i = \frac{U_j U_T}{X_{TRS}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \cdot \dot{\theta}_i \quad (2.12)$$

Podobno enačbi (2.3) in (2.4) delimo z U_i in U_j ter množimo s časovnim odvodom \dot{U}_i in \dot{U}_j :

$$\frac{Q_{si}}{U_i} \dot{U}_i = \frac{\dot{U}_i U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) + \dot{U}_i \cdot I_q \quad (2.13)$$

$$\frac{Q_{sj}}{U_j} \dot{U}_j = -\frac{\dot{U}_j U_T}{X_{TRS}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.14)$$

Enačbe (2.12) do (2.14) seštejemo:

$$\frac{U_T}{X_{TRS}} \cdot \left[U_j \cdot \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \cdot \dot{\theta}_{ij} + \dot{U}_i \cdot \cos(\varphi_T) - \dot{U}_j \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \right] + \dot{U}_i \cdot I_q \quad (2.15)$$

Enačba (2.15) je končni rezultat postopka, ki smo ga povzeli po [8]. Naslednji korak je bistveni del iskanja energijske funkcije naprav FACTS, tj. analitično iskanje integrala zgornjega zapisa (2.15). Za ta korak postopek ni znan in integral lahko določimo le s pomočjo intuicije. Poleg tega ni nujno, da analitična rešitev integrala sploh obstaja in jo je mogoče dobiti samo za nekatere regulacijske strategije regulabilnih parametrov U_T , I_q in φ_T . V preteklosti je že bilo ugotovljeno ([13], [16]), da mora UPFC za največje izboljšanje tranzientne stabilnosti injicirati največji možni U_T in I_q . Ob predpostavki, da sta U_T in I_q konstantna – nastavljena na maksimum – in da je poleg tega konstanten tudi φ_T , lahko (2.15) z nekaj intuicije zapišemo kot:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{U_T}{X_{TRS}} \left(U_i \cdot \cos(\varphi_T) - U_j \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \right) + U_i \cdot I_q \right] \quad (2.16)$$

Zdaj lahko enostavno dobimo energijsko funkcijo Ljapunova v obliki $V_{UPFC} = f(\underline{U}_i, \underline{U}_j)$ kot integral (2.16), ki opisuje potencialno energijo naprave UPFC:

$$V_{UPFC} = \frac{U_T}{X_{TRS}} \left(U_i \cdot \cos(\varphi_T) - U_j \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \right) + U_i \cdot I_q \quad (2.17)$$

Izkaže se, da je energijska funkcija (2.17) enaka vsoti injiciranih jalovih moči univerzalnega prečnega transformatorja Q_i in Q_j glede na sliko 2.1.c.

$$V_{UPFC} = Q_i + Q_j \quad (2.18)$$

Energijske funkcije naprav FACTS so tesno povezane z injiciranimi jalovimi močmi naprav v omrežje. Za naprave FACTS brez napetostnih pretvornikov so energijske funkcije enake polovici vsote injiciranih jalovih moči. To dejstvo so avtorji v [15] uporabili tudi za UPFC, kar jih je privedlo do neustrezne energijske funkcije. V [15] določena energijska funkcija je uporabljena pri regulaciji naprave UPFC za dušenje nihanj EES in daje zadovoljive rezultate.

Pri ugotavljanju tranzientne stabilnosti EES s pomočjo direktnih metod energijska funkcija iz [15] ne daje pravih rezultatov.

Odgovor na vprašanje, zakaj je energijska funkcija enkrat enaka celotni injicirani jalovi moči, drugič pa le polovici, je v odvisnosti serijsko injiciranih napetosti naprav FACTS od napetosti priključnih sponk. Če je serijsko injicirana napetost U_T linearno odvisna od napetosti priključnih sponk U_i , je injicirana jalova moč Q_i kvadratno odvisna od napetosti U_i :

$$Q_i = k \cdot U_i^2 \quad (2.19)$$

pri čemer je k neodvisen od napetosti U_i . Če energijsko funkcijo določimo kot integral vsote injiciranih delovnih in jalovih moči po postopku iz [8], na podlagi (2.19) rešimo naslednji integral:

$$\int k \cdot U_i \, dU_i = \frac{1}{2} k \cdot U_i^2 = \frac{1}{2} Q_i \quad (2.20)$$

Če je serijsko injicirana napetost U_T neodvisna od napetosti priključnih sponk U_i , je injicirana jalova moč Q_i linearno odvisna od napetosti U_i :

$$Q_i = k \cdot U_i \quad (2.21)$$

pri čemer je k neodvisen od napetosti U_i . Če energijsko funkcijo ponovno določimo kot integral vsote injiciranih delovnih in jalovih moči po postopku iz [8], na podlagi (2.21) rešimo naslednji integral:

$$\int k \, dU_i = k \cdot U_i = Q_i \quad (2.22)$$

Glede na (2.19) do (2.22) lahko ugotovimo, da je energijska funkcija naprav FACTS brez napetostnih pretvornikov v splošnem enaka polovici vsote injiciranih jalovih moči naprave v omrežje, medtem ko je energijska funkcija naprav FACTS z napetostnimi pretvorniki v splošnem enaka celotni vsoti injiciranih jalovih moči. Podobno kot za serijsko injicirano napetost lahko do enakih ugotovitev pridemo pri paralelno injiciranih tokovih naprav FACTS.

Energijsko funkcijo naprave UPFC uporabimo kot dodatek k že obstoječi energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo sistema (1.29) in tako dobimo energijsko funkcijo EES z napravo UPFC:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + V_{\text{UPFC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_T, \varphi_T, I_q) + K \quad (2.23)$$

Ker je energijska funkcija izpeljana za sistem z ohranjeno strukturo, lahko za poljubno število naprav UPFC v EES energijsko funkcijo definiramo kot:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + \sum_{i=1}^g V_{\text{UPFC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_{Ti}, \varphi_{Ti}, I_{qi}) + K \quad (2.24)$$

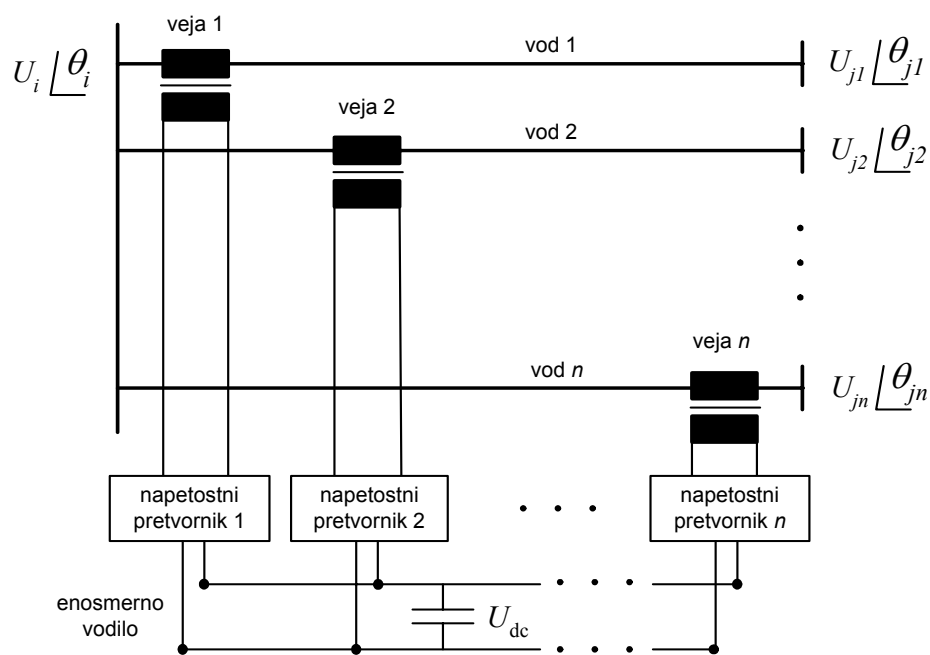
kjer je g število naprav UPFC v sistemu in parametri U_{Ti} , φ_{Ti} in I_{qi} regulabilni parametri posamezne naprave UPFC.

2.2 Medlinijski regulator pretokov moči – IPFC

2.2.1 Splošno o IPFC

Medlinijski regulator pretokov moči oz. IPFC (angl. *interline power flow controller*) je ena novejših naprav FACTS. Sestavljen je iz več serijskih vej, ki so vključene v različne vode EES. IPFC ima lahko tudi eno ali več paralelnih vej. Ob upoštevanju paralelne veje postane model naprave IPFC enak modelu posameznih naprav UPFC, pri čemer je vsaka serijska veja naprave IPFC predstavljena kot samostojen UPFC, paralelna veja IPFC pa je predstavljena kot vsota vseh paralelnih vej naprav UPFC. Tako lahko energijsko funkcijo naprave IPFC s paralelno vejo predstavimo enako kot vsoto energijskih funkcij posameznih naprav UPFC. Naprava IPFC s paralelno vejo je v literaturi označena kot posplošen UPFC oz. GUPFC (angl. *generalized UPFC*) [17], [18]. Energijsko funkcijo posplošene naprave UPFC prikazujemo v poglavju 2.3.

V nadaljevanju obravnavamo IPFC kot napravo s samimi serijskimi vejami. Te veje so sestavljene iz transformatorja in napetostnega pretvornika. Primarne strani transformatorjev so povezane v posamezne vode EES, sekundarne strani pa prek napetostnega pretvornika in enosmernega vodila na skupni kondenzator. Vsota vseh injiciranih delovnih moči posameznih vej je enaka 0. Slika 2.2 shematsko prikazuje IPFC z n vejami.

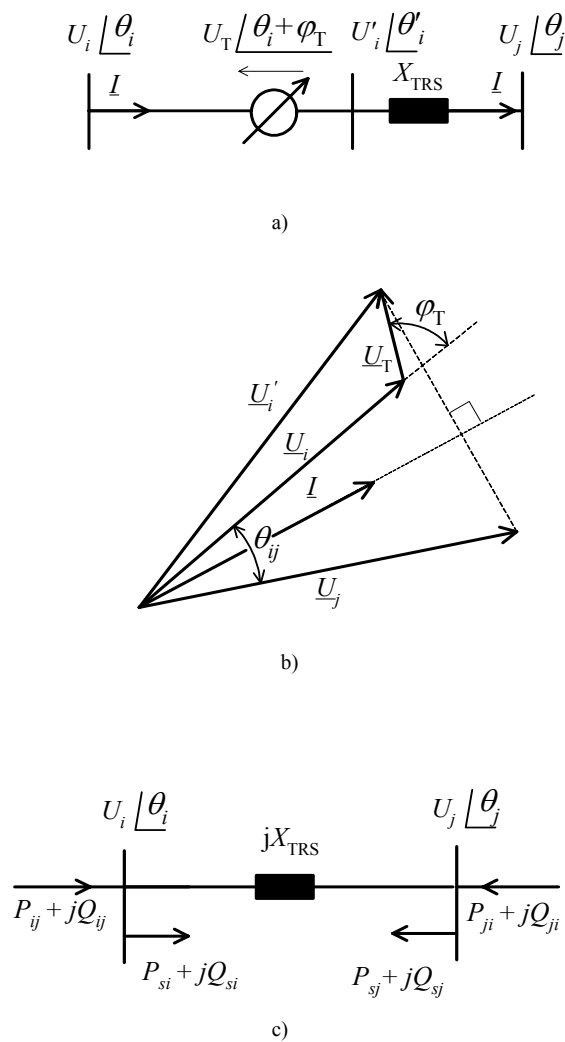


Slika 2.2: Shema IPFC z n vejami

Podrobnejši opis naprave IPFC najdemo v [19] in [20].

2.2.2 Prenosne karakteristike posamezne veje IPFC

Za sistem brez upoštevanja izgub posamezno vejo IPFC lahko zapišemo kot serijsko vezan napetostni vir z reaktanco X_{TRS} . Model naprave, nameščene med zbiralki i in j , ter diagram fazorjev napetosti prikazuje slika 2.3 (a-b).



Slika 2.3: a) model IPFC
b) diagram fasorjev napetosti
c) injekcijski model IPFC

Regulabilna parametra posamezne veje sta U_T in kot φ_T . Pri tem je U_T velikost injicirane napetosti \underline{U}_T , medtem ko je φ_T kot injicirane napetosti \underline{U}_T glede na napetost zbiralke \underline{U}_i .

Posamezna veja IPFC je enaka serijski veji UPFC. Injekcijski model lahko določimo na podlagi injekcijskega modela UPFC brez paralelne veje.

$$P_{si} = \frac{U_i U_T}{X_{TRS}} \sin(\varphi_T) \quad (2.25)$$

$$P_{sj} = -\frac{U_j U_T}{X_{TRS}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.26)$$

$$Q_{si} = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) \quad (2.27)$$

$$Q_{sj} = -\frac{U_j \cdot U_T}{X_{TRS}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.28)$$

kjer je $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ glede na sliko 2.3.

Injicirano delovno moč posamezne veje označimo s P_T in jo izračunamo kot realni del skalarnega produkta injicirane napetosti \underline{U}_T in toka skozi vejo \underline{I} :

$$\text{Re}[\underline{I}] = \frac{U_i \cdot \sin(\theta_i) - U_j \cdot \sin(\theta_j) + U_T \cdot \sin(\theta_i + \varphi_T)}{X_{TRS}} \quad (2.29)$$

$$\text{Im}[\underline{I}] = -\frac{U_i \cdot \cos(\theta_i) - U_j \cdot \cos(\theta_j) + U_T \cdot \cos(\theta_i + \varphi_T)}{X_{TRS}} \quad (2.30)$$

$$P_T = \text{Re}[\underline{U}_T \cdot \underline{I}^*] \quad (2.31)$$

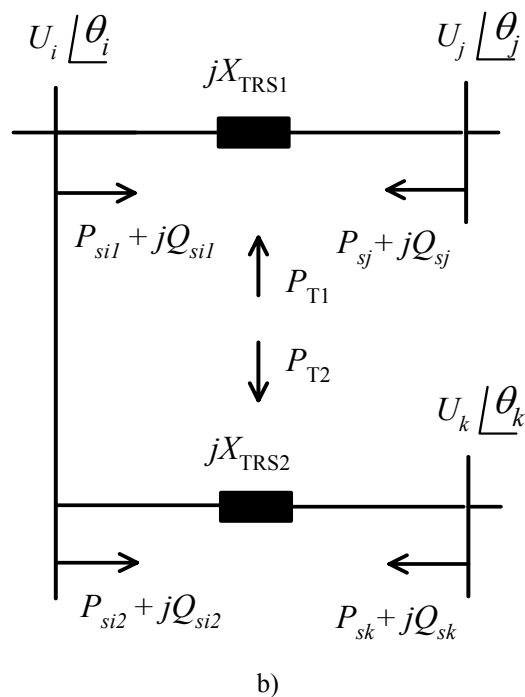
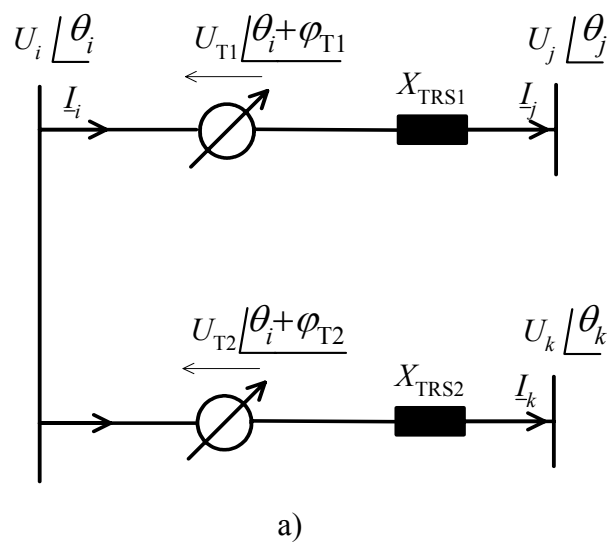
Po nekaj algebrskih preračunih moč P_T , ki teče iz posamezne veje IPFC, zapišemo kot:

$$P_T = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{TRS}} \sin(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{TRS}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.32)$$

Enačbe (2.29) do (2.32) prikazujejo analitično metodo določanja moči P_T , ki je enaka vsoti moči P_{si} in P_{sj} glede na sliko 2.3.

2.2.3 Združitev posameznih vej IPFC

Združitev posameznih vej lahko poenostavljeno prikažemo z združitvijo dveh vej. Model naprave IPFC z dvema vejama in injeksijski model prikazuje slika 2.4.



Slika 2.4: a) model IPFC z dvema vejama

b) injeksijski model IPFC z dvema vejama

Po enosmernem vodilu se med prvo in drugo vejo naprave pretaka delovna moči $P_{T1} = -P_{T2}$. Za napravo IPFC z n vejami velja, da je vsota vseh moči, ki se pretakajo med serijskimi vejami, enaka nič:

$$\sum_{i=1}^n P_{Ti} = 0 \quad (2.33)$$

Posamezne delovne in jalove injicirane moči so:

$$P_{si1} = \frac{U_i U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\varphi_{T1}) \quad (2.34)$$

$$P_{si2} = \frac{U_i U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\varphi_{T2}) \quad (2.35)$$

$$P_{sj} = -\frac{U_j U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \quad (2.36)$$

$$P_{sk} = -\frac{U_k U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \quad (2.37)$$

$$Q_{si1} = \frac{U_i U_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\varphi_{T1}) \quad (2.38)$$

$$Q_{si2} = \frac{U_i U_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\varphi_{T2}) \quad (2.39)$$

$$Q_{sj} = -\frac{U_j U_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \quad (2.40)$$

$$Q_{sk} = -\frac{U_k U_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \quad (2.41)$$

Regulacijski parametri IPFC z dvema vejama so U_{T1} , φ_{T1} , U_{T2} in φ_{T2} . Ker je vsota vseh injiciranih delovnih moči v serijskih vejah enaka nič, vsi regulacijski parametri niso prosti. Vsaj en regulacijski parameter mora biti odvisen od preostalih treh, da zadostimo pogoju (2.33). Zaradi preprostejšega reguliranja naprave smo izbrali parameter φ_{T2} kot parameter, ki naj bo odvisen od preostalih regulacijskih parametrov.

2.2.4 Energijska funkcija IPFC

Za izpeljavo energijske funkcije IPFC uporabimo model IPFC z dvema serijskima vejama in jo na koncu razširimo za IPFC s poljubnim številom serijskih vej. Injicirane delovne moči P_{si1} , P_{si2} , P_{sj} in P_{sk} glede na sliko 2.4 pomnožimo s časovnim odvodom posameznih kotov napetosti $\dot{\theta}_i$, $\dot{\theta}_j$ in $\dot{\theta}_k$ in jih seštejemo. Ker je vsota injiciranih moči v serijskih vejah enaka nič, mora biti vsota vseh moči na začetku vodov nasprotno enaka vsoti vseh moči na koncu vodov:

$$P_{si1} + P_{si2} = -P_{sj} - P_{sk} \quad (2.42)$$

Tako velja:

$$(P_{si1} + P_{si2}) \cdot \dot{\theta}_i = \left[\frac{U_j U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) + \frac{U_k U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \right] \cdot \dot{\theta}_i \quad (2.43)$$

$$P_{sj} \cdot \dot{\theta}_j = -\frac{U_j U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \cdot \dot{\theta}_j \quad (2.44)$$

$$P_{sk} \cdot \dot{\theta}_k = -\frac{U_k U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \cdot \dot{\theta}_k \quad (2.45)$$

Seštevek (2.43) do (2.45) lahko zapišemo kot:

$$\begin{aligned} & (P_{si1} + P_{si2}) \cdot \dot{\theta}_i + P_{sj} \cdot \dot{\theta}_j + P_{sk} \cdot \dot{\theta}_k = \\ & \frac{U_j U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \cdot \dot{\theta}_j + \frac{U_k U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \cdot \dot{\theta}_k \end{aligned} \quad (2.46)$$

kjer je $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ in $\theta_{ik} = \theta_i - \theta_k$.

Podobno enačbe (2.38) do (2.41) delimo z U_i , U_j in U_k in množimo s časovnim odvodom \dot{U}_i , \dot{U}_j in \dot{U}_k :

$$\frac{Q_{si1} + Q_{si2}}{U_i} \dot{U}_i = \frac{\dot{U}_i U_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\varphi_{T1}) + \frac{\dot{U}_i U_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\varphi_{T2}) \quad (2.47)$$

$$\frac{Q_{sj}}{U_j} \dot{U}_j = -\frac{\dot{U}_j U_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \quad (2.48)$$

$$\frac{Q_{sk}}{U_k} \dot{U}_k = -\frac{\dot{U}_k U_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \quad (2.49)$$

Enačbe (2.46) do (2.49) seštejemo in dobimo naslednji izraz:

$$\begin{aligned} & \frac{U_j \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \cdot \sin(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \cdot \dot{\theta}_{ij} + \frac{U_k \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \cdot \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \cdot \dot{\theta}_{ik} \\ & + \frac{\dot{U}_i \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\varphi_{T1}) + \frac{\dot{U}_i \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\varphi_{T2}) \\ & - \frac{\dot{U}_j \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) - \frac{\dot{U}_k \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \cdot \cos(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \end{aligned} \quad (2.50)$$

Ključni korak pri iskanju energijske funkcije je najti integral zgornjega izraza (2.50), ki je energijska funkcija naprave IPFC z dvema vejama. Pri tem iskanju nam je lahko v pomoč dejstvo, da so do zdaj znane energijske funkcije naprav FACTS enake polovici ali celotni vsoti injiciranih jalovih moči, ki jo naprava injicira v EES, kot je to prikazano v poglavju 2.1.2. Glede na to poiščimo razliko med (2.50) in odvodom vsote injiciranih jalovih moči. Odvajajmo vsoto injiciranih jalovih moči po vseh parametrih. Vsoto injiciranih jalovih moči označimo kot Q_{inj} :

$$\begin{aligned}
Q_{inj} &= \frac{U_i U_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\varphi_{T1}) - \frac{U_j U_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \\
&+ \frac{U_i U_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\varphi_{T2}) - \frac{U_k U_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \\
&= Q_1 + Q_2
\end{aligned} \tag{2.51}$$

Odvod te vsote je:

$$\begin{aligned}
\frac{dQ_{inj}}{dt} &= \\
&\frac{\dot{U}_i \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\varphi_{T1}) + \frac{U_i \cdot \dot{U}_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\varphi_{T1}) - \frac{U_i \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\varphi_{T1}) \cdot \dot{\varphi}_{T1} \\
&+ \frac{\dot{U}_i \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\varphi_{T2}) + \frac{U_i \cdot \dot{U}_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\varphi_{T2}) - \frac{U_i \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\varphi_{T2}) \cdot \dot{\varphi}_{T2} \\
&- \frac{\dot{U}_j \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) - \frac{U_j \cdot \dot{U}_{T1}}{X_{TRS1}} \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \\
&+ \frac{U_j \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \cdot \sin(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \cdot [\dot{\theta}_{ij} + \dot{\varphi}_{T1}] \\
&- \frac{\dot{U}_k \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \cdot \cos(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) - \frac{U_k \cdot \dot{U}_{T2}}{X_{TRS2}} \cdot \cos(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \\
&+ \frac{U_k \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \cdot \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \cdot [\dot{\theta}_{ik} + \dot{\varphi}_{T2}]
\end{aligned} \tag{2.52}$$

Vidimo, da so vsi členi (2.50) vsebovani v (2.52). Poleg tega (2.52) vsebuje dodatne člene. Zdaj lahko zapišemo integral (2.50), ki je posplošena energijska funkcija naprave IPFC z dvema vejama:

$$\begin{aligned}
V_{IPFC} &= Q_{inj} \\
&- \int \left[\frac{U_i \cdot \dot{U}_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\varphi_{T1}) - \frac{U_i \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\varphi_{T1}) \cdot \dot{\varphi}_{T1} \right. \\
&+ \frac{U_i \cdot \dot{U}_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\varphi_{T2}) - \frac{U_i \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\varphi_{T2}) \cdot \dot{\varphi}_{T2} \\
&- \frac{U_j \cdot \dot{U}_{T1}}{X_{TRS1}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) + \frac{U_j \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \cdot \dot{\varphi}_{T1} \\
&\left. - \frac{U_k \cdot \dot{U}_{T2}}{X_{TRS2}} \cos(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) + \frac{U_k \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \cdot \dot{\varphi}_{T2} \right] dt
\end{aligned} \tag{2.53}$$

Izraz (2.53) vsebuje pod integralom člene, ki so odvisni od časovnega odvoda posameznih regulacijskih parametrov, in lahko predstavlja splošno energijsko funkcijo IPFC za poljubno regulacijsko strategijo.

Integral v (2.53) lahko analitično rešimo le pri znani regulacijski strategiji naprave IPFC. Za nadaljnji razvoj energijske funkcije predpostavimo, da so regulabilni parametri med trajanjem prvega nihaja odsekoma konstantni. Predpostavka temelji na dejstvu, da z odsekoma konstantnimi vrednostmi lahko aproksimiramo poljubno regulacijsko strategijo ali pa po korakih sledimo numerično določenim optimalnim vrednostim regulabilnih parametrov, kot je to prikazano v poglavju 4. Tako so časovni odvodi regulabilnih parametrov U_{T1} , U_{T2} in φ_{T1} enaki nič. Ostane le časovni odvod parametra φ_{T2} in energijsko funkcijo lahko zapišemo kot:

$$V_{IPFC} = Q_{inj} + \frac{U_{T2}}{X_{TRS2}} \int [U_i \cdot \sin(\varphi_{T2}) - U_k \cdot \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T2})] d\varphi_{T2} \quad (2.54)$$

Parametri omrežja U_i , U_k in θ_{ik} so odvisni od kota φ_{T2} . Ta odvisnost je analitično določena s sistemom enačb (1.7) do (1.8), ki opisuje pretoke moči v EES. Posledično se integral v (2.54) ne da rešiti analitično, zato ostaja energijska funkcija v obliki algebrasko-integralskega zapisa. Pri uporabi energijske funkcije se ta integral rešuje numerično na enak način kot napetostno odvisna delovna bremena, katerih upoštevanje je opisano v [8].

Zdaj energijsko funkcijo posplošimo za poljubno število serijskih vej. Predpostavimo, da so regulabilni parametri vseh vej razen druge med trajanjem prvega nihaja odsekoma konstantni, druga veja pa – enako kot pri modelu z dvema vejama – zagotavlja potrebno delovno moč za preostale veje. S tem izraz za energijsko funkcijo IPFC (2.54) ostaja nespremenjen, spremeni pa se izraz za vsoto injicirane jalove moči Q_{inj} (2.39), ki mora vsebovati injicirane jalove moči vseh vej:

$$\begin{aligned} Q_{inj} &= \sum_{v=1}^n \frac{U_i U_{Tv}}{X_{TRSv}} \cos(\varphi_{Tv}) - \frac{U_j U_{Tv}}{X_{TRSv}} \cos(\theta_{i-v} + \varphi_{Tv}) \\ &= \sum_{v=1}^n Q_v \end{aligned} \quad (2.55)$$

Drugi del (2.54), ki vsebuje integral, predstavlja injicirano delovno moč druge veje naprave IPFC v EES in pri konstantnih regulabilnih parametrih U_{T1} , U_{T2} in φ_{T1} ni konstantna. Če želimo dobiti energijsko funkcijo brez integralskega dela, jo lahko glede na obravnavanje delovnih bremen v [8] iščemo na ta način, da reguliramo napravo IPFC tako, da je v vsaki veji injicirana moč konstantna. S tem regulacijski parameter posamezne veje poleg U_T ni več φ_T , temveč injicirana delovna moč P_T . Ob predpostavki, da sta parametra U_{T1} in U_{T2} v vsaki od vej konstantna in da konstantno delovno moč reguliramo s kotom injicirane napetosti φ_{T1} in φ_{T2} , lahko (2.53) zapišemo kot:

$$V_{IPFC} = Q_{inj} + \int \left[\left(\frac{U_i \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\varphi_{T1}) - \frac{U_j \cdot U_{T1}}{X_{TRS1}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_{T1}) \right) \cdot \dot{\varphi}_{T1} + \left(\frac{U_i \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\varphi_{T2}) - \frac{U_k \cdot U_{T2}}{X_{TRS2}} \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T2}) \right) \cdot \dot{\varphi}_{T2} \right] dt \quad (2.56)$$

Izraza v okroglem oklepaju pod integralom pomenita delovno moč posamezne serijske veje. Ker smo predpostavili, da sta ti moči konstantni, lahko (2.56) zapišemo kot:

$$V_{IPFC} = Q_{inj} + P_{T1} \cdot \varphi_{T1} + P_{T2} \cdot \varphi_{T2} \quad (2.57)$$

Enačba (2.57) je energijska funkcija naprave IPFC pri konstantni injicirani delovni moči P_T posamezne veje. Pri tem je posamezen kot injicirane napetosti φ_T odvisen od posamezne injicirane delovne moči P_T .

Ponovno lahko energijsko funkcijo posplošimo za poljubno število n serijskih vej. Ob predpostavki, da je injicirana delovna moč v vsaki veji konstantna, lahko energijsko funkcijo naprave IPFC zapišemo kot:

$$V_{IPFC} = Q_{inj} + \sum_{i=1}^n P_{Ti} \cdot \varphi_{Ti} \quad (2.58)$$

Energijsko funkcijo (2.54) ali (2.58) naprave IPFC uporabimo kot dodatek k že obstoječi energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo sistema (1.29) in tako dobimo energijsko funkcijo EES z napravo IPFC:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + V_{\text{IPFC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_T, \varphi_T) + K \quad (2.59)$$

Ker je energijska funkcija izpeljana za sistem z ohranjeno strukturo, lahko za poljubno število naprav IPFC v EES energijsko funkcijo definiramo kot:

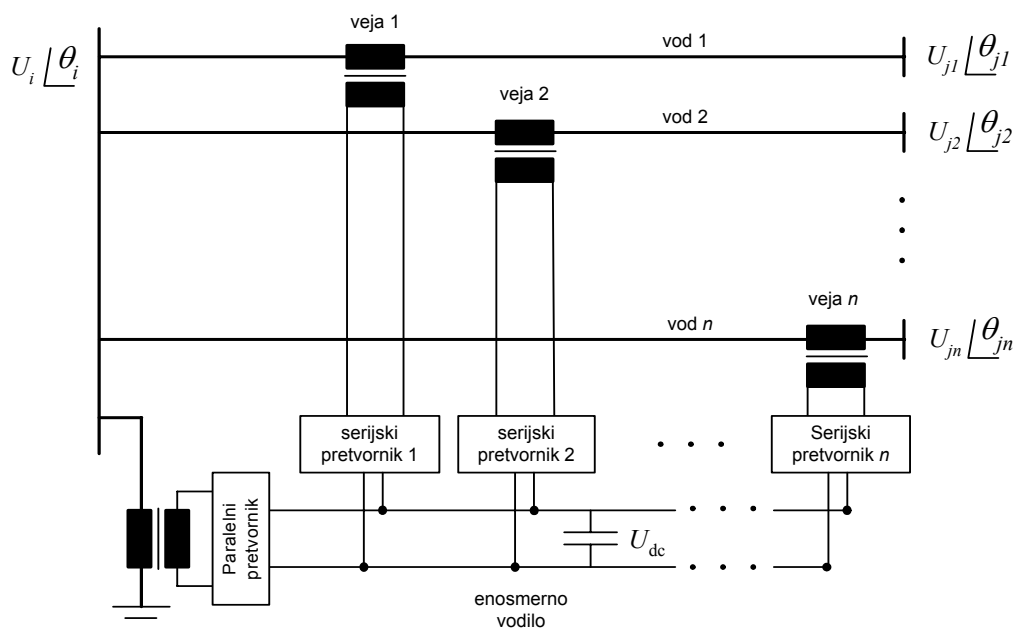
$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + \sum_{i=1}^g V_{\text{IPFC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_{T_i}, \varphi_{T_i}) + K \quad (2.60)$$

kjer je g število naprav IPFC v sistemu. Pri tem izraz V_{IPFC} predstavlja posplošeno energijsko funkcijo (2.53) ali energijsko funkcijo (2.54) oz (2.58) naprave IPFC.

2.3 Posplošen UPFC

2.3.1 Prenosne karakteristike posplošenega UPFC-ja

Kot smo omenili v poglavju 2.2, posplošen UPFC oz. GUPFC (angl. *generalized UPFC*) enačimo z medlinijskim regulatorjem pretokov moči, ki ima poleg serijskih vej vsaj eno paralelno vejo. Shema naprave GUPFC z n -serijskimi in eno paralelno vejo prikazuje slika 2.5.



Slika 2.5: Shema naprave GUPFC

Napravo GUPFC z n serijskimi vejami in eno paralelno vejo lahko predstavimo z n samostojnih naprav UPFC. Pri tem je posamezna serijska veja naprave GUPFC enaka serijski veji posamezne naprave UPFC, paralelna veja naprave GUPFC pa je enaka vsoti paralelnih vej vseh posameznih naprav UPFC. Na ta način velja za posamezno vejo naprave UPFC enak model, diagram fazorjev in injekcijski model kot za posamezno napravo UPFC, kakor je opisano v poglavju 2.1 in prikazano na sliki 2.1. Vsoto vseh injiciranih delovnih moči v serijskih vejah naprave GUPFC zagotavlja paralelna veja, ki poleg delovnega toka, ki ni regulabilen in je odvisen od serijskih vej naprave GUPFC, lahko injicira tudi jalovi tok I_q .

2.3.2 Energijska funkcija naprave GUPFC

Ker smo GUPFC predstavili kot vsoto posameznih naprav UPFC s skupno paralelno vejo, energijsko funkcijo naprave GUPFC določimo kot vsoto energijskih funkcij posameznih naprav UPFC. Energijska funkcija w -te veje naprave GUPFC zapišemo na podlagi energijske funkcije naprave UPFC (2.17) kot:

$$V_{\text{GUPFC}w} = \frac{U_{T_w}}{X_{\text{TRS}w}} \left(U_i \cdot \cos(\varphi_{T_w}) - U_{jw} \cdot \cos(\theta_{jw} + \varphi_{T_w}) \right) \quad (2.61)$$

pri čemer se z w označene veličine nanašajo na w -to vejo naprave GUPFC. Za GUPFC z n serijskimi vejami zapišemo celotno energijsko funkcijo kot vsoto posameznih serijskih vej in paralelne veje:

$$V_{\text{GUPFC}} = \sum_{w=1}^n \left[\frac{U_{T_w}}{X_{\text{TRS}w}} \left(U_i \cdot \cos(\varphi_{T_w}) - U_{jw} \cdot \cos(\theta_{jw} + \varphi_{T_w}) \right) \right] + I_q \cdot U_i \quad (2.62)$$

Pri tem je I_q tok paralelne veje naprave GUPFC.

Energijsko funkcijo naprave GUPFC podobno kot pri ostalih napravah FACTS uporabimo kot dodatek k že obstoječi energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo sistema (1.29) in na ta način dobimo energijsko funkcijo EES z napravo GUPFC z n vejami:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + \sum_{w=1}^n V_{\text{GUPFC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_{T_w}, \varphi_{T_w}, I_q) + K \quad (2.63)$$

Ker je energijska funkcija izpeljana za sistem z ohranjeno strukturo, lahko za poljubno število naprav GUPFC v EES energijsko funkcijo definiramo kot:

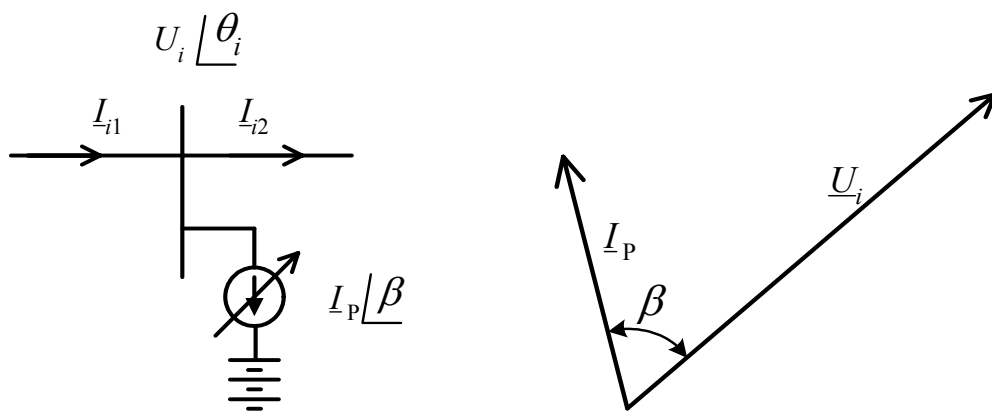
$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + \sum_{i=1}^g \sum_{w=1}^n V_{\text{GUPFC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_{T_{wi}}, \varphi_{T_{wi}}, I_{qi}) + K \quad (2.64)$$

kjer je g število naprav GUPFC v sistemu in parametri $U_{T_{wi}}$, $\varphi_{T_{wi}}$ in I_{qi} regulabilni parametri w -te veje g -te naprave GUPFC.

2.4 STATCOM s hranilnikom energije – BESS-STATCOM

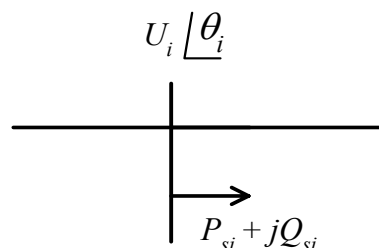
2.4.1 Prenosne karakteristike naprave BESS-STATCOM

STATCOM s hranilnikom energije BESS-STATCOM (angl. *battery energy storage system STATCOM*) je paralelni tokovni vir, ki v omrežje daje ali odvzema tok \underline{I}_P pod kotom β glede na napetost priključne sponke \underline{U}_i . V primerjavi z napravo STATCOM brez hranilnika energije lahko BESS-STATCOM v EES injicira poleg jalove tudi delovno moč. Splošni model je prikazan na sliki 2.6:



Slika 2.6: Splošni model in kazalni diagram naprave BESS-STATCOM

Injicirani delovna in jalova moč naprave BESS-STATCOM na zbiralki i sta produkt amplitude napetosti \underline{U}_i , amplitude toka \underline{I}_P in kosinusa oz. sinusa kota β . Injekcijski model naprave BESS-STATCOM prikazuje slika 2.7.



Slika 2.7: Injekcijski model naprave BESS-STATCOM

$$P_{si} = I_p \cdot U_i \cdot \cos(\beta) \quad (2.65)$$

$$Q_{si} = I_p \cdot U_i \cdot \sin(\beta) \quad (2.66)$$

2.4.2 Energijska funkcija naprave BESS-STATCOM

Enako kot pri drugih napravah FACTS pri iskanju energijske funkcije sledimo postopku, nakazanem v [8], ki opisuje konstruiranje energijske funkcije za EES brez naprav FACTS. Injicirano delovno moč naprave BESS-STATCOM P_{si} pomnožimo s časovnim odvodom kota napetosti $\dot{\theta}_i$:

$$P_{si} \dot{\theta}_i = I_p \cdot U_i \cdot \cos(\beta) \cdot \dot{\theta}_i \quad (2.67)$$

Podobno injicirano jalovo moč delimo z U_i in množimo s časovnim odvodom \dot{U}_i :

$$\frac{Q_{si}}{U_i} \dot{U}_i = I_p \cdot \sin(\beta) \cdot \dot{U}_i \quad (2.68)$$

Enačbi (2.67) in (2.68) seštejemo:

$$I_p \cdot U_i \cdot \cos(\beta) \cdot \dot{\theta}_i + I_p \cdot \sin(\beta) \cdot \dot{U}_i \quad (2.69)$$

Ob predpostavki, da sta I_p in β konstantna, lahko zapišemo integral (2.69) kot:

$$\begin{aligned} & \int \left[I_p \cdot U_i \cdot \cos(\beta) \cdot \dot{\theta}_i + I_p \cdot \sin(\beta) \cdot \dot{U}_i \right] dt = \\ & = I_p \cdot \sin(\beta) \cdot U_i + \int I_p \cdot \cos(\beta) \cdot U_i d\theta_i = \\ & = Q_{si} + \int P_{si} d\theta_i \end{aligned} \quad (2.70)$$

Enačba (2.70) je energijska funkcija naprave BESS-STATCOM.

$$\begin{aligned} V_{\text{BESS-STATCOM}} & = I_p \cdot \sin(\beta) \cdot U_i + I_p \cdot \cos(\beta) \cdot \int U_i d\theta_i \\ & = Q_{si} + \int P_{si} d\theta_i \end{aligned} \quad (2.71)$$

Integral v (2.71) se ne da rešiti analitično, zato ostaja energijska funkcija v obliki algebrasko-integralskega zapisa. Pri uporabi energijske funkcije se ta integral rešuje numerično na enak način kot napetostno odvisna delovna bremena, katerih upoštevanje je opisano v [8].

Prvi del izraza (2.71) je prispevek jalove moči k energijski funkciji naprave BESS-STATCOM. Je algebrajska funkcija in je enaka energijski funkciji naprave STATCOM brez hranilnika energije [4]. Drugi del izraza (2.71) je prispevek delovne moči in se analitično ne da rešiti, zato ostaja v obliki integrala. Vendar te ugotovitve ne smemo posploševati, saj injicirana delovna moč vodi do analitično nerešljivega integrala le, če ta injicirana delovna moč ni konstantna.

Ob predpostavki, da BESS-STATCOM injicira tok I_p s konstantno amplitudo in spremenljivim kotom β tako, da je injicirana delovna moč konstantna, lahko zapišemo integral (2.69) kot:

$$\int I_p \cdot \cos(\beta) \cdot U_i d\theta_i + \int I_p \cdot \sin(\beta) dU_i \quad (2.72)$$

Prvi del (2.72) je integral injicirane delovne moči po kotu θ_i . Ker smo predpostavili konstantno delovno moč, lahko (2.72) zapišemo kot:

$$\begin{aligned} I_p \cdot \cos(\beta) \cdot U_i \cdot \theta_i + \int I_p \cdot \sin(\beta) dU_i &= \\ = P_{si} \cdot \theta_i + \int I_p \cdot \sin(\beta) dU_i & \end{aligned} \quad (2.73)$$

Ker kot β v integralu (2.73) ni konstanten, ta integral ni enostavno rešljiv, zato ga preoblikujemo:

$$\begin{aligned} \int I_p \cdot \sin(\beta) dU_i &= \\ = \int \left[I_p \cdot \sin(\beta) \cdot \dot{U}_i + I_p \cdot U_i \cdot \cos(\beta) \cdot \dot{\beta} - I_p \cdot U_i \cdot \cos(\beta) \cdot \dot{\beta} \right] dt & \end{aligned} \quad (2.74)$$

Prva dva člena (2.74) zapišemo kot časovni odvod injicirane jalove moči, tretji člen (2.74) pa vsebuje izraz za injicirano delovno moč in ga lahko poenostavimo. Enačbo (2.74) zapišemo kot:

$$\begin{aligned}
& \int \left[\frac{d}{dt} [I_p \cdot \sin(\beta) \cdot U_i] \right] dt - \int P_{si} d\beta = \\
& = I_p \cdot \sin(\beta) \cdot U_i - P_{si} \cdot \beta = \\
& = Q_{si} - P_{si} \cdot \beta
\end{aligned} \tag{2.75}$$

Zapis iz (2.75) vstavimo v (2.73) in dobimo energijsko funkcijo naprave BESS-STATCOM pri regulaciji konstantne delovne moči P_{si} ter konstantne amplitude toka I_p :

$$V_{\text{BESS-STATCOM}} = Q_{si} + P_{si} \cdot (\theta_i - \beta) \tag{2.76}$$

Energijsko funkcijo (2.71) ali (2.76) naprave BESS-STATCOM uporabimo kot dodatek k že obstoječi energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo sistema (1.29) in tako dobimo energijsko funkcijo EES z napravo BESS-STATCOM:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + V_{\text{BESS-STATCOM}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, I_p, \beta) + K \tag{2.77}$$

Ker je energijska funkcija izpeljana za sistem z ohranjeno strukturo, lahko za poljubno število naprav BESS-STATCOM v EES energijsko funkcijo definiramo kot:

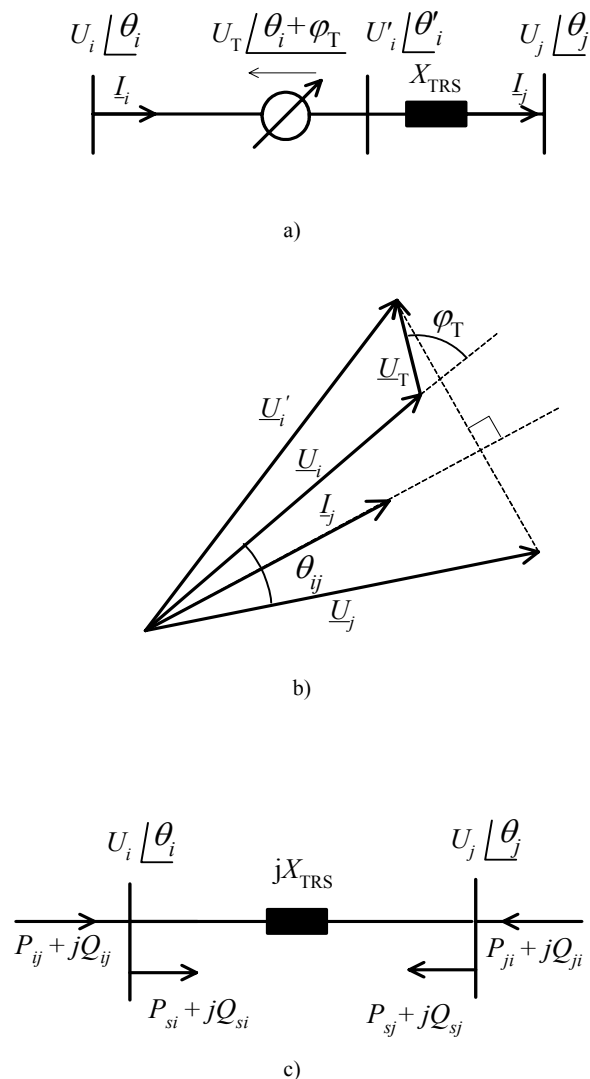
$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + \sum_{i=1}^g V_{\text{BESS-STATCOM}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, I_{pi}, \beta_i) + K \tag{2.78}$$

kjer je g število naprav BESS-STATCOM v sistemu ter parametra I_{pi} in β_i regulabilna parametra posamezne naprave BESS-STATCOM.

2.5 Statični sinhronski serijski kompenzator s hranilnikom energije – BESS-SSSC

2.5.1 Prenosne karakteristike BESS-SSSC

Statični sinhronski serijski kompenzator s hranilnikom energije BESS-SSSC (angl. *battery energy storage system SSSC*) je serijsko vezan napetostni vir z reaktanco X_{TRS} . V primerjavi z napravo SSSC brez baterijskega hranilnika energije lahko BESS-SSSC v EES injicira poleg jalove tudi delovno moč. Model naprave, nameščene med zbiralki i in j , ter diagram fazorjev napetosti prikazuje slika 2.8 (a-b). Model je enak eni veji naprave IPFC.



Slika 2.8: a) model BESS-SSSC
b) diagram fazorjev napetosti
c) injekcijski model BESS-SSSC

Regulabilna parametra naprave BESS-SSSC sta U_T in φ_T . U_T pomeni velikost injicirane napetosti \underline{U}_T , medtem ko φ_T pomeni kot injicirane napetosti \underline{U}_T glede na napetost zbiralke \underline{U}_j .

Injekcijski model lahko določimo na podlagi injekcijskega modela UPFC brez paralelne veje oz. na podlagi ene veje naprave IPFC.

$$P_{si} = \frac{U_i U_T}{X_{TRS}} \sin(\varphi_T) \quad (2.79)$$

$$P_{sj} = -\frac{U_j U_T}{X_{TRS}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.80)$$

$$Q_{si} = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) \quad (2.81)$$

$$Q_{sj} = -\frac{U_j \cdot U_T}{X_{TRS}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.82)$$

kjer je $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ glede na sliko 2.8.

2.5.2 Energijska funkcija BESS-SSSC

Za konstrukcijo energijske funkcije sledimo postopku iz [8], ki opisuje konstruiranje energijske funkcije za elektroenergetski sistem brez naprav FACTS. Injicirane delovne moči BESS-SSSC P_{si} in P_{sj} pomnožimo s časovnim odvodom posameznih kotov napetosti $\dot{\theta}_i$ in $\dot{\theta}_j$ in jih seštejemo:

$$P_{si} \dot{\theta}_i = \frac{U_i U_T}{X_{TRS}} \sin(\varphi_T) \cdot \dot{\theta}_i \quad (2.83)$$

$$P_{sj} \dot{\theta}_j = -\frac{U_j U_T}{X_{TRS}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \cdot \dot{\theta}_j \quad (2.84)$$

Podobno enačbi (2.81) in (2.82) delimo z U_i in U_j in množimo s časovnim odvodom \dot{U}_i in \dot{U}_j :

$$\frac{Q_{si}}{U_i} \dot{U}_i = \frac{\dot{U}_i U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) \quad (2.85)$$

$$\frac{Q_{sj}}{U_j} \dot{U}_j = -\frac{\dot{U}_j U_T}{X_{TRS}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.86)$$

Enačbe (2.83) do (2.86) seštejemo in dobimo naslednji izraz:

$$\begin{aligned} & \frac{U_i U_T}{X_{TRS}} \sin(\varphi_T) \cdot \dot{\theta}_i - \frac{U_j U_T}{X_{TRS}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \cdot \dot{\theta}_j \\ & + \frac{\dot{U}_i U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) - \frac{\dot{U}_j U_T}{X_{TRS}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \end{aligned} \quad (2.87)$$

Ključni korak je najti integral zgornjega izraza (2.87), ki je energijska funkcija BESS-SSSC. Pri tem iskanju nam je lahko ponovno v pomoč dejstvo, da so do zdaj znane energijske funkcije naprav FACTS tesno povezane z jalovo močjo, ki jo naprava injicira v EES. Odvajajmo injicirano jalovo moč po vseh parametrih in rezultat primerjajmo z (2.87). Vsoto posameznih injiciranih jalovih moči označimo kot Q_{inj} . Odvod te vsote je:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{inj}}{dt} = & \frac{\dot{U}_i \cdot U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) + \frac{U_i \cdot \dot{U}_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) - \frac{U_i \cdot U_T}{X_{TRS}} \sin(\varphi_T) \cdot \dot{\varphi}_T \\ & - \frac{\dot{U}_j \cdot U_T}{X_{TRS}} \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) - \frac{U_j \cdot \dot{U}_T}{X_{TRS}} \cdot \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \\ & + \frac{U_j \cdot U_T}{X_{TRS}} \cdot \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \cdot [\dot{\theta}_{ij} + \dot{\varphi}_T] \end{aligned} \quad (2.88)$$

Razberemo lahko, da je del členov (2.87) vsebovan v (2.88). Zdaj lahko zapišemo integral (2.87), ki je obenem energijska funkcija BESS-SSSC:

$$\begin{aligned}
V_{\text{BESS-SSSC}} &= Q_{\text{inj}} \\
&+ \int \left[\left[\frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \right] \cdot (\dot{\theta}_i + \dot{\varphi}_T) \right. \\
&\quad \left. \left[\frac{U_i}{X_{\text{TRS}}} \cos(\varphi_T) - \frac{U_j}{X_{\text{TRS}}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \right] \cdot (\dot{U}_T) \right] dt
\end{aligned} \tag{2.89}$$

Izraz (2.89) vsebuje pod integralom člene, ki so odvisni od časovnega odvoda posameznih regulacijskih parametrov in spremenljivk EES, in lahko predstavlja splošno energijsko funkcijo BESS-SSSC za poljubno regulacijsko strategijo.

Za nadaljnji razvoj energijske funkcije predpostavimo, da sta regulabilna parametra med trajanjem prvega nihaja odsekoma konstantna. Predpostavka temelji na dejstvu, da z odsekoma konstantnimi vrednostmi lahko aproksimiramo poljubno regulacijsko strategijo oz. po korakih sledimo numerično določenim optimalnim vrednostim regulabilnih parametrov. Tako sta časovna odvoda regulabilnih parametrov U_T in φ_T enaki nič in energijsko funkcijo lahko zapišemo kot:

$$\begin{aligned}
V_{\text{BESS-SSSC}} &= Q_{\text{inj}} \\
&+ \int \left[\frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \right] d\theta_i
\end{aligned} \tag{2.90}$$

pri čemer je

$$Q_{\text{inj}} = \frac{U_i U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\varphi_T) - \frac{U_j U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \tag{2.91}$$

Integral v (2.90) se ne da rešiti analitično, zato ostaja energijska funkcija v obliki algebrasko-integralskega zapisa. Pri uporabi energijske funkcije se ta integral rešuje numerično na enak način kot napetostno odvisna delovna bremena, katerih upoštevanje je opisano v [8].

Prispevek jalove moči k energijski funkciji BESS-SSSC je algebrajska funkcija in je podobno kot energijska funkcija naprave SSSC brez hranilnika energije sorazmerna injicirani jalovi moči naprave [4]. Prispevek delovne moči se analitično ne da rešiti, zato ostaja v obliki integrala, kajti pri konstantnih regulabilnih parametrih U_T in φ_T injicirana delovna moč ni konstantna.

Pri drugačni regulacijski strategiji, ki bi temeljila na obratovanju BESS-SSSC v stacionarnem stanju, bi lahko predpostavili konstantno injicirano delovno moč BESS-SSSC. Zaradi lažje nadaljnje izpeljave to konstantno delovno moč zagotavljamo s konstantno amplitudo napetosti U_T in spremenljivim kotom φ_T , ki je odvisen od U_T .

Prvi del zapisa pod integralom v (2.89) je enak injicirani delovni moči P_T naprave BESS-SSSC.

$$P_T = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.92)$$

Ob upoštevanju konstantne U_T lahko energijsko funkcijo BESS-SSSC (2.89) zapišemo kot:

$$V_{\text{BESS-SSSC}} = Q_{\text{inj}} + P_T \cdot (\theta_i + \varphi_T) \quad (2.93)$$

Enačba (2.93) je energijska funkcija naprave BESS-SSSC pri konstantni injicirani delovni moči. Pri tem smo integral v (2.89) rešili analitično, kar se ujema z obravnavanjem delovnih bremen v izpeljavi energijske funkcije EES v [8].

Če je injicirana delovna moč P_T enaka nič, BESS-SSSC obratuje kot SSSC brez hranilnika energije. Energijska funkcija (2.93) pri tem izgubi drugi člen in postane enaka vsoti jalovih moči, ki jih naprava injicira v omrežje. S tem postane energijska funkcija (2.93) ekvivalentna energijski funkciji naprave SSSC brez hranilnika energije, ki je izpeljana v [4].

Energijsko funkcijo (2.90) ali (2.93) naprave BESS-SSSC uporabimo kot dodatek k že obstoječi energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo sistema (1.29) in tako dobimo energijsko funkcijo EES z napravo BESS-SSSC:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + V_{\text{BESS-SSSC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_T, \varphi_T) + K \quad (2.94)$$

Ker je energijska funkcija izpeljana za sistem z ohranjeno strukturo, lahko za poljubno število naprav BESS-SSSC v EES energijsko funkcijo definiramo kot:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + \sum_{i=1}^g V_{\text{BESS-SSSC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_{Ti}, \varphi_{Ti}) + K \quad (2.95)$$

kjer je g število naprav BESS-SSSC v sistemu ter parametra U_{Ti} in φ_{Ti} regulabilna parametra posamezne naprave BESS-SSSC.

2.6 UPFC s hranilnikom energije – BESS-UPFC

2.6.1 Prenosne karakteristike BESS-UPFC

UPFC s hranilnikom energije BESS-UPFC (angl. *battery energy storage system UPFC*) je serijsko vezan napetostni vir z reaktanco X_{TRS} in paralelno priključenim tokovnim virom. Shemo in model naprave ter injekcijski model prikazuje slika 2.9.

Tok I_T je v fazi z \underline{U}_i in predstavlja ne le izmenjavo delovne moči med serijsko in paralelno vejo BESS-UPFC, temveč tudi delovni tok, ki ga naprava injicira v EES. Razdelimo ga lahko na dve vzporedni komponenti: I_{T1} , ki ustreza izmenjavi delovne moči med serijsko in paralelno vejo, ter I_{T2} , ki ustreza skupni injicirani delovni moči naprave v EES.

Regulabilni parametri BESS-UPFC so U_T , φ_T , I_q in I_{T2} , medtem ko je I_{T1} odvisen od injicirane delovne moči v serijski veji. U_T predstavlja velikost injicirane napetosti \underline{U}_T , medtem ko φ_T predstavlja kot injicirane napetosti \underline{U}_T glede na napetost zbiralke \underline{U}_i .

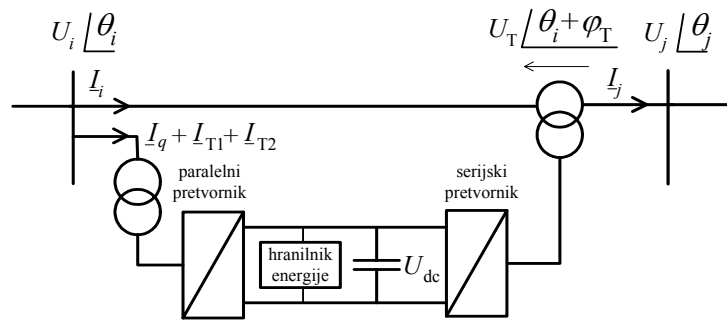
Injekcijski model BESS-UPFC izpeljemo iz injekcijskega modela UPFC, ki mu dodamo injicirano delovno moč P_B :

$$P_B = U_i \cdot I_{T2} \quad (2.96)$$

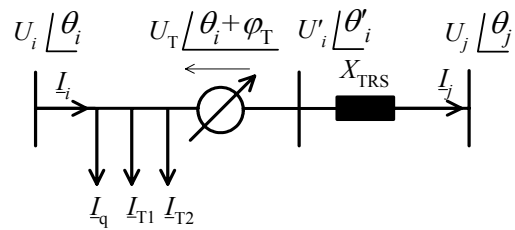
Posamezne vrednosti injiciranih moči glede na sliko 2.9 c) so:

$$P_{si} = \frac{U_j U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) + P_B \quad (2.97)$$

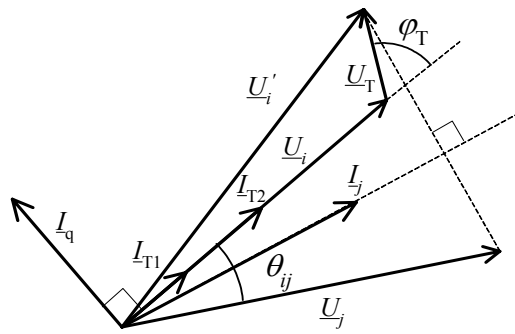
$$P_{sj} = -\frac{U_j U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.98)$$



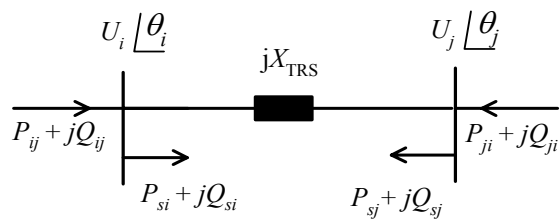
a)



b)



c)



d)

Slika 2.9: a) shema BESS-UPFC
 b) model BESS-UPFC
 c) diagram fazorjev napetosti
 d) injekcijski model BESS-UPFC

$$Q_{si} = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{TRS}} \cos(\varphi_T) + U_i \cdot I_q \quad (2.99)$$

$$Q_{sj} = -\frac{U_j \cdot U_T}{X_{TRS}} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2.100)$$

2.6.2 Energijska funkcija BESS-UPFC

Razlika med injiciranimi močmi BESS-UPFC in UPFC je le zadnji člen (2.97), zato lahko iskanje energijske funkcije BESS-UPFC razdelimo na dva dela. Prvi del je enak kot za UPFC, katerega energijska funkcija je podana v poglavju 2.1, drugi del pa je iskanje prispevka P_B na energijsko funkcijo BESS-UPFC.

Za konstrukcijo energijske funkcije sledimo postopku iz [8], ki opisuje konstruiranje energijske funkcije za elektroenergetski sistem brez naprav FACTS. Injicirano delovno moč P_B pomnožimo s časovnim odvodom kota napetosti $\dot{\theta}_i$:

$$P_B \dot{\theta}_i = U_i \cdot I_{T2} \cdot \dot{\theta}_i \quad (2.101)$$

Energijsko funkcijo BESS-UPFC predstavljata vsota energijske funkcije naprave UPFC in časovni integral enačbe (2.101) in jo zapišemo kot:

$$V_{\text{BESS-UPFC}} = V_{\text{UPFC}} + \int U_i \cdot I_{T2} d\theta_i \quad (2.102)$$

Izraz (2.102) vsebuje pod integralom člene, ki so odvisni od spremenljivk EES in regulabilnega parametra I_{T2} , in predstavlja splošno energijsko funkcijo BESS-SSSC za poljubno regulacijsko strategijo.

Ker z odsekoma konstantnimi vrednostmi regulabilnega parametra I_{T2} sledimo regulacijski strategiji, ki je predstavljena v poglavju 4, poleg tega pa z njimi lahko aproksimiramo poljubno regulacijsko strategijo, za nadaljnji razvoj energijske funkcije predpostavimo, da je I_{T2} med trajanjem prvega nihaja odsekoma konstanten. Posledično lahko energijsko funkcijo zapišemo kot:

$$V_{\text{BESS-UPFC}} = V_{\text{UPFC}} + I_{T2} \cdot \int U_i \cdot \partial \theta_i \quad (2.103)$$

Prispevek injicirane delovne moči P_B se pri konstantnem toku I_{T2} analitično ne da rešiti, zato ostaja v obliki integrala, kajti pri konstantnem toku I_{T2} injicirana delovna moč P_B ni konstantna.

Pri drugačni regulacijski strategiji, ki bi predpostavljala konstantno injicirano delovno moč P_B , bi energijsko funkcijo BESS-SSSC zapisali kot:

$$V_{\text{BESS-UPFC}} = V_{\text{UPFC}} + P_T \cdot \theta_i \quad (2.104)$$

Pri tem smo integral v (2.102) rešili analitično, kar se ujema z obravnavanjem delovnih bremen v izpeljavi energijske funkcije EES v [8].

Energijsko funkcijo (2.102), (2.103) ali (2.104) naprave BESS-UPFC uporabimo kot dodatek k že obstoječi energijski funkciji EES z ohranjeno strukturo sistema (1.29) in tako dobimo energijsko funkcijo EES z napravo BESS-UPFC:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + V_{\text{BESS-UPFC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_T, \varphi_T, I_q, I_{T2}) + K \quad (2.105)$$

Ker je energijska funkcija izpeljana za sistem z ohranjeno strukturo, lahko za poljubno število naprav BESS-UPFC v EES energijsko funkcijo definiramo kot:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, \mathbf{U}) = V_k(\tilde{\omega}) + V_p(\tilde{\phi}, \mathbf{U}) + \sum_{i=1}^g V_{\text{BESS-SSSC}}(\tilde{\phi}, \mathbf{U}, U_{Ti}, \varphi_{Ti}, I_{qi}, I_{T2i}) + K \quad (2.106)$$

kjer je g število naprav BESS-UPFC v sistemu ter parametri U_{Ti} , φ_{Ti} , I_{qi} in I_{T2i} regulabilni parametri posamezne naprave BESS-UPFC.

3 Dokaz ustreznosti izpeljanih energijskih funkcij in njihova uporaba v direktnih metodah

3.1 Uvod

Ugotovljene energijske funkcije smo uporabili za ugotavljanje kritičnih časov odstranitve motnje CCT (angl. *critical clearing time*) s pomočjo direktne metode. Določevanje CCT je le eden od primerov uporabe energijskih funkcij, s katerim lahko obenem potrjujemo ustreznost dobljenih energijskih funkcij.

Da bi potrdili ustreznost energijske funkcije posamezne naprave FACTS, smo CCT za vsako napravo ugotavljali na dva načina. Najprej smo CCT ugotovili klasično po simulacijski metodi, tj. s ponavljanjem simulacije korak po koraku pri različnih časih odstranitve motnje. Nato smo CCT določili po direktni metodi, ki uporablja energijske funkcije. Kot testni sistem smo uporabili sistem SMIB, ki ima en sam generator in s tem enoumno določeno trajektorijo sistema. Ker je trajektorija sistema enoumno določena, se mora kritični čas odstranitve motnje oz. CCT ob uporabi ustrezne energijske funkcije popolnoma ujemati z rezultatom simulacijske metode. V EES z več generatorji se trajektorija okvarjenega sistema v splošnem razlikuje od trajektorije sistema po odpravi motnje in ugotovljeni CCT po direktni in simulacijski metodi se kljub ustreznosti uporabljenih energijskih funkcij v splošnem razlikujejo. Zato smo ustreznost ugotovljenih energijskih funkcij za posamezne naprave FACTS potrdili s primerjavo rezultatov za sistem SMIB, nato pa smo jih uporabili v direktni metodi za določevanje CCT v IEEE 9-vozliščnem sistemu.

Za simulacijsko in direktno metodo smo uporabljali programsko orodje *Mathematica*, ki omogoča reševanje diferencialno-algebrskih enačb, kar pospeši simulacijsko in direktno metodo ugotavljanja tranzientne stabilnosti.

Zavedamo se, da matematično programsko orodje ni najprimernejše za simulacijo EES in da bi za simulacijsko metodo precej lažje uporabili *PSCAD*, *EMTP* ali *Netomac*. Kljub temu pa smo se zaradi popolne identičnosti sistema pri obeh metodah odločili za programsko orodje

Mathematica, kajti pri programih, kot so *PSCAD*, *EMTP* ali *Netomac*, nimamo neposrednega pregleda nad modeliranjem elementov EES in postopkom integracije.

Priloge v zadnjem poglavju vsebujejo primere datotek za določanje CCT v obeh testnih sistemih po direktni in simulacijski metodi.

3.2 Simulacijska metoda

Pri simulacijski metodi za vnaprej izbran čas odstranitve motnje numerično rešujemo diferencialno-algebrske enačbe (1.5) do (1.8), ki opisujejo nihanje rotorjev. Z opazovanjem rotorskih kotov δ_i in hitrosti oddaljevanja rotorjev $\dot{\delta}_i$ od centra vztrajnostnih mas (angl. *center of inertia – COI*) ugotovimo stabilnost oz. nestabilnost sistema. S ponavljanjem simulacije pri različnih časih odstranitve motnje ugotovimo kritični čas odstranitve motnje oz. CCT. Da se izognemo računanju COI, ne opazujemo posameznih rotorskih kotov, temveč le razliko med posameznimi koti, ki je neodvisna od COI.

Slabost simulacijske metode je v njeni počasnosti. Potrebno je namreč večje število ponovitev simulacije pri različnih časih odstranitve motnje. Tako s poskušanjem ugotovimo najmanjši možni čas odstranitve motnje, pri katerem EES ostane stabilen.

Postopek ugotavljanja CCT s simulacijsko metodo je sledeč:

1. Določimo strukturo in parametre omrežja z motnjo.
2. Z reševanjem sistema algebrskih enačb, ki predstavljajo pretoke moči v omrežju, določimo fazorje napetosti generatorskih sponk glede na izračunane rotorske kote δ_i . Ti fazorji napetosti so začetni pogoji za korak 3.
3. Z integriranjem nihajnih enačb (1.5) do (1.8) izračunamo rotorske kote δ_i in hitrosti $\dot{\delta}_i$ vseh generatorjev za integracijski korak naprej.
4. Drugi in tretji korak ponavljamo, dokler ne dosežemo časa odstranitve motnje.
5. Za omrežje brez motnje določimo fazorje napetosti vseh vozlišč obravnavanega EES glede na izračunane rotorske kote δ_i ob odstranitvi motnje.
6. Numerično reševanje diferencialno-algebrskih enačb daje časovni potek rotorskih kotov δ_i in hitrosti $\dot{\delta}_i$ za čas po odstranitvi motnje. Glede na potek δ_i in $\dot{\delta}_i$ lahko ugotovimo, ali je sistem stabilen ali ne. Robni pogoji so rotorski koti δ_i in $\dot{\delta}_i$ ter fazorji napetosti vseh vozlišč EES v trenutku po odstranitvi motnje.
7. S ponavljanjem korakov 1 do 6 pri različnih časih odstranitve motnje ugotovimo CCT.

3.3 Direktna metoda

Z uporabo direktne metode se izognemo potrebi po ponavljanju simulacije za različne čase odstranitve motnje. Uporabili smo metodo PEBS, ki trajektorijo sistema po odstranitvi motnje enači s trajektorijo sistema brez odstranitve motnje. Metoda PEBS daje dobre rezultate, če se trajektorija kritično odstranjene motnje dobro prilega trajektoriji sistema z motnjo. Prednost direktne metode je hitrost, saj zadostuje ena sama simulacija sistema brez odprave motnje.

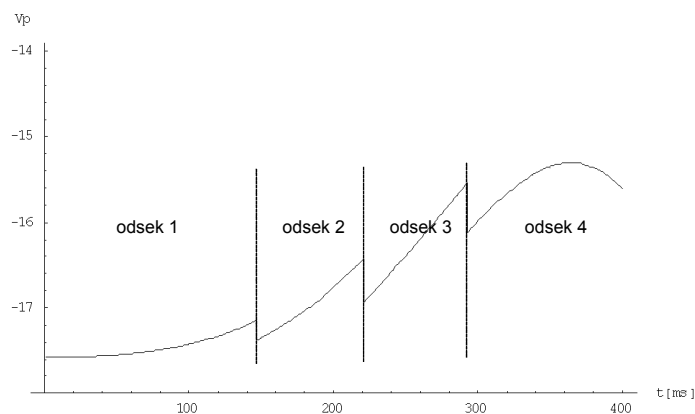
Postopek ugotavljanja CCT z direktno metodo je sledeč:

1. Določimo strukturo in parametre omrežja z motnjo.
2. Z reševanjem sistema algebrajskih enačb, ki predstavljajo pretoke moči v omrežju, določimo fazorje napetosti vseh vozlišč EES glede na izračunane rotorske kote δ_i . Ti fazorji napetosti so začetni pogoji za korak 3.
3. Z integriranjem nihajnih enačb (1.5) do (1.8) izračunamo rotorske kote δ_i in hitrosti $\dot{\delta}_i$ vseh generatorjev za integracijski korak naprej.
4. Drugi in tretji korak ponavljamo, dokler ne dosežemo največje vrednosti potencialne energije sistema V_p .
5. Glede na časovni potek fazorjev napetosti vseh vozlišč EES in rotorskih kotov δ_i in hitrosti $\dot{\delta}_i$ računamo časovni potek totalne energije sistema V in njenega potencialnega dela V_p za sistem brez motnje.
6. Glede na časovni potek totalne energije V določimo trenutek, ko se le-ta izenači z največjo vrednostjo potencialne energije V_p . Ta trenutek je kritični čas odstranitve motnje oz. CCT.

3.4 Upoštevanje odsekoma konstantnih parametrov

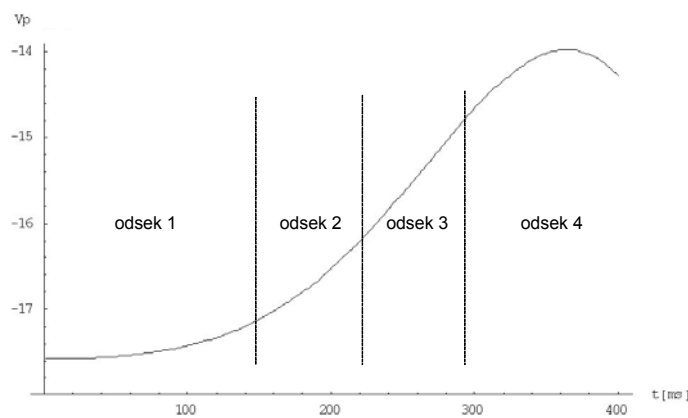
Konstantni regulabilni parametri, za katere smo definirali energijske funkcije naprav FACTS v poglavju 2, niso najprimernejši za proučevanje prispevka serijskih naprav FACTS na izboljšanje tranzientne stabilnosti. Osredotočili smo se predvsem na parameter φ_T , tj. na kot injicirane serijske napetosti naprav UPFC, IPFC, BESS-SSSC in BESS-UPFC. Testni primeri v [21] so pokazali, da se kot φ_T ne spreminja hitro, torej ga lahko upoštevamo kot odsekoma konstantnega – vrednost kota φ_T se med trajanjem prvega nihaja po odstranitvi motnje le nekajkrat skočno spremeni. Če je kot φ_T odsekoma konstanten, veljajo za posamezne naprave enake energijske funkcije, kot so bile izpeljane v poglavju 2 – seveda le v okviru posameznega odseka, v katerem so parametri konstantni. Pri uporabi energijske funkcije za iskanje optimalnih obratovalnih parametrov posamezne naprave po metodi, opisani v poglavju 4, so posamezni odseki med seboj neodvisni in usklajevanje med njimi ni potrebno. Drugače pa je pri uporabi direktnih metod za ugotavljanje tranzientne stabilnosti, kjer primerjamo vrednost energijske funkcije med posameznimi odseki z različnimi parametri in je posledično treba posamezne odseke med seboj uskladiti tako, kot je to opisano v nadaljevanju.

Za pravilno primerjavo totalne energije V , ki je vsota kinetične energije V_k in potencialne energije V_p , s potencialno energijo V_p vzdolž trajektorije sistema med trajanjem prvega nihaja moramo potencialno energijo V_p vzdolž trajektorije sistema preoblikovati v zvezno funkcijo. Poudariti je treba, da se ob skočni spremembi kota injicirane napetosti φ_T skočno spremenijo napetosti in koti omrežja. Posledično se skočno spremeni tudi potencialna energija sistema, ki je odvisna od napetosti in kotov omrežja. Potek potencialne energije vzdolž trajektorije okvarjenega sistema s tremi skočnimi spremembami kota φ_T prikazuje slika 3.1.



Slika 3.1: Potek potencialne energije V_p s tremi skočnimi spremembami kota φ_T

Po drugi strani se koti in hitrosti generatorjev ob spremembi kota φ_T ne spremenijo skočno in s tem ostaja kinetična energija V_k zvezna. Če EES tako kot v poglavju 1.4 predstavimo kot kroglico s kinetično in potencialno energijo, ki se kotali po trajektoriji, tj. po krivulji na sliki 3.1, moramo pojasniti, da pri skočni spremembi potencialne energije V_p kroglica ne "pade" na naslednji odsek krivulje, temveč se mora ta odsek krivulje V_p dvigniti do kroglice. Tako se posamezni odseki združijo v zvezno krivuljo, ki jo prikazuje slika 3.2. Zvezni potek potencialne energije V_p omogoča pravilno primerjavo totalne energije V v posameznem odseku z največjo vrednostjo potencialne energije V_p , kar je ključnega pomena pri direktni metodi ugotavljanja tranzientne stabilnosti EES.



Slika 3.2: Potek potencialne energije V_p po odpravi skočnih sprememb

Opisano usklajevanje posameznih odsekov zapišimo še analitično. Označimo število sekcij do trenutno računane potencialne energije V_p z w . Ustrezno vrednost potencialne energije izračunamo s pomočjo enačbe:

$$V_p = V_p^w - V_{p,PRVA}^w + \sum_{z=1}^{w-1} [V_{p,ZADNJA}^z - V_{p,PRVA}^z] \quad (3.1)$$

pri čemer potencialna energija V_p vključuje tudi energijsko funkcijo naprave FACTS. Oznaka PRVA predstavlja prvo vrednost potencialne energije V_p v odseku z , oznaka ZADNJA pa zadnjo vrednost potencialne energije V_p v odseku z vzdolž trajektorije sistema. Vsota, izražena v drugem delu (3.1), predstavlja vsoto posameznih skokov potencialne energije pri spremembi kota φ_T .

Enačbo (3.1) lahko splošimo za upoštevanje skočnega spreminjanja katerega koli od regulabilnih parametrov naprav FACTS.

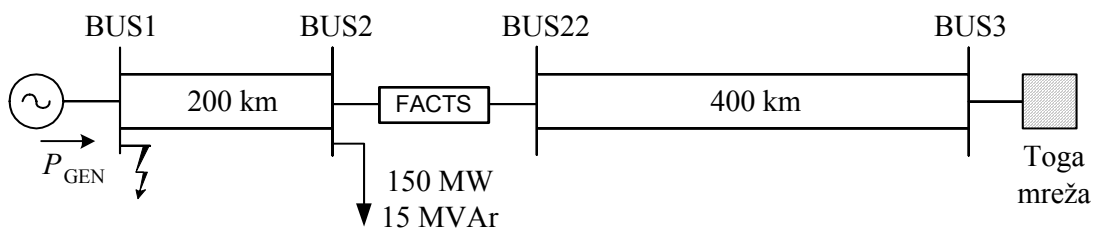
3.5 Longitudinalni testni primer

Ustreznost izpeljanih energijskih funkcij naprav FACTS smo preverili na longitudinalnem sistemu SMIB. Testni sistem prikazuje slika 3.3. Sestavljen je iz generatorja, priključenega na togo mrežo prek dveh odsekov dveh paralelnih 500-kilovoltnih daljnovodov. Posamezno napravo FACTS smo vključili med oba voda kot na sliki 3.3. Na zbiralko 2 smo priključili kompleksno breme (150 MW, 15 MVAR pri nazivni napetosti). Bremena smo modelirali kot konstantne admittance. Generator smo predstavili klasično, začetno napetost smo nastavili na 1 p.u. in kot 30° . Podatke generatorja in vodov prikazuje tabela 3.1.

TABELA 3.1: PODATKI GENERATORJA IN VODOV ZA LONGITUDINALNI SISTEM

Generator		Vodi
$P_n=1500$ MVA	$x_d'=45$ Ω	$x=0.33$ Ω/km
$T_m=6.6$ s		$c=12$ nF/km

Motnjo predstavlja tripolni kratki stik blizu generatorja. Predvideli smo odstranitev motnje brez spremembe topologije sistema. Vrednosti v per-unit sistemu so podane glede na bazno moč 1500 MVA in bazno napetost 500 kV.



Slika 3.3: Longitudinalni testni sistem generator – toga mreža

Za določanje kritičnega časa odstranitve motnje smo uporabili metodo PEBS (angl. *potential energy boundary surface*) [10], po kateri se kritični čas odstranitve motnje določi kot trenutek, ko je vsota kinetične in potencialne energije sistema po odstranitvi motnje enaka maksimumu potencialne energije po odstranitvi motnje na trajektoriji sistema z motnjo. Ker je trajektorija sistema z motnjo za sistem generator – toga mreža enoumno določena, se mora kritični čas odstranitve motnje, določen po zgoraj opisani direktni metodi PEBS, popolnoma ujemati z rezultatom simulacijske metode.

Za tripolni kratki stik smo najprej izračunali kritični čas odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku, nato pa po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije. Ker je breme modelirano kot konstantna admitanca, njegov vpliv na energijsko funkcijo pri uporabi direktne metode določimo numerično, kot je to opisano v [8].

3.5.1 Naprava UPFC

Napravo UPFC smo vstavili v testni sistem, kot prikazuje slika 3.3. Predpostavili smo, da sta regulabilna parametra UPFC U_T in I_q pred in med motnjo nastavljeni na vrednost 0. V trenutku odstranitve motnje smo regulacijske parametre UPFC nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.2.

Za tripolni kratki stik smo izračunali kritični čas odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku in po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije. Rezultati za različne največje vrednosti U_T in I_q ter za različne kote φ_T so predstavljeni v tabeli 3.2. Kot je razvidno iz te tabele, so rezultati simulacijske in direktne metode enaki, kar obenem potrjuje ustreznost nove energijske funkcije.

TABELA 3.2: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO UPFC S KONSTANTNIMI U_T , φ_T IN I_q

			Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_T [pu]	φ_T [°]	I_q [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	0	133	133
0.1	85	0	144	144
0.15	85	0	149	149
0	0	0.1	142	142
0.15	85	0.1	156	156
0.15	85	0.2	162	162

Naslednji numerični primer smo izvedli na enakem testnem sistemu, da bi preverili upoštevanje odsekoma konstantnih regulabilnih parametrov UPFC, kot je opisano v poglavju 3.4, kjer regulabilni parameter φ_T po odstranitvi motnje ni konstanten, marveč nekajkrat

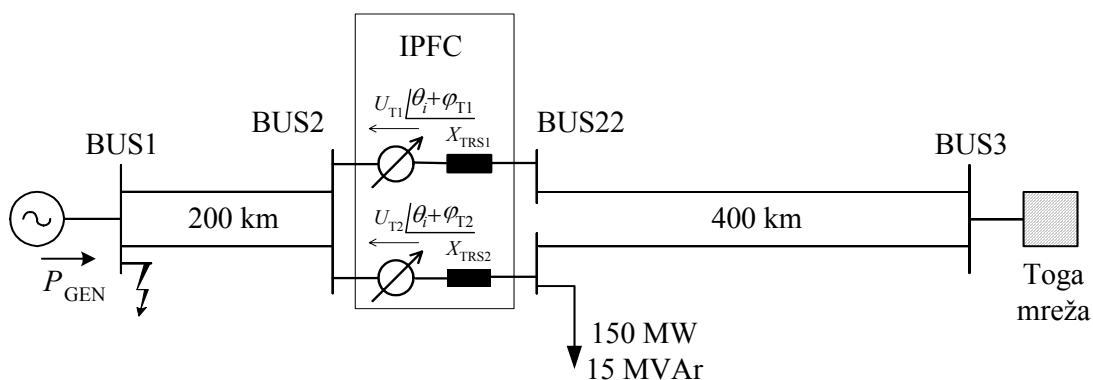
spremeni svojo vrednost. V tem numeričnem primeru regulabilni parameter φ_T spremenimo iz φ_{T1} na φ_{T2} v času 50 ms po odstranitvi motnje. Rezultati so predstavljeni v tabeli 3.3. Kritični časi odstranitve motnje, dobljeni po simulacijski in direktni metodi, so enaki, kar potrjuje pravilnost teorije upoštevanja odsekoma konstantnih regulabilnih parametrov UPFC.

TABELA 3.3: CCT, DOBLJENI Z ODSEKOMA KONSTANTNIM φ_T

$I_q = 0.1$			Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_T [pu]	φ_{T1} [°]	φ_{T2} [°]	CCT [ms]	CCT [ms]
0.1	5	85	149	149
0.1	35	85	150	150
0.15	5	85	152	152
0.15	35	85	154	154
0.15	55	85	155	155

3.5.2 Naprava IPFC

Napravo IPFC smo vstavili v testni sistem, kot prikazuje slika 3.4. Predpostavili smo, da sta regulabilna parametra IPFC U_{T1} in U_{T2} pred in med motnjo nastavljeni na vrednost 0. V trenutku odstranitve motnje smo regulacijske parametre UPFC nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.4. oz. 3.5.



Slika 3.4: Longitudinalni testni sistem z napravo IPFC

Ponovno smo kritični čas odstranitve motnje za tripolni kratki stik izračunali s pomočjo simulacijske metode korak po koraku in po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije.

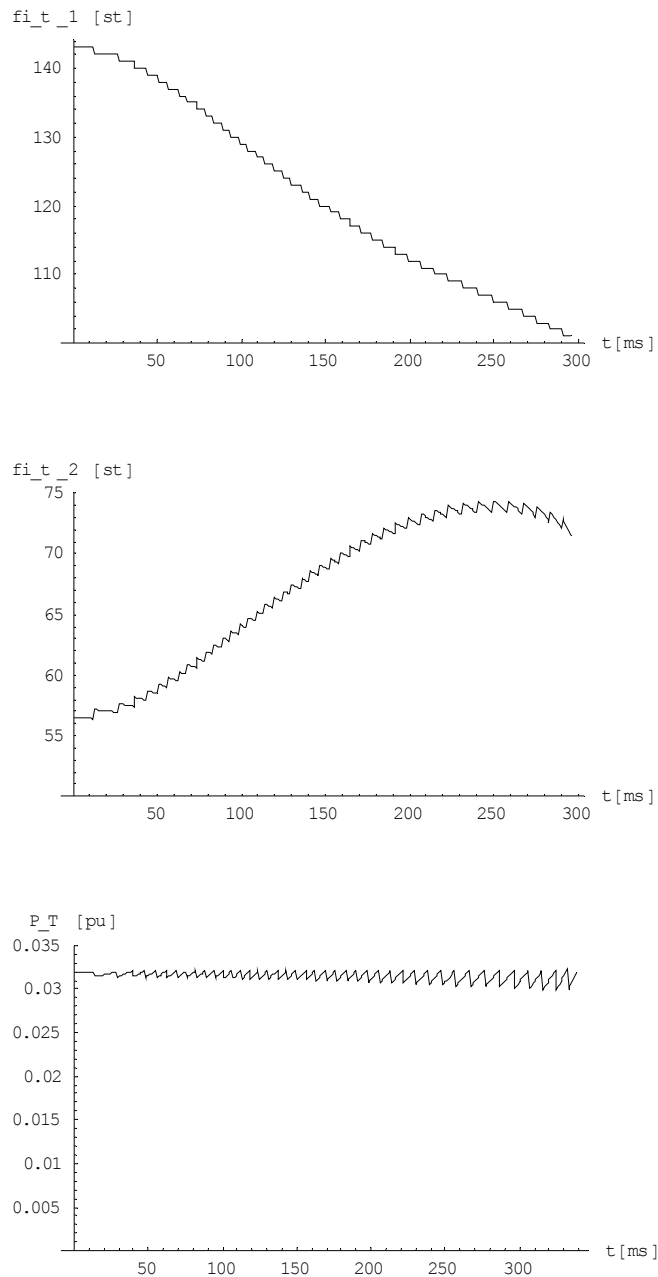
Najprej smo preverili energijsko funkcijo (2.54), ki velja za konstantni injicirani napetosti U_{T1} in U_{T2} ter konstanten kot φ_{T1} . Rezultati za različne največje vrednosti U_{T1} in U_{T2} in za različne konstantne kote φ_{T1} so predstavljeni v tabeli 3.4. Kot je razvidno iz te tabele, so rezultati simulacijske in direktne metode enaki, kar obenem potrjuje ustreznost nove energijske funkcije (2.54).

TABELA 3.4: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO IPFC S KONSTANTNIMI U_{T1} , U_{T2} IN φ_{T1}

			Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_{T1} [pu]	U_{T2} [pu]	φ_{T1} [°]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	~	139	139
0.1	0.1	40	147	147
0.1	0.1	70	150	150
0.1	0.1	100	151	151
0.1	0.1	130	149	149
0.15	0.15	100	156	156
0.2	0.2	100	160	160
0.25	0.25	100	164	164

Naslednji numerični primer smo izvedli za isto energijsko funkcijo (2.54) na enakem testnem sistemu, da bi preverili upoštevanje odsekoma konstantnih regulabilnih parametrov UPFC, kot je opisano v poglavju 3.4, kjer regulabilni parameter φ_{T1} po odstranitvi motnje ni konstanten, marveč nekajkrat skočno spremeni svojo vrednost. V tem numeričnem primeru sta konstantna regulabilna parametra U_{T1} in U_{T2} , parameter φ_{T1} je odsekoma konstanten, φ_{T2} pa, enako kot v prejšnjem primeru, ni regulabilen – odvisen je od preostalih treh regulacijskih parametrov. Parameter φ_{T1} se spreminja po korakih 1° avtomatsko glede na želen pretok delovne moči med posameznima vejama naprave IPFC. Konstantna regulabilna parametra naprave IPFC sta $U_{T1} = U_{T2} = 0.15$ p.u. Pri simulacijski in direktni metodi je kot φ_{T1} reguliran

tako, da je želen pretok delovne moči med vejama P_T v območju $0.03 \text{ p.u.} \pm 0.002 \text{ p.u.}$ Izračunan oz. določen CCT je po obeh metodah enak, tj. 155 ms, kar potrjuje pravilnost upoštevanja odsekoma konstantnih regulabilnih parametrov. Poteki kota φ_{T1} , φ_{T2} in moči P_T za izračun CCT po direktni metodi so prikazani na sliki 3.5.



Slika 3.5: Poteki kota φ_{T1} , φ_{T2} in moči P_T

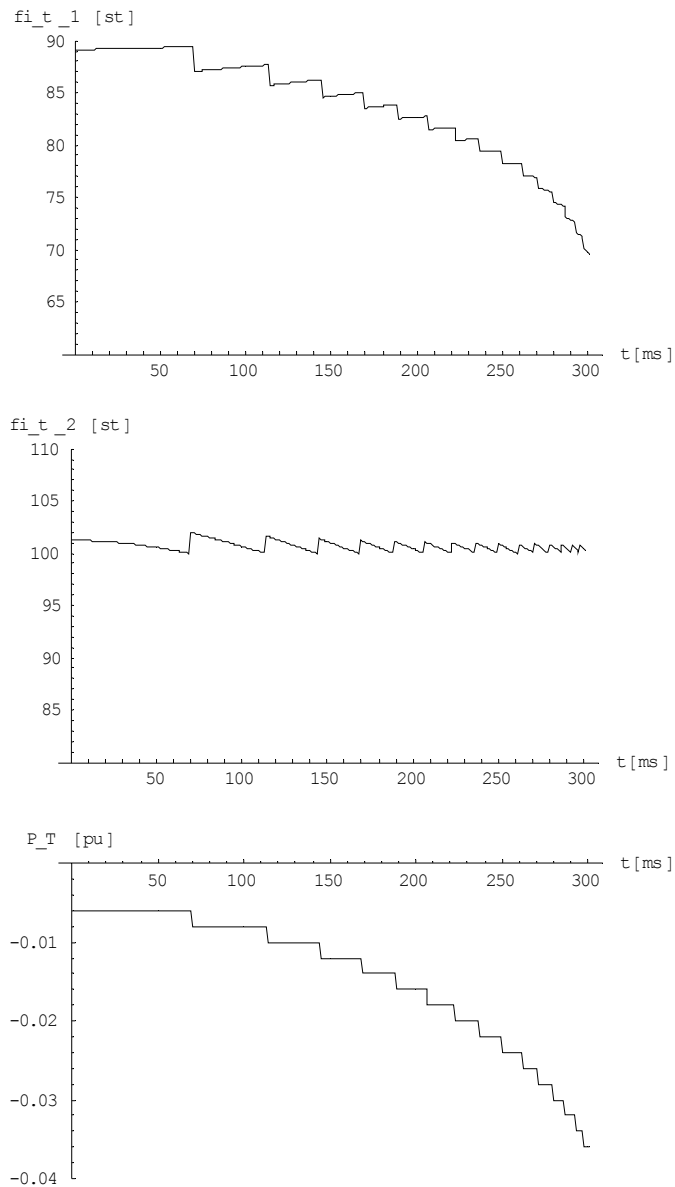
Za napravo IPFC smo preverili še njeno drugo energijsko funkcijo (2.58), kjer so konstantni oz. odsekoma konstantni regulacijski parametri U_{T1} , U_{T2} in pretok moči med vejama P_T . Rezultati za različne vrednosti regulacijskih parametrov so prikazani v tabeli 3.5. Rezultati

simulacijske in direktne metode so enaki, kar potrjuje ustreznost nove energijske funkcije (2.58).

TABELA 3.5: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO IPFC S KONSTANTNIMI U_{T1} , U_{T2} IN P_T

			Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_{T1} [pu]	U_{T2} [pu]	P_T [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
0.0	0.0	0	139	139
0.15	0.15	-0.05	154	154
0.15	0.15	0	156	156
0.15	0.15	0.075	138	138
0.3	0.3	-0.1	165	165
0.3	0.3	0	168	168
0.3	0.3	0.1	164	164

Naslednji numerični primer smo ponovno izvedli za energijsko funkcijo (2.58) na enakem testnem sistemu, da bi preverili upoštevanje odsekoma konstantnih regulabilnih parametrov UPFC, kot je opisano v poglavju 3.4, kjer regulabilni parameter P_T po odstranitvi motnje ni konstanten, marveč nekajkrat spremeni svojo vrednost. V tem numeričnem primeru sta konstantna regulabilna parametra U_{T1} in U_{T2} , parameter P_T pa je odsekoma konstanten. Parameter P_T se spreminja po korakih 0.002 p.u. avtomatsko glede na želen kot φ_{T2} . Konstantna regulabilna parametra naprave IPFC sta $U_{T1} = U_{T2} = 0.15$ p.u. Pri simulacijski in direktni metodi je moč P_T regulirana tako, da je želen kot injicirane napetosti v drugi veji φ_{T2} v območju med 100° in 102° . Izračunan oz. določen CCT je po obeh metodah enak, tj. 155 ms, kar potrjuje pravilnost upoštevanja odsekoma konstantnih regulabilnih parametrov za napravo IPFC. Poteki moči P_T ter kota φ_{T1} in φ_{T2} za izračun CCT po direktni metodi so prikazani na sliki 3.6.

Slika 3.6: Poteki kota φ_{T1} , φ_{T2} in moči P_T

3.5.3 BESS-STATCOM

Napravo BESS-STATCOM smo vstavili v testni sistem, kot prikazuje slika 3.7. Izvedli smo dva numerična primera; prvi se nanaša na energijsko funkcijo naprave BESS-STATCOM (2.71), ki upošteva konstantna regulacijska parametra I_P in β , drugi primer pa se nanaša na energijsko funkcijo (2.76), ki upošteva konstantna regulacijska parametra I_P in P_{si} . Predpostavili smo, da sta regulabilna parametra pred in med motnjo v obeh primerih

nastavljena na vrednost 0. V trenutku odstranitve motnje smo regulacijska parametra nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.6 oz. 3.7.



Slika 3.7: Longitudinalni testni sistem z napravo BESS-STATCOM

Tabela 3.6 prikazuje ugotovljene kritične čase odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije (2.71), ki upošteva konstanta regulacijska parametra I_P in β . Ko je kot β večji od 90° , delovna moč teče iz zbiranke v napravo BESS-STATCOM. Rezultati simulacijske in direktne metode so enaki, kar potrjuje ustreznost nove energijske funkcije (2.71).

TABELA 3.6: CCT-JI ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-STATCOM S KONSTANTNIMA I_P IN β

		Simulacijska metoda	Direktna metoda
I_P [pu]	β [°]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	~	106	106
0.1	45	108	108
0.1	90	113	113
0.1	135	114	114
0.1	180	110	110
0.2	45	110	110
0.2	90	119	119
0.2	135	120	120
0.2	180	113	113
0.3	45	111	111
0.3	90	125	125
0.3	120	126	126
0.3	135	125	125
0.3	180	115	115

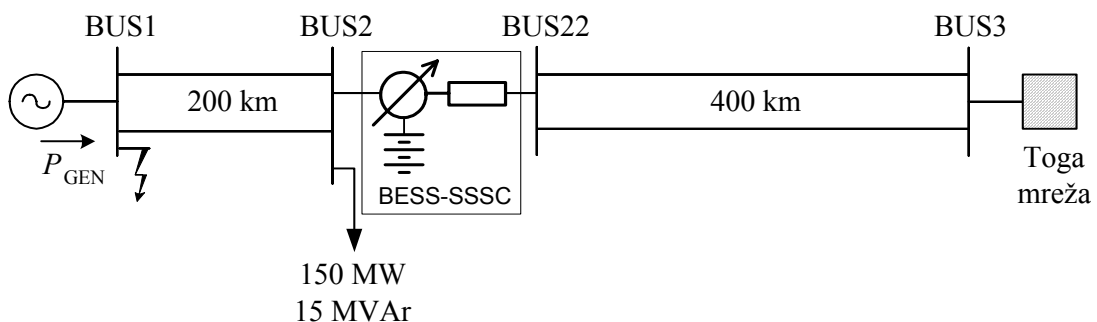
Za energijsko funkcijo (2.76), ki upošteva konstantna regulacijska parametra I_P in P_{si} , so ugotovljeni kritični časi odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi prikazani v tabeli 3.7. Negativni predznak injicirane delovne moči P_{si} pomeni, da delovna moč teče iz zbiralke v napravo BESS-STATCOM. Rezultati simulacijske in direktne metode so enaki, kar potrjuje ustreznost nove energijske funkcije (2.76). Regulacijsko območje nastavitve moči P_{si} je pri konstantnih vrednostih tega parametra zelo ozko. Vzrok za to je v padcu napetosti priključne sponke naprave BESS-STATCOM, ki se v času prvega nihaja zniža iz približno 1 p.u. na približno 0.1 p.u.

TABELA 3.7: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-STATCOM S KONSTANTNIMA I_P IN P_{si}

I_P [pu]	P_{si} [pu]	Simulacijska metoda	Direktna metoda
		CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	106	106
0.1	0	113	113
0.1	-0.01	114	114
0.2	0	119	119
0.2	-0.022	120	120
0.3	0	125	125
0.3	-0.33	126	126

3.5.4 BESS-SSSC

Napravo BESS-SSSC smo vstavili v testni sistem, kot prikazuje slika 3.8.



Slika 3.8: Longitudinalni testni sistem z napravo BESS-SSSC

Izvedli smo dva numerična primera; prvi se nanaša na energijsko funkcijo naprave BESS-SSSC (2.90), ki upošteva konstanta regulacijska parametra U_T in φ_T , drugi primer pa se nanaša na energijsko funkcijo (2.93), ki upošteva konstanta regulacijska parametra φ_T in P_T . Predpostavili smo, da sta regulabilna parametra pred in med motnjo v obeh primerih nastavljena na vrednost 0. V trenutku odstranitve motnje smo regulacijska parametra nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.8 oz. 3.9.

Tabela 3.8 prikazuje ugotovljene kritične čase odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije (2.90), ki upošteva konstanta regulacijska parametra U_T in φ_T . Rezultati simulacijske in direktne metode so enaki, kar potrjuje ustreznost nove energijske funkcije (2.90).

TABELA 3.8: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-SSSC S KONSTANTNIMA U_T IN φ_T

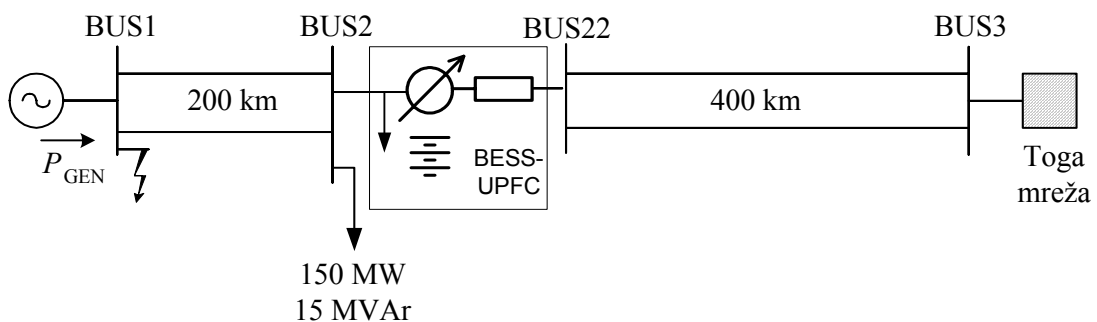
		Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_T [pu]	φ_T [°]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	133	133
0.05	0	126	126
0.1	0	118	118
0.1	60	136	136
0.1	120	149	149
0.1	150	150	150
0.1	180	146	147
0.2	120	161	161
0.2	140	164	164
0.2	150	164	165
0.2	178	159	159
0.2	180	158	159
0.3	140	175	176
0.3	150	176	177
0.3	160	175	176

Za energijsko funkcijo (2.93), ki upošteva konstanta regulacijska parametra φ_T in P_T , so ugotovljeni kritični časi odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi prikazani v tabeli 3.9. Negativni predznak injicirane delovne moči P_T pomeni, da delovna moč teče iz EES v napravo BESS-SSSC. Tabela 3.9 vsebuje največje možne vrednosti za moč P_T glede na posamezno velikost napetosti U_T , ki smo jih ugotovili s poskušanjem. Pri želenih prevelikih injiciranih močeh P_T izračunani koti injicirane napetosti U_T ustrezajo največji možni injicirani moči, ki pa je manjša od želene P_T . Rezultati simulacijske in direktne metode so enaki, kar potrjuje ustreznost nove energijske funkcije (2.93).

TABELA 3.9: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-SSSC S KONSTANTNIMA U_T IN P_T

		Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_T [pu]	P_T [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	133	133
0.1	0.0	144	144
0.1	0.05	139	139
0.1	-0.05	148	148
0.1	-0.09	149	149
0.2	0	153	153
0.2	-0.22	163	163
0.3	0	161	161
0.3	-0.32	174	174

3.5.5 BESS-UPFC



Slika 3.9: Longitudinalni testni sistem z napravo BESS-UPFC

Napravo BESS-UPFC smo vstavili v testni sistem, kot prikazuje slika 3.9. Izvedli smo dva numerična primera; prvi se nanaša na energijsko funkcijo naprave BESS-UPFC (2.103), ki upošteva konstante regulacijske parametre U_T , φ_T , I_q in I_{T2} , drugi primer pa se nanaša na energijsko funkcijo (2.104), ki upošteva konstante regulacijske parametre U_T , φ_T , I_q in P_T . Predpostavili smo, da so regulabilni parametri pred in med motnjo v obeh primerih nastavljeni na vrednost 0. V trenutku odstranitve motnje smo regulacijske parametre nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.10 oz. 3.11.

Tabela 3.10 prikazuje ugotovljene kritične čase odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije (2.103), ki upošteva konstante regulacijske parametre U_T , φ_T , I_q in I_{T2} . Rezultati simulacijske in direktne metode so enaki, kar potrjuje ustreznost nove energijske funkcije (2.103).

TABELA 3.10: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-UPFC S KONSTANTNIMI U_T , φ_T , I_q IN I_{T2}

U_T [pu]	φ_T [°]	I_q [pu]	I_{T2} [pu]	Simulacijska metoda	Direktna metoda
				CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	0	0	133	133
0.1	85	0.2	0	162	162
0.1	85	0.2	0.1	157	157
0.1	85	0.2	-0.1	166	166
0.1	55	0.2	-0.2	161	161
0.1	85	0.2	-0.2	168	168
0.1	95	0.2	-0.2	170	170
0.1	105	0.2	-0.2	171	171
0.1	115	0.2	-0.2	170	170
0.1	125	0.2	-0.2	169	169

Za energijsko funkcijo (2.104), ki upošteva konstante regulacijske parametre U_T , φ_T , I_q in P_T , so ugotovljeni kritični časi odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi prikazani v tabeli 3.11. Negativni predznak injicirane delovne moči P_T pomeni, da delovna moč teče iz EES v napravo BESS-UPFC. Tabela 3.11 vsebuje največje možne vrednosti za moč P_T glede na posamezno velikost napetosti U_T , ki smo jih

ugotovili s poskušanjem. Pri zelenih prevelikih injiciranih močeh P_T izračunani koti injicirane napetosti U_T ustrezajo največji možni injicirani moči, ki pa je manjša od želene moči P_T . Rezultati simulacijske in direktne metode so enaki, kar potrjuje ustreznost nove energijske funkcije (2.104).

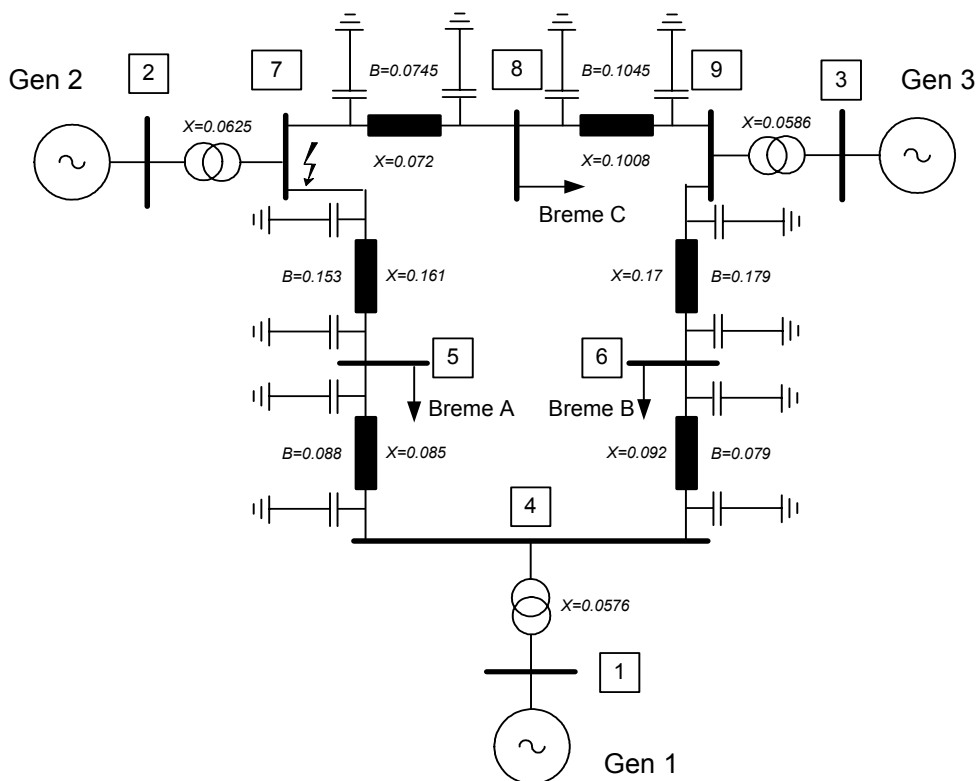
TABELA 3.11: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-UPFC S KONSTANTNIMI U_T, φ_T, I_q IN P_T

				Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_T [pu]	φ_T [°]	I_q [pu]	P_T [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	0	0	133	133
0.1	85	0.2	0.1	153	153
0.1	85	0.2	0.05	158	158
0.1	85	0.2	0	162	162
0.1	85	0.2	-0.05	165	165
0.1	95	0.2	-0.1	168	168
0.1	105	0.2	-0.1	169	169
0.1	115	0.2	-0.1	168	168

3.6 Devetvozliščni sistem IEEE

Energijske funkcije smo v prejšnjem podpoglavju preverili na longitudinalnem sistemu, kjer je možna ena sama trajektorija sistema. Če sistem vsebuje več kot dva generatorja, trajektorija sistema ni več enoumno določena in direktna metoda ne daje nujno enakih rezultatov kot simulacijska metoda. Zato ta model ni primeren za potrjevanje ustreznosti energijske funkcije. Kljub temu pa je primeren za prikaz možnosti uporabe SPEF za več naprav FACTS hkrati v sistemu z več generatorji.

Testni devetvozliščni sistem s tremi generatorji je prikazan na sliki 3.10. Prvič je bil prikazan v [22] in je v literaturi uveljavljen za analizo dinamike. Slika 3.10 prikazuje impedance omrežja v per-unit sistemu, preračunane na bazno moč 100 MW. Omska upornost vodov ni upoštevana, kar je prvi pogoj za veljavnost energijskih funkcij Ljapunova.



Slika 3.10: Impedančna shema devetvozliščnega sistema IEEE

Podatki o generatorjih, bremenih in izhodiščnih vrednostih za numerične izračune prikazuje tabela 3.12.

TABELA 3.12: PODATKI O GENERATORJIH, BREMENIH IN ZAČETNIH VREDNOSTIH

Generator	1	2	3
Nazivna moč [MVA]	247.5	192	128
x_d' [pu]	0.0608	0.1198	0.1813
Vztrajnostni koeficient	0.1254	0.0339	0.016

Bremena	A	B	C
Moč [MVA]	125+j50	90+j30	100+j35

Začetne vrednosti	1	2	3
Napetost na zbiralkah [pu]	1.040∠0.0°	1.025∠9.3°	1.025∠-10.9°

Bremena smo modelirali kot konstantne admittance glede na moč pri nazivni napetosti. Glede na začetne vrednosti napetosti na zbiralkah 1, 2 in 3 smo izračunali pretoke moči v omrežju in glede na to smo določili mehanske moči generatorjev tako, da smo jih izenačili z delovnimi močmi, ki tečejo iz posameznih generatorskih vozlišč. Generatorje smo enako kot v longitudinalnih primerih predstavili klasično, tj. kot napetosti konstantne amplitude za tranzientno reaktanco.

Motnjo pomeni tripolni kratki stik blizu zbiralke 7, ki je odstranjen brez spremembe topologije sistema. Naprave FACTS s hranilnikom energije smo locirali blizu generatorja 2, ki med trajanjem kratkega stika najbolj pospeši. Pri tej lokaciji posamezna naprava najbolj vpliva na izboljšanje tranzientne stabilnosti. Ker ena sama serijska naprava FACTS (tj. BESS-SSSC ali UPFC) v sistemu požene krožno moč, smo za ti dve napravi izvedli numerične primere tudi na ta način, da smo v sistem vključili po dve napravi FACTS.

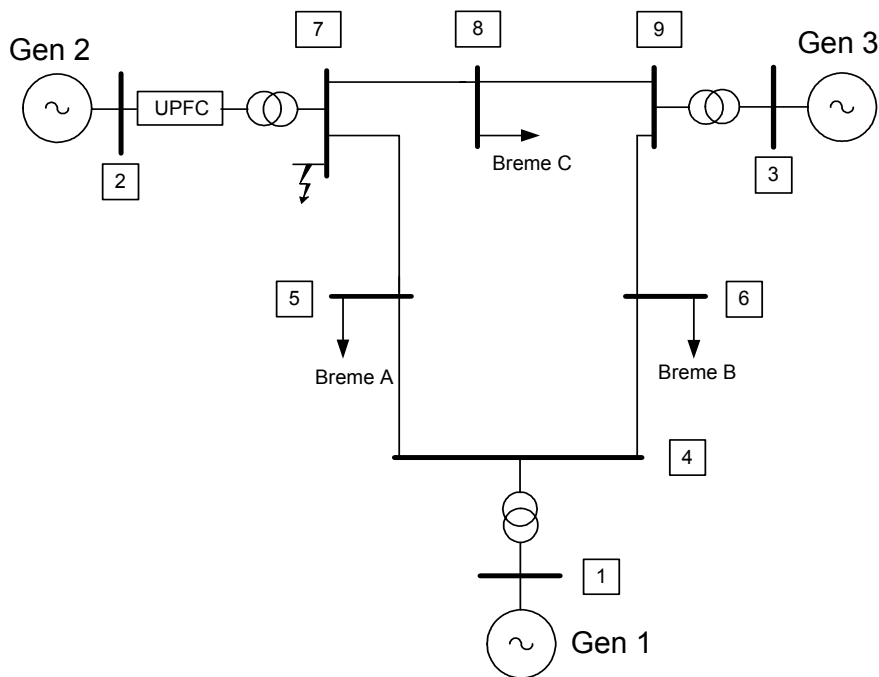
Za določanje kritičnega časa odstranitve motnje smo enako kot v longitudinalnem sistemu uporabili metodo PEBS [10], po kateri se kritični čas odstranitve motnje določi kot trenutek, ko je vsota kinetične in potencialne energije sistema po odstranitvi motnje enaka maksimumu potencialne energije po odstranitvi motnje na trajektoriji sistema z motnjo. Ker trajektorija sistema z motnjo za devetvozliščni sistem IEEE s tremi generatorji ni enoumno določena, se

kritični čas odstranitve motnje, določen po zgoraj opisani direktni metodi PEBS, ne ujema popolnoma z rezultatom simulacijske metode.

Za tripolni kratki stik smo najprej izračunali kritični čas odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku, potem pa po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije. Vpliv bremen na energijsko funkcijo pri uporabi direktne metode smo določili numerično, kot je to opisano v [8].

3.6.1 Naprava UPFC

Napravo UPFC smo vstavili v testni sistem, kot prikazuje slika 3.11. Predpostavili smo, da se UPFC vključi v sistem šele po odpravi motnje. Po odpravi motnje smo regulacijske parametre UPFC nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.13.



Slika 3.11: Devetvozliščni sistem IEEE z enim UPFC

Za tripolni kratki stik smo izračunali kritični čas odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije. Rezultati za različne največje vrednosti U_T in I_q in za različne kote φ_T so predstavljeni v tabeli 3.13. Kot je razvidno iz te tabele, so rezultati digitalne simulacije in direktne metode dokaj enaki, za izbrane parametre se CCT razlikujejo največ za 2 ms.

TABELA 3.13: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z ENIM UPFC

			Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_T [pu]	φ_T [°]	I_q [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	0	235	234
0.1	-90	0	237	237
0.1	-60	0	244	243
0.1	-30	0	247	247
0.1	-20	0	248	247
0.1	-10	0	248	247
0.1	0	0	248	247
0.1	10	0	247	246
0.1	20	0	246	245
0.1	45	0	243	242
0.1	75	0	238	236
0.1	90	0	235	233
0.2	-10	0	259	259
0.3	0	0	267	268
0.3	-50	0.2	271	271
0.3	-30	0.2	272	272
0.3	0	0.2	269	270
0.3	-30	0.3	273	273
0.3	-30	0.4	274	275

Naslednji numerični primer prikazuje izračun CCT, ko so regulabilni parametri odsekoma konstantni. Izračun smo izvedli na enakem testnem sistemu, kot ga prikazuje slika 3.11. Regulabilni parameter φ_T skočno spreminja vrednost tako, da je pretok delovne moči med serijsko in paralelno vejo naprave UPFC čim bližje vrednosti 0. Poleg tega smo paralelni jalovi tok nastavili na vrednost 0. Tako UPFC obratuje kot SSSC. Pri izračunu CCT smo za upoštevanje skokov potencialne energije upoštevali (3.1).

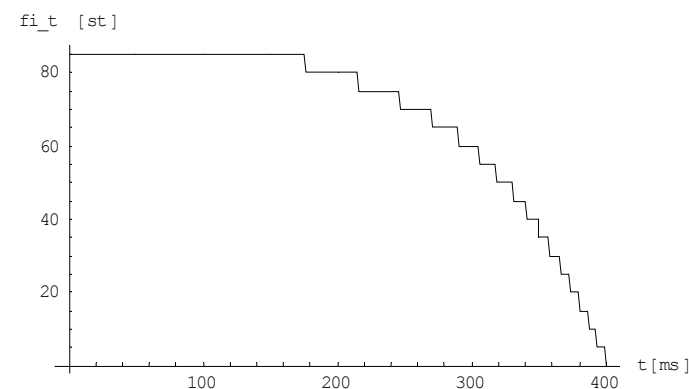
Rezultati so zbrani v tabeli 3.14. Izračunane CCT smo primerjali z rezultati v [4], kjer je predstavljen SSSC v enakem IEEE 9-vozliščnem testnem sistemu. Rezultati so v obeh primerih enaki. Izračun lahko upoštevamo kot še en dokaz, da v direktnih metodah

ugotavljanja tranzientne stabilnosti lahko odsekoma konstantne parametre uporabimo za aproksimacijo zveznih regulacijskih strategij.

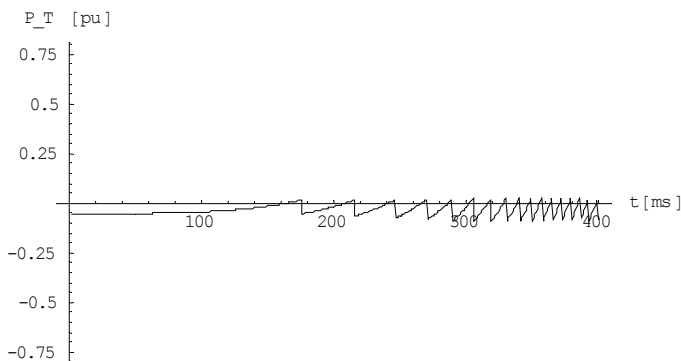
TABELA 3.14: IZRAČUNANI CCT PO DIREKTNI METODI ZA SSSC V [4]
IN ZA UPFC, KI OBRATUJE KOT SSSC

SSSC	UPFC	SSSC	UPFC
U_T [pu]	U_T [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
brez SSSC	brez UPFC	245	245
0	0	234	234
0.1	0.1	241	241
0.2	0.2	247	247
0.3	0.3	253	253

Slika 3.12 prikazuje regulabilni parameter φ_T in pretok delovne moči P_T med serijsko in paralelno vejo naprave UPFC.



a)

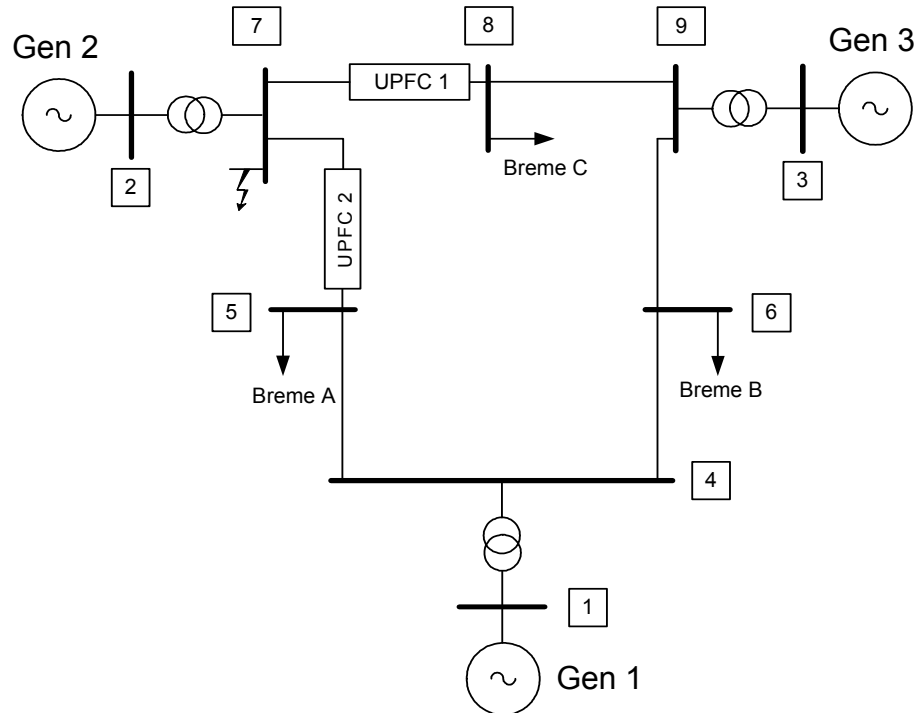


b)

Slika 3.12: a) Kot φ_T naprave UPFC

b) Pretok delovne moči P_T med serijsko in paralelno vejo naprave UPFC

Naslednji numerični primer upošteva vključitev dveh naprav UPFC, eno pri zbiralki 5 in drugo pri zbiralki 8, na način, kot prikazuje slika 3.13. Predpostavili smo, da se oba UPFC vključita v sistem šele po odpravi motnje. Po odpravi motnje smo regulacijske parametre UPFC nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.15.



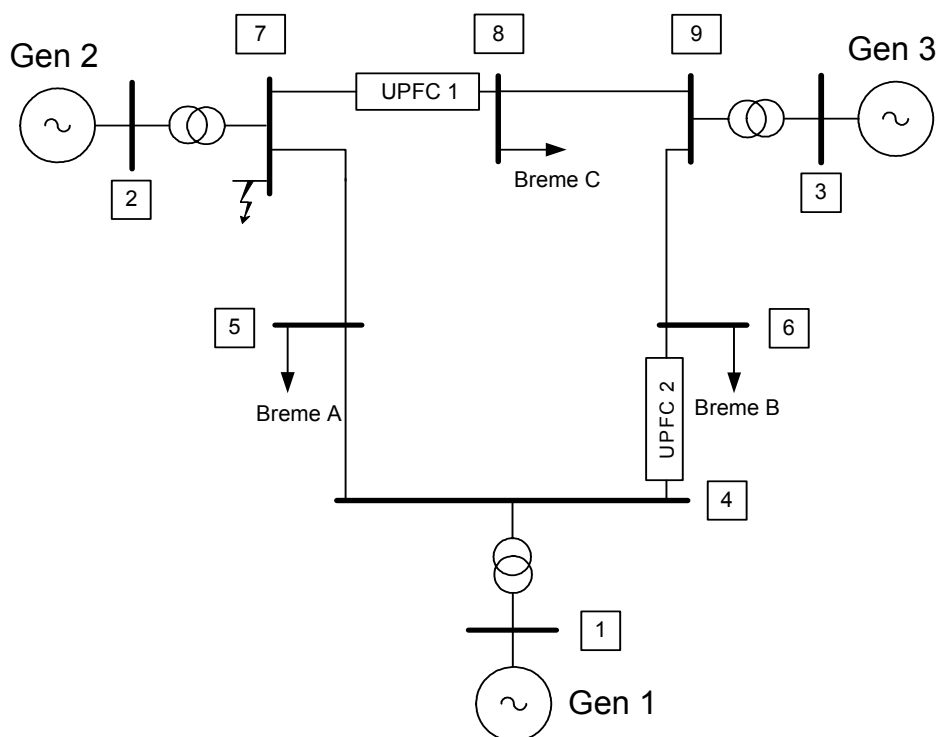
Slika 3.13: Devetvozliščni sistem IEEE z dvema UPFC na zbiralkah 5 in 8

Za tripolni kratki stik smo izračunali kritični čas odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije. Rezultati za različne največje vrednosti U_T in I_q ter za različne kote φ_T so predstavljeni v tabeli 3.15. Iz te tabele je razvidno, da v zazankanem sistemu, kakršen je devetvozliščni sistem IEEE, z dvema UPFC lahko izboljšamo tranzientno stabilnost.

Naslednji numerični primer upošteva vključitev dveh naprav UPFC na lokaciji, ki je bolj oddaljena od mesta kratkega stika, tj. en UPFC pri zbiralki 4 in drug pri zbiralki 8, na način, kot prikazuje slika 3.14. Predpostavili smo, da se oba UPFC vključita v sistem šele po odpravi motnje. Po odpravi motnje smo regulacijske parametre naprave UPFC nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.16.

TABELA 3.15: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z DVEMA UPFC NA ZBIRALKAH 5 IN 8

U_{T1} [pu]	U_{T2} [pu]	φ_{T1} [°]	φ_{T2} [°]	I_{q1} [pu]	I_{q2} [pu]	Simulacijska metoda	Direktna metoda
brez UPFC						CCT [ms]	CCT [ms]
						246	245
0.0	0.0	~	~	0.0	0.0	240	239
0.1	0.0	-55	~	0.1	0.0	244	246
0.0	0.1	~	15	0.0	0.1	252	251
0.1	0.1	-55	20	0.1	0.1	254	258
0.2	0.2	-115	10	0.1	0.1	260	262
0.3	0.3	-130	30	0.1	0.1	263	266



Slika 3.14: Devetvozliščni sistem IEEE z dvema UPFC na zbiralkah 4 in 8

Za tripolni kratki stik smo izračunali kritični čas odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije. Rezultati za različne največje vrednosti U_T in I_q ter za različne kote φ_T so predstavljeni v tabeli 3.16. S

primerjavo z rezultati iz tabele 3.15 lahko ugotovimo, da lokacija naprav v bližini kratkega stika ni pogoj za učinkovito izboljšanje tranzientne stabilnosti.

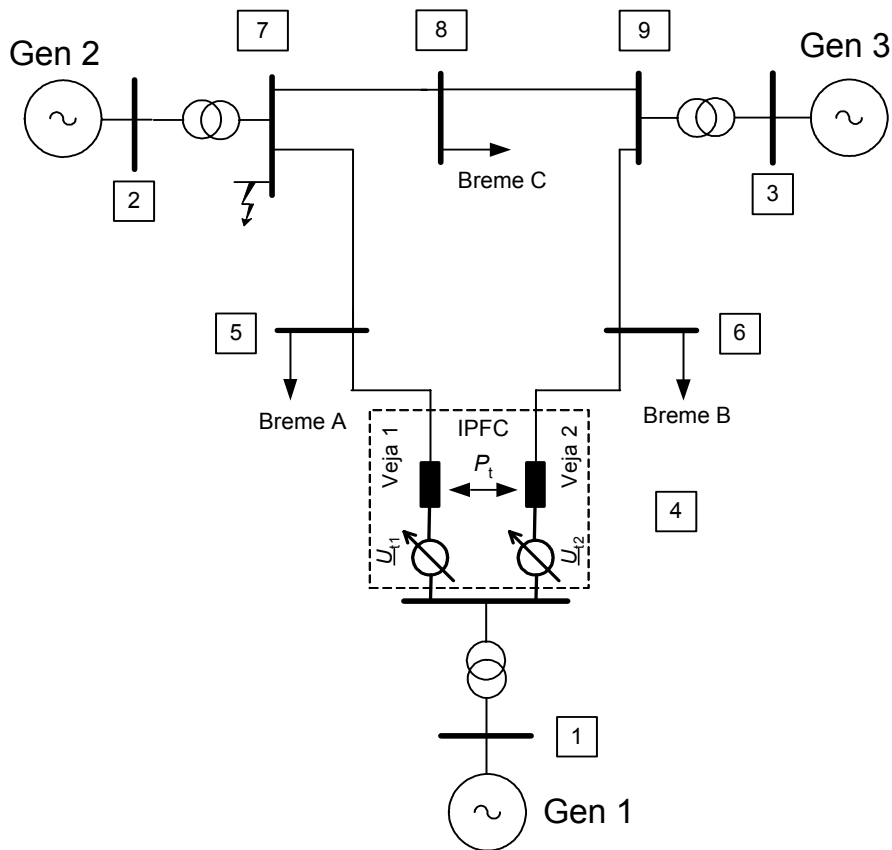
TABELA 3.16: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z DVEMA UPFC NA ZBIRALKAH 4 IN 8

						Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_{T1} [pu]	U_{T2} [pu]	φ_{T1} [°]	φ_{T2} [°]	I_{q1} [pu]	I_{q2} [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
brez UPFC						246	245
0.0	0.0	~	~	0.0	0.0	242	242
0.0	0.0	~	~	0.1	0.1	245	245
0.1	0.0	-55	~	0.1	0.0	246	248
0.0	0.1	~	15	0.0	0.1	246	245
0.1	0.1	-55	20	0.1	0.1	251	252
0.15	0.15	300	20	0.1	0.1	254	254
0.2	0.2	280	20	0.1	0.1	257	257
0.25	0.25	275	25	0.1	0.1	261	259

3.6.2 Naprava IPFC

Napravo IPFC smo vstavili v testni sistem na zbiralko 4 tako, da sta serijski veji vključeni v vod 4-5 in 4-6, kot prikazuje slika 3.15. Predpostavili smo, da se IPFC vključi v sistem šele po odpravi motnje.

Izvedli smo dva numerična primera; prvi se nanaša na energijsko funkcijo naprave IPFC (2.54), ki upošteva konstante regulacijske parametre U_{T1} , U_{T2} in φ_{T1} , drugi primer pa se nanaša na energijsko funkcijo (2.58), ki upošteva konstante regulacijske parametre U_{T1} , U_{T2} in P_T . Predpostavili smo, da so regulabilni parametri pred in med motnjo v obeh primerih nastavljeni na vrednost 0. V trenutku odstranitve motnje smo regulacijske parametre nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.17 oz. 3.18.



Slika 3.15: Devetvozliščni sistem IEEE z napravo IPFC

Tabela 3.17 prikazuje ugotovljene kritične čase odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije (2.54) za različne največje vrednosti U_{T1} in U_{T2} ter za različne kote φ_{T1} . Glede na izbrane parametre U_{T1} , U_{T2} in φ_{T1} lahko druga veja injicira v omrežje jalovo moč kapacitivne ali induktivne narave in s tem dobimo dve različni rešitvi za CCT. Katero od rešitev dobimo, je odvisno od začetnih pogojev za kot φ_{T2} pri numeričnem reševanju nihajnih enačb sistema. V spodnji tabeli navedeni izračuni veljajo za kapacitivno injicirano jalovo moč, ki najbolj poveča kritične čase odstranitve motnje. Posamezni CCT, ugotovljeni po obeh metodah, se razlikujejo največ za 2 ms.

TABELA 3.17: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE
S KONSTANTNIMI PARAMETRI U_{T1} , U_{T2} IN φ_{T1}

			Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_{T1} [pu]	U_{T2} [°]	φ_{T1} [°]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	~	242	244
0.1	0.2	-90	245	245
0.1	0.2	-45	247	247
0.1	0.2	0	247	248
0.1	0.2	45	246	247
0.1	0.2	90	245	246
0.15	0.25	-45	248	248
0.15	0.25	0	249	249
0.15	0.25	45	246	248

Za energijsko funkcijo (2.58) s konstantnimi parametri U_{T1} , U_{T2} in P_T so ugotovljeni kritični časi odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku ter po direktni metodi prikazani v tabeli 3.18.

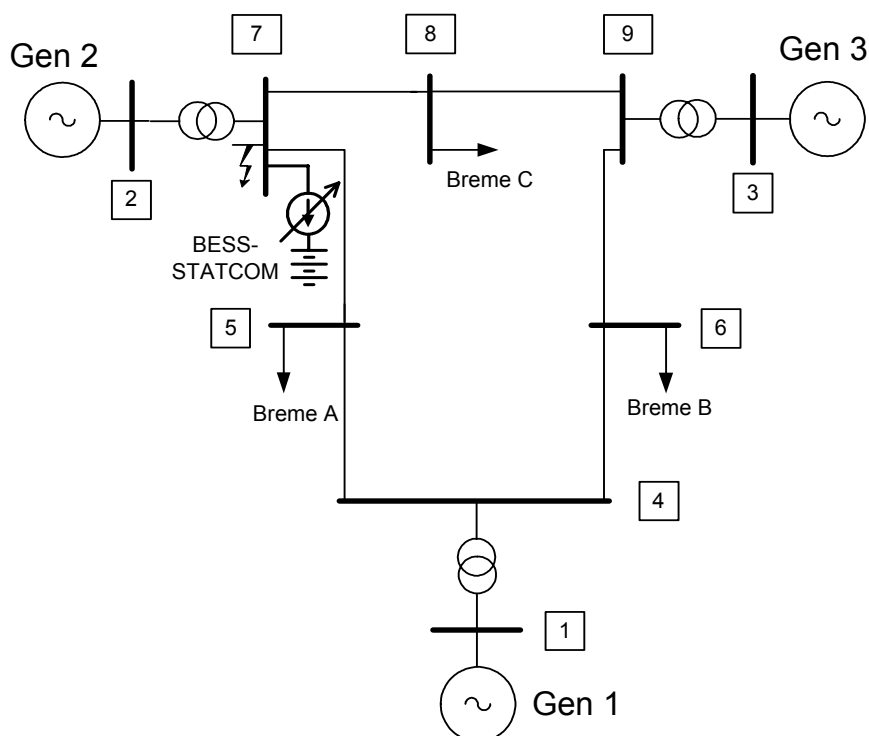
TABELA 3.18: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE
S KONSTANTNIMI PARAMETRI U_{T1} , U_{T1} IN P_T

			Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_{T1} [pu]	U_{T2} [pu]	P_T [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	0	242	244
0.1	0.1	0	246	246
0.1	0.1	0.07	245	245
0.1	0.1	-0.07	246	247
0.2	0.2	0	249	249
0.2	0.2	0.1	248	247
0.2	0.2	-0.17	249	249
0.25	0.25	0	250	250
0.25	0.25	0.1	249	248
0.25	0.25	-0.2	250	251

Ko je moč P_T pozitivna, teče moč iz druge veje IPFC v prvo. Glede na izbrane parametre U_{T1} , U_{T2} in P_T lahko vsaka od vej injicira v omrežje jalovo moč kapacitivne ali induktivne narave in s tem dobimo štiri različne rešitve za CCT. Katero od rešitev dobimo, je odvisno od začetnih pogojev za kot φ_{T1} in kot φ_{T2} pri numeričnem reševanju nihajnih enačb sistema. V spodnji tabeli navedeni izračuni veljajo za kapacitivno injicirano jalovo moč v obeh vejah, ki najbolj poveča kritične čase odstranitve motnje. Posamezni CCT, ugotovljeni po obeh metodah, se razlikujejo največ za korak integracije – tj. 1 ms.

3.6.3 Naprava BESS-STATCOM

Napravo BESS-STATCOM smo vstavili v testni sistem na zbiralko 7, kot prikazuje slika 3.16. To mesto se je izkazalo kot najugodnejše za napravo STATCOM brez hranilnika energije [4]. Predpostavili smo, da se BESS-STATCOM vključi v sistem šele po odpravi motnje. Po odpravi motnje smo regulacijske parametre naprave BESS-STATCOM nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.19.



Slika 3.16: Devetvozliščni sistem IEEE z napravo BESS-STATCOM

Za tripolni kratki stik smo izračunali kritični čas odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku in po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije (2.71) s konstantnima regulacijskima parametroma I_p in β ter energijske funkcije (2.76) s konstantnima regulacijskima parametroma I_p in P_{si} . Za energijsko funkcijo (2.71) so rezultati za različne največje vrednosti I_p in β predstavljeni v tabeli 3.19. Kot je razvidno iz te tabele, so rezultati digitalne simulacije in direktne metode dokaj enaki, za izbrane parametre se CCT razlikujejo največ za korak integracije, tj. za 1 ms.

TABELA 3.19: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-STATCOM S KONSTANTNIMA I_p IN β

		Simulacijska metoda	Direktna metoda
I_p [pu]	β [°]	CCT [ms]	CCT [ms]
0	~	245	245
0.1	45	246	245
0.1	90	247	246
0.1	135	248	247
0.1	180	246	246
0.2	45	246	245
0.2	90	249	248
0.2	135	250	249
0.2	180	248	248
0.3	45	246	245
0.3	90	251	250
0.3	135	252	252
0.3	180	249	249

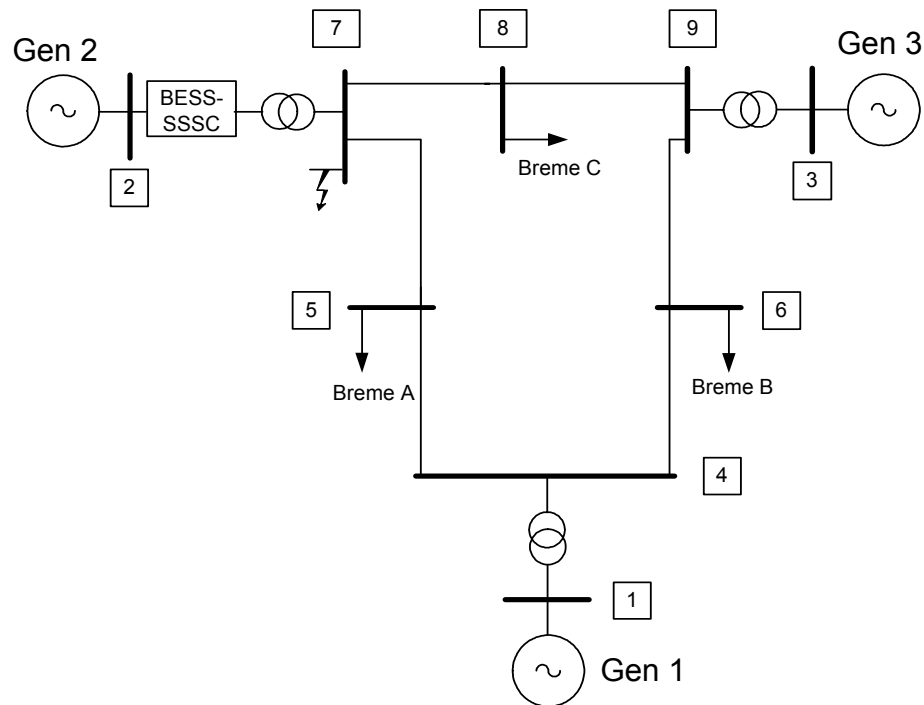
Za energijsko funkcijo (2.76) so rezultati za različne največje vrednosti I_p in P_{si} predstavljeni v tabeli 3.20. Kot je razvidno iz te tabele, se rezultati digitalne simulacije in direktne metode ponovno razlikujejo le za korak integracije. Regulacijsko območje nastavitve moči P_{si} je pri konstantnih vrednostih tega parametra zelo ozko. Vzrok za to je v padcu napetosti priključne sponke naprave BESS-STATCOM, ki se v času prvega nihaja zniža iz približno 1 p.u. na približno 0.1 p.u.

TABELA 3.20: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-STATCOM S KONSTANTNIMA I_P IN P_{SI}

		Simulacijska metoda	Direktna metoda
I_P [pu]	P_{si} [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
0.1	0	246	247
0.1	0.02	246	246
0.1	-0.01	247	247
0.1	-0.02	247	248
0.2	0	248	249
0.2	0.045	247	247
0.2	-0.2	249	250
0.2	-0.045	249	250
0.3	0	250	251
0.3	0.06	248	249
0.3	-0.06	251	252

3.6.4 Naprava BESS-SSSC

Napravo BESS-SSSC smo najprej vstavili v testni sistem pri zbiralki 2 v vod 2-7, kot prikazuje slika 3.17. Predpostavili smo, da se BESS-SSSC vključi v sistem šele po odpravi motnje. Po odpravi motnje smo regulacijske parametre naprave BESS-SSSC nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabeli 3.21. Glede na izbrane parametre U_T in φ_T lahko posamezna naprava BESS-SSSC injicira v omrežje jalovo moč kapacitivne ali induktivne narave in s tem dobimo različne rešitve za CCT. V nadaljevanju navedeni izračuni veljajo za kapacitivno injicirano jalovo moč posamezne naprave BESS-SSSC, ki ugodneje vpliva na povečanje tranzientne stabilnosti.



Slika 3.17: Devetvozliščni sistem IEEE z napravo BESS-SSSC

Za tripolni kratki stik smo izračunali kritični čas odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku in po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije (2.90) s konstantnima regulacijskima parametroma U_T in φ_T ter (2.93) s konstantnima U_T in P_T . Za energijsko funkcijo (2.90) so rezultati za različne največje vrednosti U_T in φ_T predstavljeni v tabeli 3.21. Kot je razvidno iz te tabele, so rezultati digitalne simulacije in direktne metode pri nižjih vrednostih U_T dokaj enaki, pri višjih U_T pa se CCT razlikujejo do 9 ms. Razlog za take razlike lahko pripisujemo razliki med dejansko trajektorijo sistema po odpravi motnje in med trajektorijo okvarjenega sistema, ki jo upošteva metoda PEBS v okviru direktne metode.

TABELA 3.21: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM
Z NAPRAVO BESS-SSSC S KONSTANTNIMA U_T IN φ_T

		Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_T [pu]	φ_T [°]	CCT [ms]	CCT [ms]
0.0	~	234	234
0.1	60	242	242
0.1	90	244	245
0.1	120	244	244
0.2	60	247	249
0.2	90	250	254
0.2	120	250	253
0.3	90	254	262
0.3	105	254	263
0.3	120	254	262

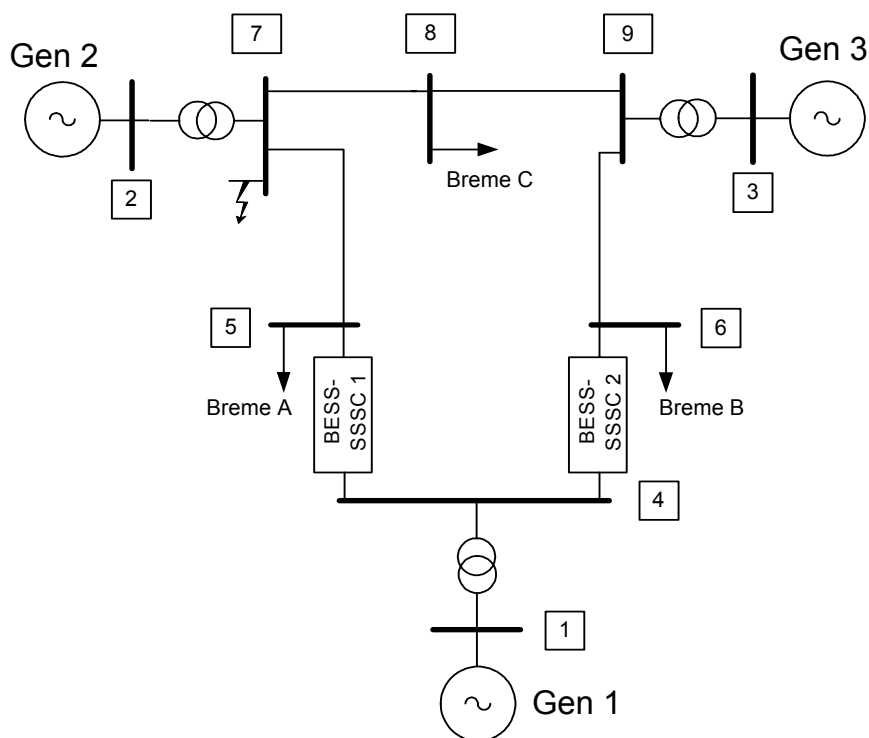
Za energijsko funkcijo (2.93) so rezultati za različne največje vrednosti U_T in P_T predstavljeni v tabeli 3.22. Moč P_T je moč, ki teče iz naprave BESS-SSSC v EES, torej pri negativnem predznaku teče iz EES v napravo BESS-SSSC. Kot je razvidno iz tabele 3.22, so rezultati digitalne simulacije in direktne metode pri nižjih vrednostih U_T dokaj enaki, pri višjih U_T pa se CCT razlikujejo do 3 ms.

TABELA 3.22: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-SSSC S KONSTANTNIMA PARAMETROMA U_T IN P_T

		Simulacijska metoda	Direktna metoda
U_T [pu]	P_T [pu]	CCT [ms]	CCT [ms]
0.0	0	234	234
0.1	0	241	241
0.1	0.2	237	236
0.1	0.1	240	239
0.1	0	241	241
0.1	-0.1	243	243
0.1	-0.2	244	244
0.2	0.4	239	239
0.2	0	247	247
0.2	-0.4	250	252
0.3	0.5	243	244
0.3	0	251	253
0.3	-0.2	253	256
0.3	-0.3	254	257

Naslednji testni sistem vključuje dve napravi BESS-SSSC na zbiralki 4, kot prikazuje slika 3.18. Predpostavili smo, da se napravi vključita v sistem šele po odpravi motnje. Po odpravi motnje smo regulacijske parametre naprav BESS-SSSC nastavili na vrednosti, kot so prikazane v tabelah 3.23 in 3.24.

Za tripolni kratki stik smo izračunali kritični čas odstranitve motnje s pomočjo simulacijske metode korak po koraku in po direktni metodi s pomočjo nove energijske funkcije (2.90) s konstantnimi regulacijskimi parametri U_{T1} , U_{T2} , φ_{T1} in φ_{T2} ter energijske funkcije (2.93) s konstantnim regulacijskimi parametri U_{T1} , U_{T2} , P_{T1} in P_{T2} . Za energijsko funkcijo (2.90) so rezultati za različne največje vrednosti regulacijskih parametrov predstavljeni v tabeli 3.23. Kot je razvidno iz te tabele, so rezultati digitalne simulacije in direktne metode razlikujejo največ za 2 ms.



Slika 3.18: Devetvozliščni sistem IEEE z dvema napravama BESS-SSSC

TABELA 3.23: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z DVAMA NAPRAVAMA BESS-SSSC S KONSTANTNIMA U_T IN φ_T

U_{T1} [pu]	U_{T2} [pu]	φ_{T1} [°]	φ_{T2} [°]	Simulacijska metoda	Direktna metoda
				CCT [ms]	CCT [ms]
0.0	0	~	~	242	244
0.1	0.1	90	-90	244	246
0.1	0.1	0	0	247	247
0.1	0.1	30	-30	247	248
0.2	0.2	0	0	251	250
0.2	0.2	20	-50	251	251
0.3	0.3	0	0	254	253
0.3	0.3	45	-45	255	255

Za energijsko funkcijo (2.93) so rezultati za različne največje vrednosti U_T in P_T predstavljeni v tabeli 3.24. Moč P_T je moč, ki teče iz naprave BESS-SSSC v EES, torej pri negativnem predznaku teče iz EES v napravo BESS-SSSC. Kot je razvidno iz tabele 3.24, se rezultati digitalne simulacije in direktne metode razlikujejo največ za 4 ms.

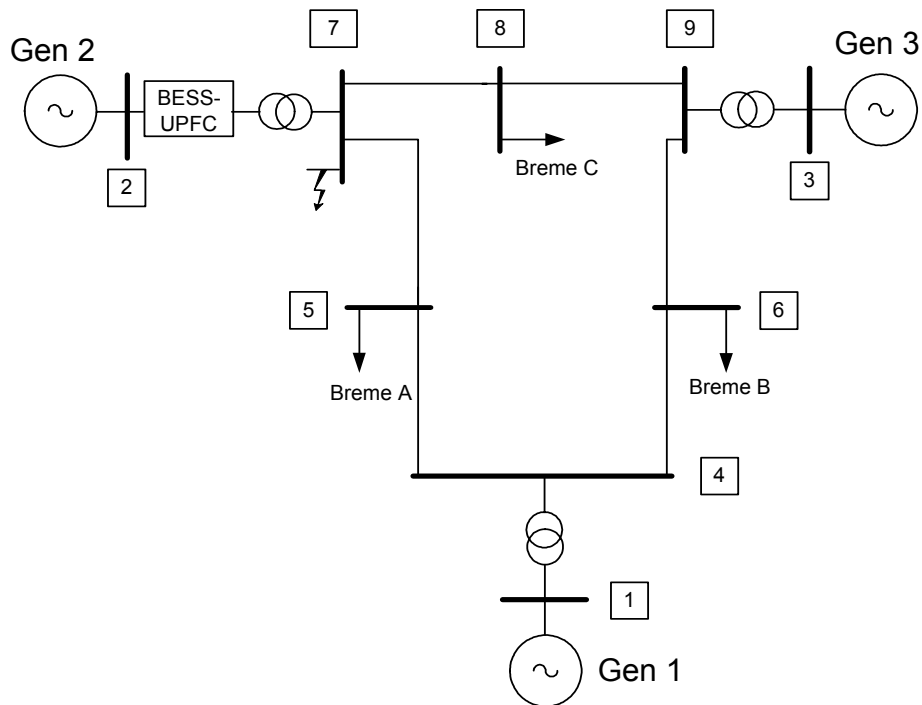
TABELA 3.24: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z DVEMA NAPRAVAMA BESS-SSSC S KONSTANTNIMA U_T IN P_T

U_{T1} [pu]	U_{T2} [pu]	P_{T1} [pu]	P_{T2} [pu]	Simulacijska metoda	Direktna metoda
				CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	0	0	242	244
0.1	0.1	0	0	246	246
0.1	0.1	0.07	-0.07	245	245
0.1	0.1	-0.07	+0.07	246	247
0.1	0.1	-0.07	-0.07	247	249
0.2	0.2	0	0	249	249
0.2	0.2	0.1	-0.1	248	247
0.2	0.2	-0.17	+0.17	249	249
0.2	0.2	-0.17	-0.15	251	254
0.25	0.25	0	0	250	250
0.25	0.25	0.1	-0.1	249	248
0.25	0.25	-0.2	+0.2	250	251
0.25	0.25	-0.2	-0.15	252	256

3.6.5 Naprava BESS-UPFC

Energijski funkciji (2.103) in (2.104) za napravo BESS-UPFC smo uporabili za določitev CCT za devetvozliščni testni sistem IEEE za lokacijo naprave na zbiralki 2 v vodu 2-7, kot prikazuje slika 3.19.

Za energijsko funkcijo (2.103), ki velja pri konstantnem injiciranem paralelnem toku I_{T2} , smo primerjavo CCT, ki smo jih dobili po direktni in simulacijski metodi, predstavili v tabeli 3.25. Rezultati se glede na uporabljeno metodo razlikujejo največ za korak integracije, tj. 1 ms.



Slika 3.19: Devetvozliščni sistem IEEE z napravo BESS-UPFC

TABELA 3.25: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-UPFC S KONSTANTNIM PARAMETROM I_{T2}

U_T [pu]	φ_T [°]	I_q [pu]	I_{T2} [pu]	Simulacijska metoda	Direktna metoda
				CCT [ms]	CCT [ms]
0	0	0	0	235	234
0.1	-60	0	0.1	239	240
0.1	-60	0	-0.1	246	247
0.1	-20	0	0.1	244	244
0.1	-20	0	-0.1	250	250
0.1	45	0	0.1	239	239
0.1	45	0	-0.1	245	244
0.2	-10	0	-0.2	263	263
0.3	0	0	-0.3	272	273
0.3	-50	0.2	-0.2	275	275
0.3	-30	0.2	-0.2	276	276
0.3	0	0.2	-0.2	272	273
0.3	-30	0.3	-0.3	278	279
0.3	-30	0.4	-0.4	281	282

Za energijsko funkcijo (2.104), ki velja pri konstantni injicirani moči P_T , smo primerjavo CCT, ki smo jih dobili po direktni in simulacijski metodi, predstavili v tabeli 3.26. Rezultati se glede na uporabljeno metodo razlikujejo največ za 2 ms.

TABELA 3.26: KRITIČNI ČASI ODSTRANITVE MOTNJE ZA SISTEM Z NAPRAVO BESS-UPFC S KONSTANTNIM PARAMETROM P_T

U_T [pu]	φ_T [°]	I_q [pu]	P_T [pu]	Simulacijska metoda	Direktna metoda
				CCT [ms]	CCT [ms]
0.1	-60	0	-0.1	248	249
0.1	-20	0	0.1	242	242
0.1	-20	0	-0.1	251	252
0.1	45	0	-0.1	246	246
0.2	-10	0	-0.2	266	267
0.3	0	0	-0.3	277	278
0.3	-50	0.2	-0.2	279	280
0.3	-30	0.2	-0.2	279	280
0.3	0	0.2	-0.2	275	277
0.3	-30	0.3	-0.3	284	285

4 Regulacija naprav FACTS za izboljšanje tranzientne stabilnosti

4.1 Regulacijske strategije naprav FACTS

4.1.1 Povzetek do zdaj znanih regulacijskih strategij naprav FACTS

Uporaba naprav FACTS omogoča novo razsežnost pri upravljanju EES. Ker se pri napravah FACTS uporabljajo polprevodniška stikala, lahko z njimi dosežemo hitrost spremembe regulabilnih parametrov reda ene periode izmeničnega toka. Ta lastnost pa omogoča razširitev stabilnega področja obratovanja EES. Ključnega pomena pri izboljšanju stabilnosti EES je seveda ustrezna regulacija naprav FACTS, saj lahko ob nepravilni regulaciji stabilnost EES ne le ne izboljšajo, temveč jo celo poslabšajo. Literatura s področja regulacije naprav FACTS za povečanje stabilnosti je zelo obsežna in to vprašanje obravnava različno. Znani so povratna linearizacija kompenzatorja [23]–[25], metoda z uporabo funkcije Ljapunova, princip maksimuma ali pa energijske funkcije [26], [27], [28], [29], metode z nevronskimi omrežji in mehko logiko (angl. *fuzzy logic*) [30] ter še drugi načini, ki jih tu ne naštevamo.

Energijska funkcija Ljapunova se je izkazala kot primerna za uporabo v regulacijskih strategijah naprav FACTS tako za povečanje tranzientne stabilnosti kot za dušenje nihanj sistema. V [31]–[34] in [4] je opisana uporaba vodilne funkcije Ljapunova (angl. *control Lyapunov function*). Princip vodilne funkcije Ljapunova je, da za energijsko funkcijo EES z napravo FACTS izberemo enako energijsko funkcijo kot za EES brez naprave FACTS, ki zadostuje merilom za funkcijo Ljapunova le ob primerni regulacijski strategiji naprave FACTS, ki naredi časovni odvod energijske funkcije naprave FACTS negativen. Ta regulacijska strategija upošteva lokalne parametre in jo lahko zapišemo analitično, kot je to predstavljeno v [4] za naprave SSSC, STATCOM in prečna transformatorja tipa PAR in QBT.

Energijska funkcija naprav FACTS je odvisna od regulacijske strategije oz. poteka regulabilnih parametrov med trajanjem prehodnega pojava in je za vsako regulacijsko strategijo ni mogoče najti v analitični obliki, temveč ostaja v obliki integrala in je s tem

odvisna od poti. Tega problema smo se lotili tako, da smo energijsko funkcijo izpeljali za konstantne regulabilne parametre, ki omogočajo najmanj zapleteno določanje energijske funkcije. Uporabo tako določene energijske funkcije smo razširili na odsekoma konstantne parametre. Tako se med trajanjem prehodnega pojava regulabilni parametri večkrat skočno spremenijo in je njihov časovni potek stopničaste oblike.

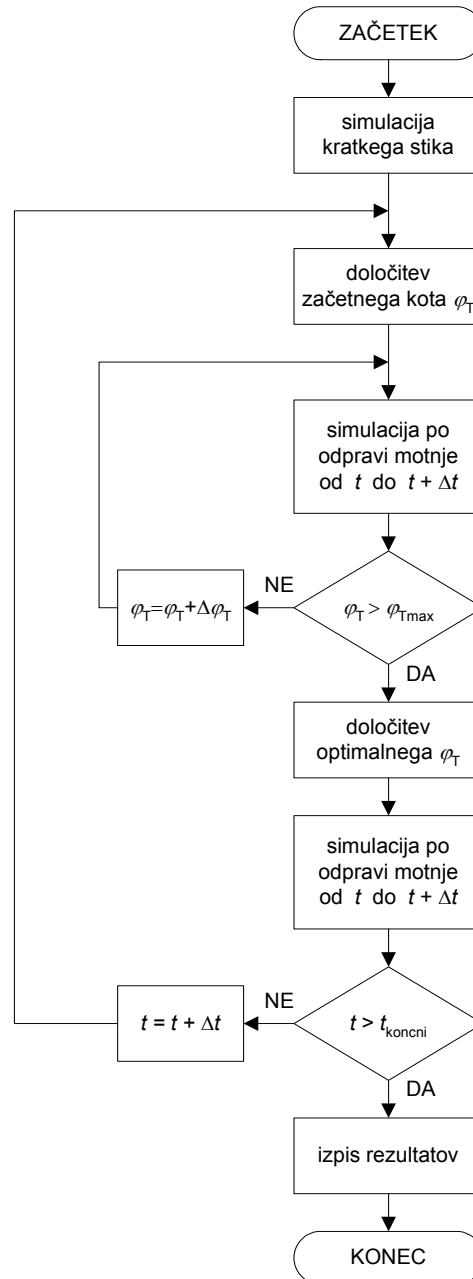
Osnovna zamisel metode iskanja optimalnih parametrov naprave FACTS, predstavljene v tej disertaciji, temelji na čim hitrejšem zmanjševanju vrednosti energijske funkcije V . Princip je izpeljan iz teorije, ki je predstavljena v [7] in uporabljena za regulacijo različnih naprav FACTS, za UPFC v [35], statični var kompenzator v [26] in serijsko kompenzacijo v [36], ter za hranilnik energije s superprevodno tuljavo [27] in za zaviralne upore [37]. Po teoriji [7] mora biti za čim večje izboljšanje tranzientne stabilnosti odvod energijske funkcije čim bolj negativen.

4.1.2 Nova regulacijska strategija naprav FACTS

Pri določanju regulacijskih strategij naprav FACTS na podlagi energijskih funkcij nismo izpeljevali analitične regulacijske funkcije, ker te za sistem z ohranjeno strukturo omrežja brez poenostavitev ne moremo izpeljati. Rešitev, ki daje optimalne regulabilne parametre naprav FACTS, smo poiskali numerično – v prostoru možnih vrednosti regulabilnih parametrov posamezne naprave FACTS smo iskali parametre, pri katerih je sprememba vrednosti energijske funkcije v določenem delčku časa Δt_{const} največja.

Regulacijska strategija temelji na digitalni simulaciji omrežja, ki jo znotraj časovnega intervala Δt_{const} večkrat ponovimo pri različnih konstantnih vrednostih regulacijskih parametrov. Za vsako ponovitev izračunamo vrednost energijske funkcije V na začetku in koncu odseka. Regulacijski parametri, pri katerih je razlika med začetno in končno vrednostjo energijske funkcije V največja, so po tej metodi izbrani kot optimalni parametri za izbran interval Δt_{const} . Nato za ta interval še enkrat izvedemo digitalno simulacijo pri optimalnih regulacijskih parametrih. Celotni postopek ponavljamo v vsakem intervalu Δt_{const} , vse dokler ne dosežemo končnega časa simulacije.

Princip regulacije naprave FACTS po odpravi motnje prikazuje diagram poteka na sliki 4.1. Kot regulacijski parameter je na sliki 4.1 naveden φ_T , tj. kot serijsko injicirane napetosti naprav FACTS, kot so UPFC, IPFC ali BESS-SSSC.



Slika 4.1: Diagram poteka regulacijske strategije naprav FACTS

V nadaljevanju sledi podrobnejši opis posameznih korakov diagrama poteka na sliki 4.1.

1. Simulacijo kratkega stika izvedemo na enak način kot pri simulacijski metodi ugotavljanja CCT, ki je opisana v točkah od 1 do 4 poglavja 3.2.

2. Začetni kot φ_T v prvem intervalu Δt je 0° , kajti v prvem intervalu Δt iščemo optimalni kot φ_T v celotnem območju od 0 do 360° . V naslednjih intervalih območje iskanja optimalnega kota φ_T zmanjšamo na območje okrog optimalnega kota φ_T iz prejšnjega intervala Δt , kajti optimalni kot φ_T se ne spreminja hitro. Posledično začetni kot φ_T v naslednjih intervalih Δt znaša okrog 20° manj kot optimalni kot φ_T iz prejšnjega intervala Δt .
3. Sledi simulacija EES, tj. reševanje sistema diferencialno-algebrskih enačb (1.5), (1.7), (1.8) in (4.1) za časovni interval Δt . Enačba (4.1) je spremenjena (1.6), ki smo ji dodali dušenje:

$$M_i \dot{\omega}_i = P_{mi} - \sum_{j=1}^{m+n} B_{ij} U_i U_j \sin(\phi_{ij}) - D_i \omega_i \quad ; \quad i = 1 \dots m \quad (4.1)$$

pri čemer je D_i konstanta dušenja i -tega generatorja. Koti rotorjev δ na začetku prvega intervala Δt so znani iz simulacije kratkega stika, koti rotorjev δ na začetku naslednjih intervalov pa iz predhodnih intervalov Δt . Glede na kote rotorjev δ na začetku intervala Δt določimo fazorje napetosti v vseh vozliščih, ki se skupaj s temi koti rotorjev uporabijo za začetne pogoje pri reševanju diferencialno-algebrskih enačb. Rešitve teh enačb so koti rotorjev δ na koncu intervala Δt . Glede na te kote rotorjev δ na koncu intervala Δt ponovno določimo fazorje napetosti v vseh vozliščih. Na podlagi fazorjev napetosti v vseh vozliščih EES in izbranih regulacijskih parametrov naprave FACTS (med katere spada tudi φ_T) določimo vrednost energijske funkcije V na začetku in koncu intervala Δt ter njeno razliko shranimo v tabelo, v katero shranjujemo to razliko pri različnih kotih φ_T znotraj intervala Δt . To tabelo pozneje uporabimo za določitev optimalnega kota φ_T .

4. Kot φ_T povečamo za vrednost $\Delta\varphi_T$ in ponovimo korak 3 pri novi vrednosti kota φ_T . Zanko ponavljamo, dokler kot φ_T ne preseže vrednosti φ_{Tmax} . Vrednost kota φ_{Tmax} v prvem intervalu Δt glede na točko 2 znaša 360° , v naslednjih intervalih Δt pa znaša okrog 20° več kot optimalni kot φ_T iz prejšnjega intervala Δt .
5. Pri določitvi optimalnega kota φ_T za trenutni interval Δt uporabimo tabelo iz koraka 3. Ta tabela vsebuje spremembe vrednosti energijske funkcije v intervalu Δt pri različnih kotih φ_T . Kot φ_T , pri katerem je ta sprememba največja, je po tej regulacijski strategiji

- optimalni kot φ_T . Tako smo numerično poiskali največjo vrednost odvoda energijske funkcije V .
6. Simulacijo iz koraka 3 za isti interval Δt ponovimo pri optimalnem kotu φ_T . Koti rotorjev δ na koncu intervala Δt se shranijo in uporabijo za začetne pogoje v naslednjem intervalu Δt in za končni izpis rezultatov.
 7. Čas t povečamo za vrednost Δt in ponovimo korake 2 do 6 pri novih vrednostih kotov rotorjev δ , ki ustrezajo novemu intervalu Δt . Zanko ponavljamo, dokler čas t ne preseže vrednosti t_{koncni} . Vrednost t_{koncni} pri regulaciji naprav FACTS med trajanjem prvega nihaja znaša okrog 1 s, pri regulaciji naprav FACTS za nadaljnja nihanja pa okrog 10 s.
 8. Izpis rezultatov obsega potek kotov in hitrosti rotorjev ter potek optimalnega kota φ_T . Iz poteka kotov rotorjev δ lahko razberemo, ali EES pri izbranem času odstranitve motnje ohrani stabilnost ali ne.

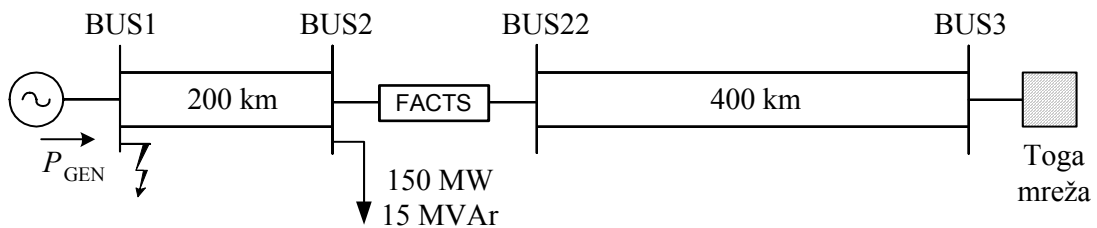
Ker je energijska funkcija EES odvisna od parametrov celotnega omrežja, bi jih bilo pri fizični izvedbi tu predstavljene regulacijske strategije treba meriti in podatke sproti prenašati do regulirane naprave FACTS. Naprave za daljinsko merjenje parametrov omrežja obstajajo kot enote za merjenje fazorjev (angl. *phasor measurement unit*). Pri tem se ne moremo izogniti časovnim zaostankom. Meritve temeljijo na sistemu GPS (angl. *global positioning system*) in pri razdalji prenosa do 2000 km ti zaostanki naj ne bi bili večji od 30 ms, kar je zanemarljivo glede na frekvenco nihanj moči v EES, ki je reda velikosti 1 Hz [38]–[40].

Regulacijsko strategijo smo uporabili za izboljšanje stabilnosti sistema v prvem nihaju ter za dušenje nadaljnjega nihanja. Pri rotorskih kotih blizu meje stabilnega območja moramo paziti, da z napravo FACTS ne postavimo obratovalne točke sistema zunaj stabilnega območja. Regulacijsko strategijo smo uporabili pri napravah UPFC in IPFC, ki sta s stališča regulacije najkompleksnejši.

4.2 Izboljšanje stabilnosti prvega nihaja

4.2.1 Regulacija naprave UPFC

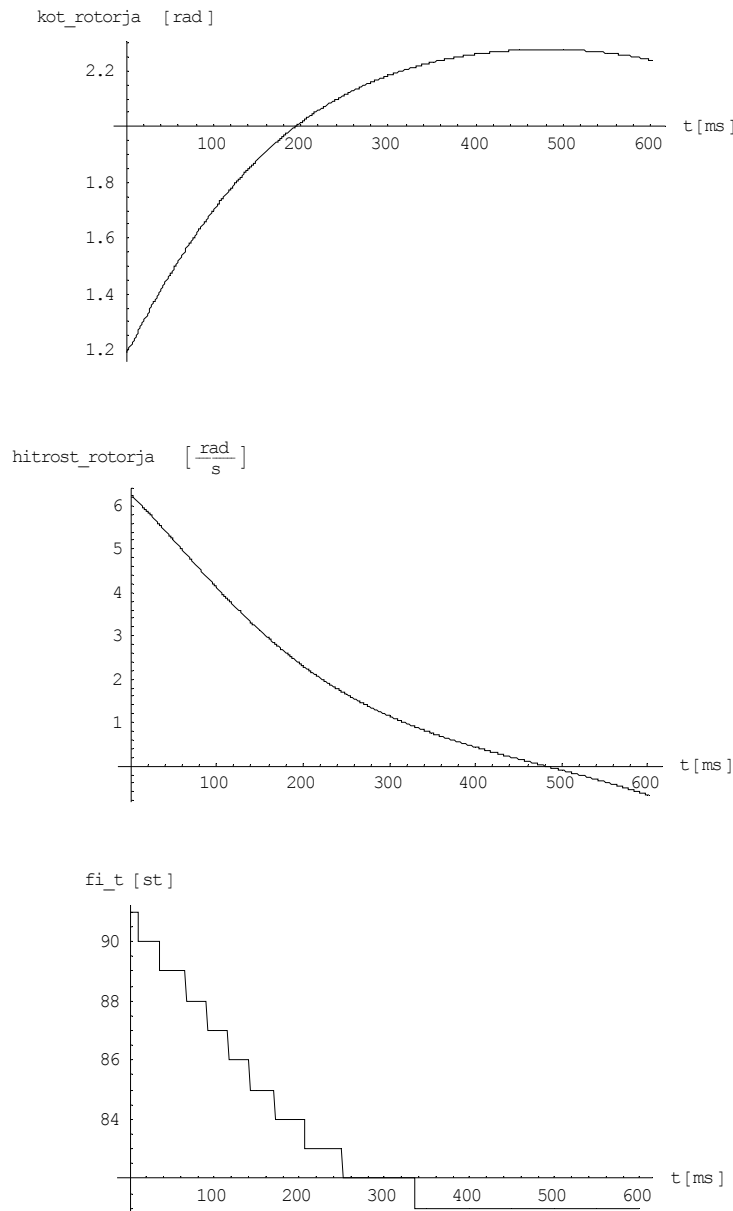
Najprej smo v prejšnjem podpoglavju predstavljeno regulacijsko strategijo uporabili za izboljšanje stabilnosti prvega nihaja z napravo UPFC v sistemu SMIB. UPFC je v sistem vključen med zbiralki BUS2 in BUS22, kot je prikazano na sliki 4.2.



Slika 4.2: Longitudinalni testni sistem generator – toga mreža z napravo UPFC

Regulacijska strategija numerično določi optimalni kot φ_T injicirane serijske napetosti, medtem ko sta velikost napetosti U_T in paralelni tok I_q konstantna. Časovni odsek Δt_{const} , v okviru katerega iščemo optimalni konstantni kot φ_T , znaša 5 ms, kot φ_T pa iščemo v korakih po 1° . S ponavljanjem digitalne simulacije omrežja smo ugotovili kritični čas odstranitve motnje t_{cr} , ki pri $U_T = 0.1$ in $I_q = 0$ znaša 144 ms. Potek kota in hitrosti rotorja po odstranitvi motnje ter optimalni kot φ_T naprave UPFC prikazuje slika 4.3.

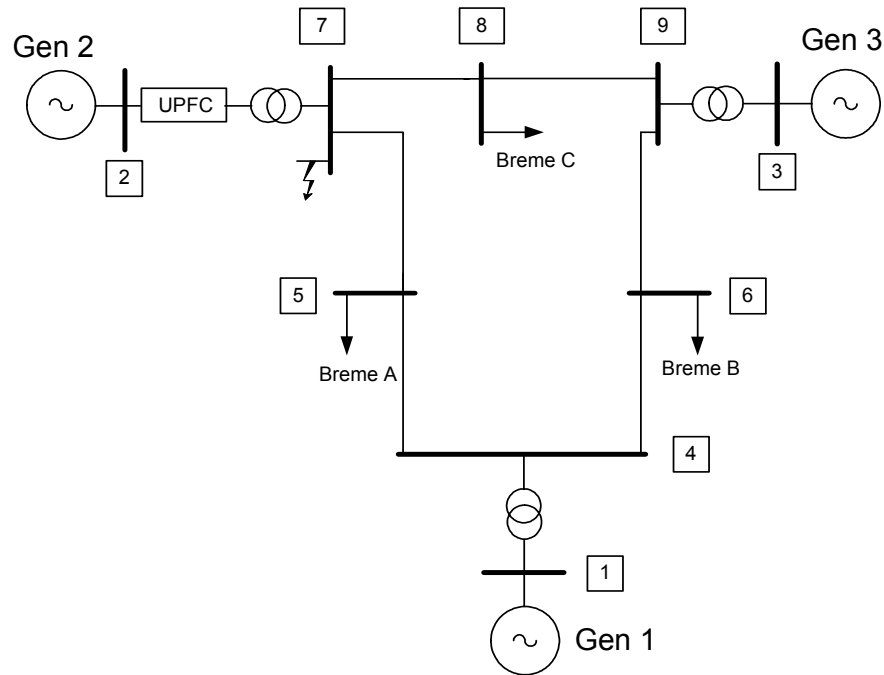
Kot je razvidno iz poteka kota φ_T , se ta med trajanjem prvega nihaja spreminja zelo malo. Enak kritični čas odstranitve motnje t_{cr} dobimo pri konstantnem kotu $\varphi_T = 85^\circ$, kakor je prikazano v tabeli 3.2. Kljub temu pa je treba poudariti, da je optimalni kot φ_T ugotovljen v eni sami simulaciji in ne s poskušanjem, kot je to narejeno za konstante kote φ_T v poglavju 3.5.1.



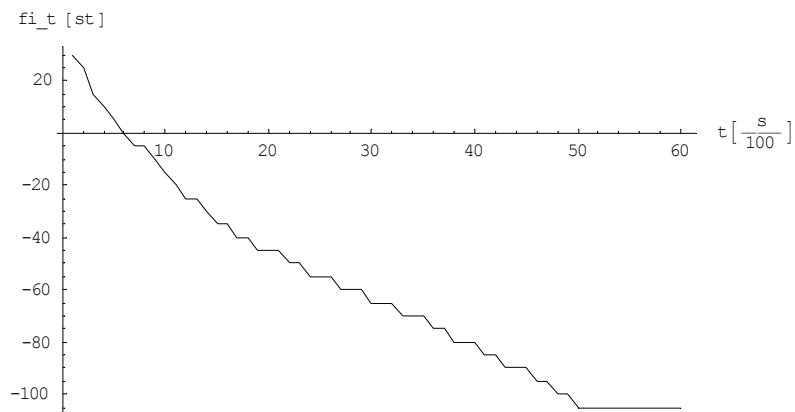
Slika 4.3: Potek kota in hitrosti rotorja ter kota φ_T naprave UPFC v sistemu SMIB

Naslednji primer uporabe regulacijske strategije se nanaša na napravo UPFC v devetvozliščnem sistemu IEEE, ki je priključena med zbiralki 2 in 7 glede na sliko 4.4. Podobno kot v sistemu SMIB regulacijska strategija numerično določi optimalni kot φ_T injicirane serijske napetosti, medtem ko sta velikost napetosti U_T in paralelni tok I_q konstantna. Časovni odsek Δt_{const} , v okviru katerega iščemo optimalni konstantni kot φ_T , znaša 10 ms, kot φ_T pa iščemo v korakih po 5° . Nadaljnje zmanjšanje časovnega odseka Δt_{const} ali zmanjšanje koraka kota φ_T ne vpliva na izračun kritičnega časa odstranitve motnje t_{cr} , podaljšuje pa čas izvedbe simulacije, ki za obravnavani sistem znaša približno 30 sekund. S

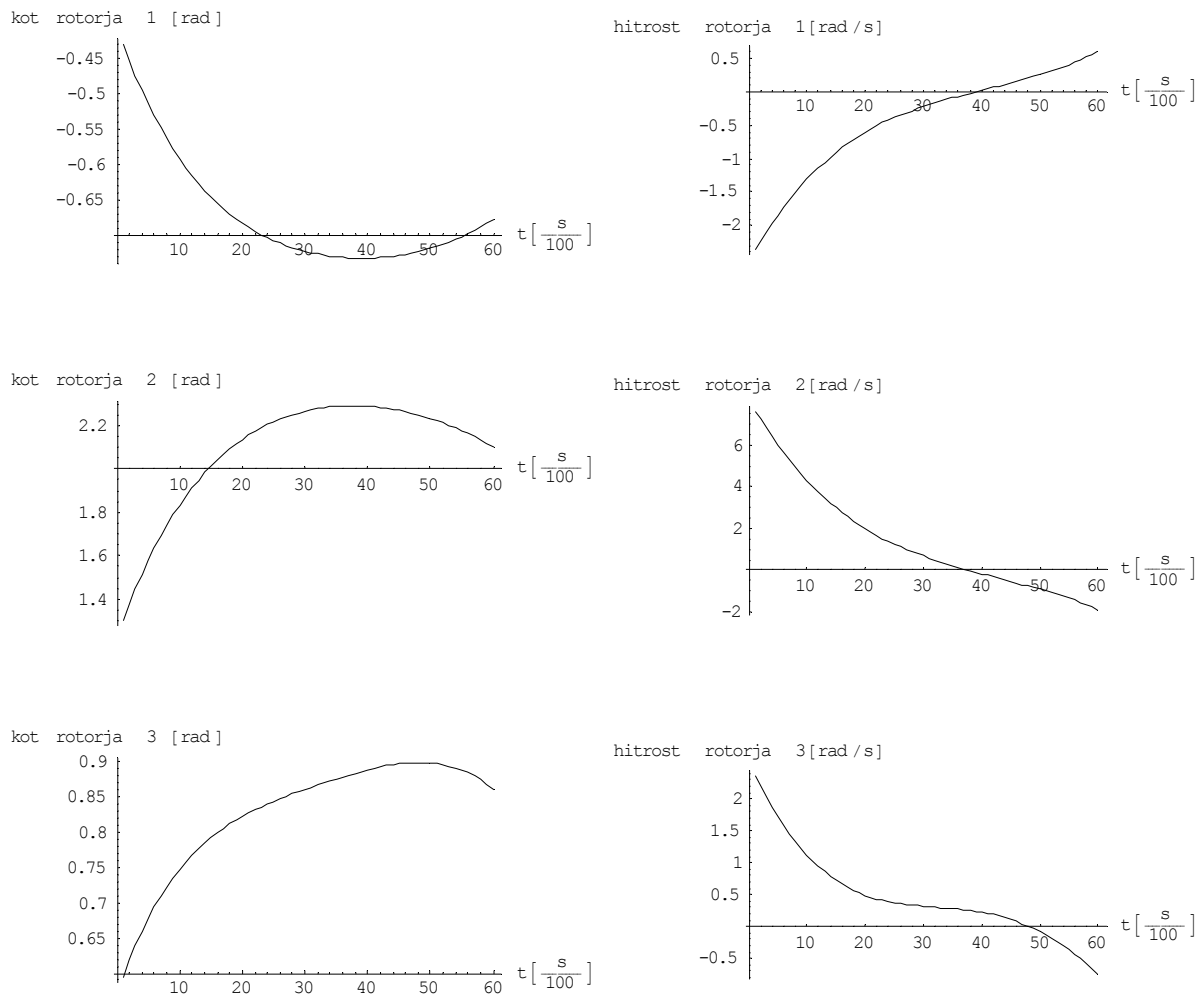
ponavljanjem digitalne simulacije omrežja smo ugotovili kritični čas odstranitve motnje t_{cr} , ki pri $U_T = 0.1$ in $I_q = 0$ znaša 249 ms. Potek optimalnega kota φ_T naprave UPFC ter kotov in hitrosti rotorjev po odstranitvi motnje prikazujeta sliki 4.5 in 4.6.



Slika 4.4: Devetvozliščni sistem IEEE z eno napravo UPFC



Slika 4.5: Potek optimalnega kot φ_T naprave UPFC v devetvozliščnem sistemu IEEE.

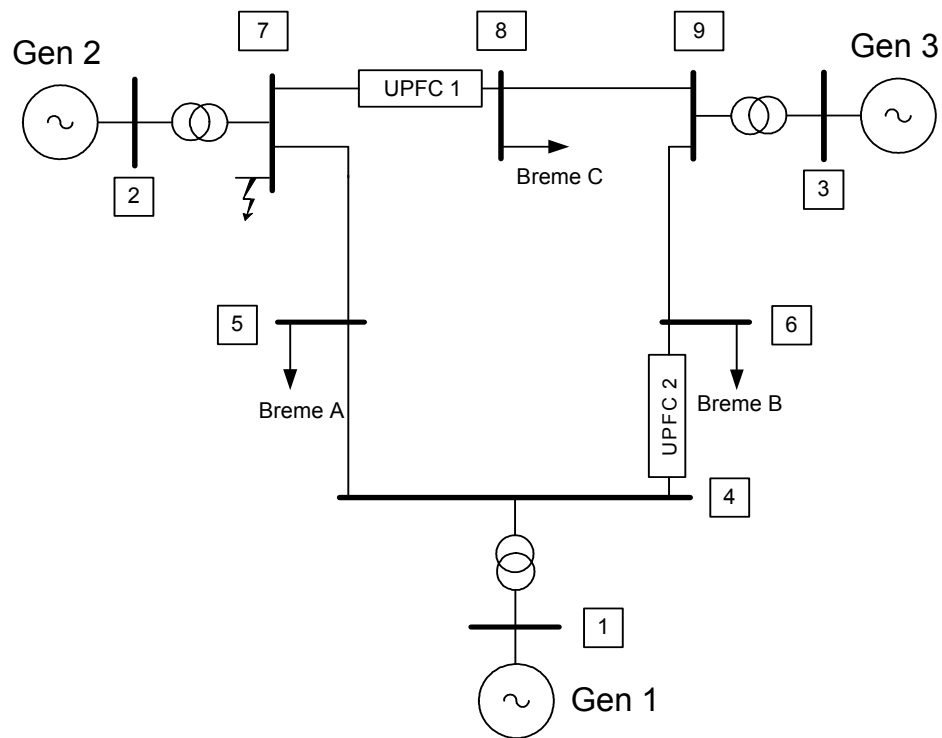


Slika 4.6: Potek kotov in hitrosti rotorjev devetvozliščnega sistema IEEE z eno napravo UPFC

V 0.5 s po odstranitvi motnje smo blokirali kot φ_T , sicer bi se ta po regulacijski strategiji zaradi spremembe smeri gibanja rotorjev spremenil tako, da bi se trajektorija sistema znašla zunaj stabilnega območja obratovanja.

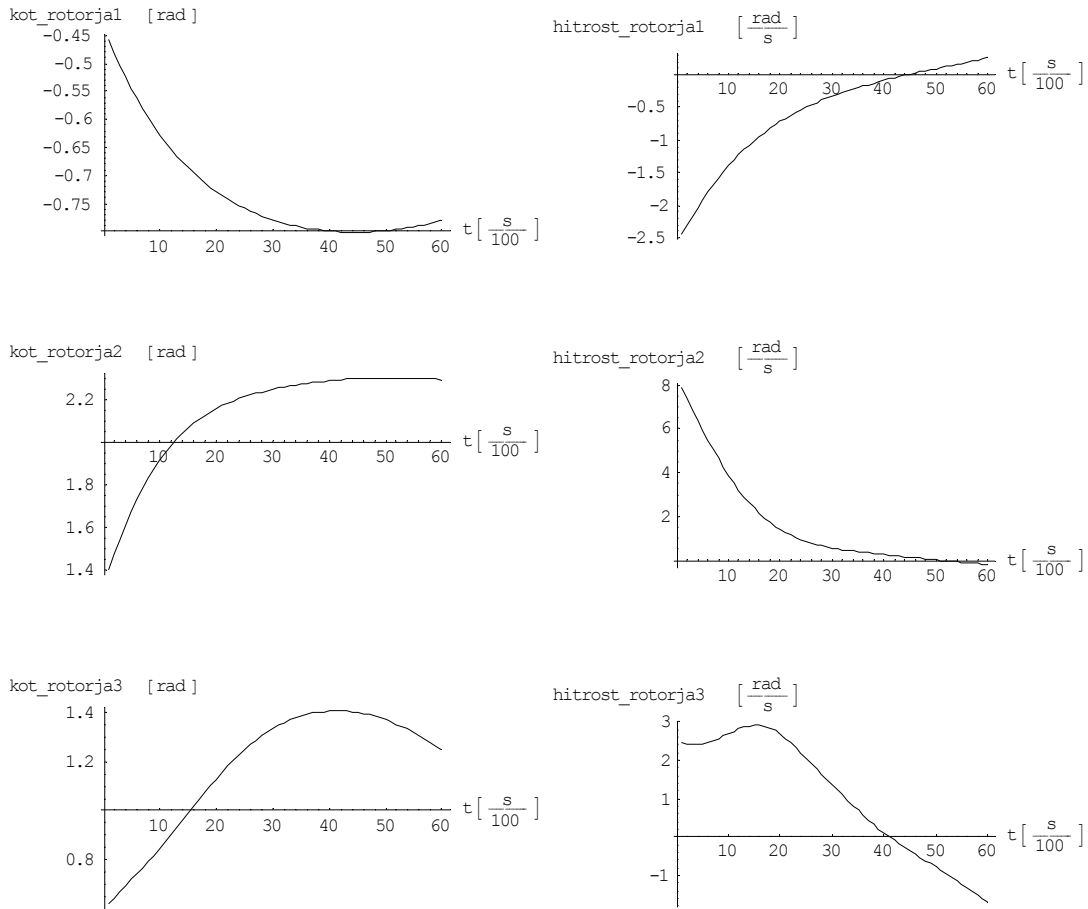
Čeprav se kot φ_T med trajanjem prvega nihaja spremeni za več kot 90° , se kritični čas odstranitve motnje v primerjavi s konstantno vrednostjo $\varphi_T = -10^\circ$ po tabeli 3.13 poveča le za 1 ms. Seveda je spet treba poudariti, da je optimalni kot φ_T ugotovljen v eni sami simulaciji in ne s poskušanjem, kot je to narejeno za konstante kote φ_T v poglavju 3.6.1.

Naslednji primer uporabe regulacijske strategije se nanaša na dve napravi UPFC v devetvozliščnem sistemu IEEE, ki sta priključeni na zbiralki 4 in 8 na način, kot prikazuje slika 4.7.

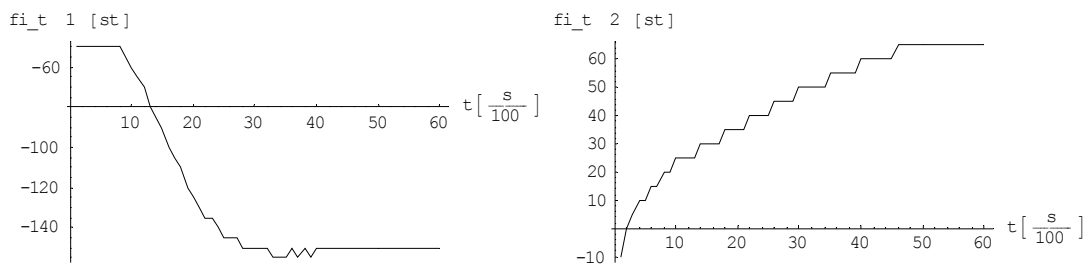


Slika 4.7: Devetvozliščni sistem IEEE z dvema napravama UPFC na zbiralkah 4 in 8

Regulacijska strategija numerično določi optimalna kota φ_{T1} in φ_{T2} , medtem ko so velikosti napetosti U_{T1} in U_{T2} ter paralelna toka I_{q1} in I_{q2} konstantni. Časovni odsek Δt_{const} , v okviru katerega iščemo optimalna konstantna kota φ_{T1} in φ_{T2} , znaša 10 ms, posamezna kota pa iščemo v korakih po 5° . S ponavljanjem digitalne simulacije omrežja smo ugotovili kritični čas odstranitve motnje t_{cr} , ki pri $U_{T1} = U_{T2} = 0.2$ in $I_{q1} = I_{q2} = 0.1$ znaša 259 ms. Potek kotov in hitrosti rotorjev po odstranitvi motnje ter optimalna kota φ_{T1} in φ_{T2} prikazujeta sliki 4.8 in 4.9.



Slika 4.8: Potek kotov in hitrosti rotorjev devetvozliščnega sistema IEEE z dvema napravama UPFC

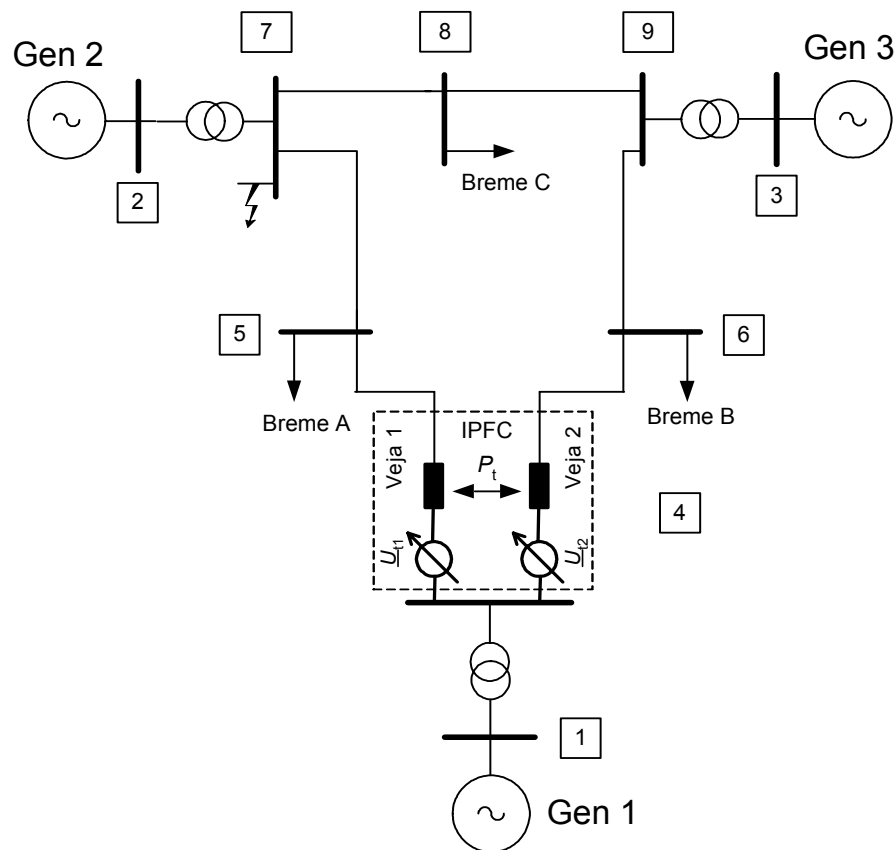
Slika 4.9: Potek optimalnega kot φ_{T1} in φ_{T2} dveh naprav UPFC v devetvozliščnem sistemu IEEE.

V 0.5 s po odstranitvi motnje smo blokirali kot φ_T , sicer bi se ta po regulacijski strategiji zaradi spremembe smeri gibanja rotorjev spremenil tako, da bi se trajektorija sistema znašla zunaj stabilnega območja obratovanja. Kritični čas odstranitve motnje se v primerjavi s konstantnima vrednostma $\varphi_{T1} = 280^\circ$, $\varphi_{T2} = 20^\circ$ po tabeli 3.16 poveča le za 2 ms. Ponovno je

treba poudariti, da je optimalni kot φ_T ugotovljen v eni sami simulaciji in ne s poskušanjem, kot je to narejeno za konstanta kota φ_{T1} in φ_{T2} v poglavju 3.6.1.

4.2.2 Regulacija naprave IPFC

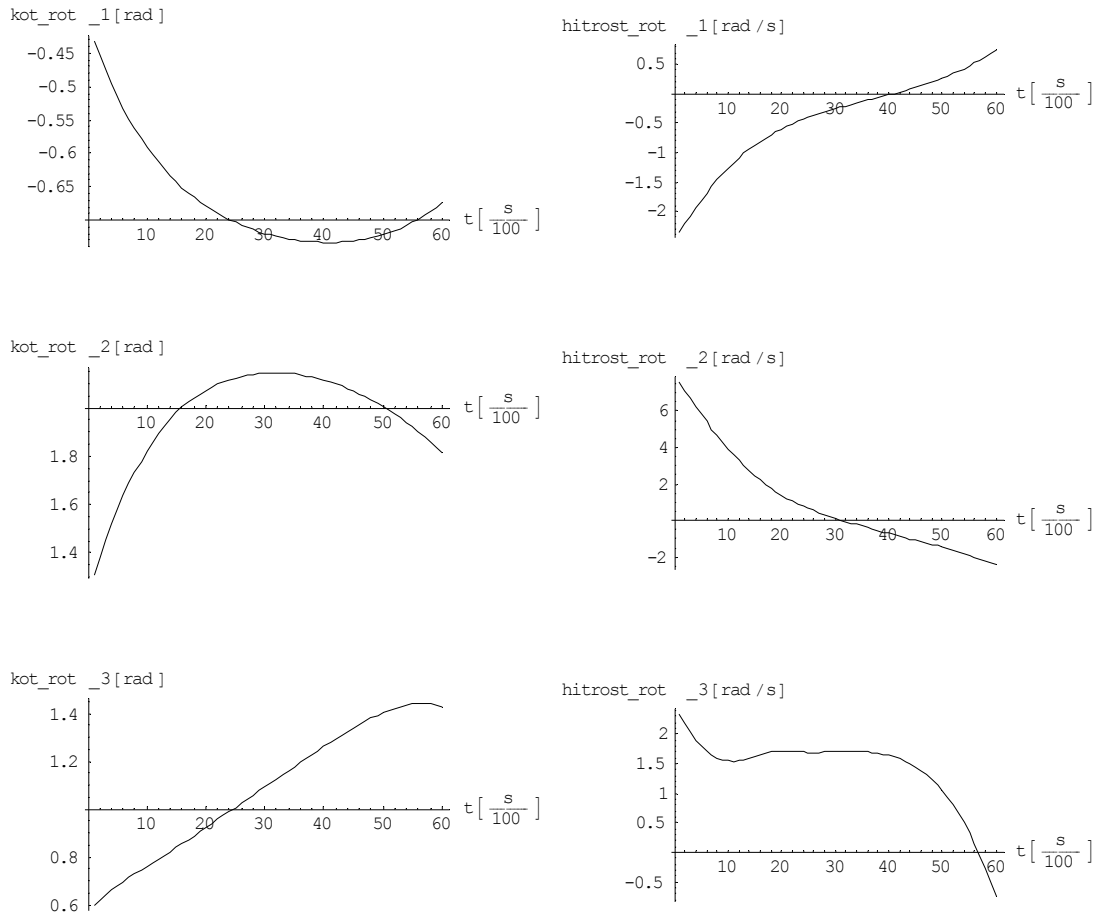
Podobno kot pri napravi UPFC smo po regulacijski strategiji krmilili napravo IPFC v devetvozliščnem sistemu IEEE. IPFC je lociran na zbiralki 4 tako, kot je prikazano na sliki 4.10.



Slika 4.10: Devetvozliščni sistem IEEE z napravo IPFC

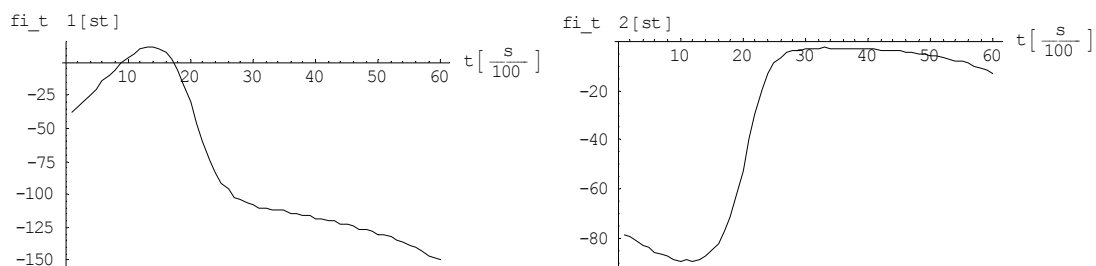
Regulacijska strategija numerično določi optimalni kot φ_{T1} , velikosti napetosti U_{T1} in U_{T2} sta konstantni, kot φ_{T2} pa je odvisen od delovne moči P_t , ki teče med vejama naprave IPFC. Časovni odsek Δt_{const} , v okviru katerega iščemo optimalni konstantni kot φ_{T1} , znaša 10 ms, kot pa iščemo v korakih po 2° . S ponavljanjem digitalne simulacije omrežja smo ugotovili kritični čas odstranitve motnje t_{cr} , ki pri $U_{T1} = 0.1$ in $U_{T2} = 0.2$ znaša 249 ms. Potek kotov in hitrosti

rotorjev po odstranitvi motnje, optimalni kot φ_{T1} in odvisni kot φ_{T2} ter injicirane delovne in jalove moči v posameznih vejah naprave IPFC prikazujejo slike 4.11, 4.12 in 4.13.

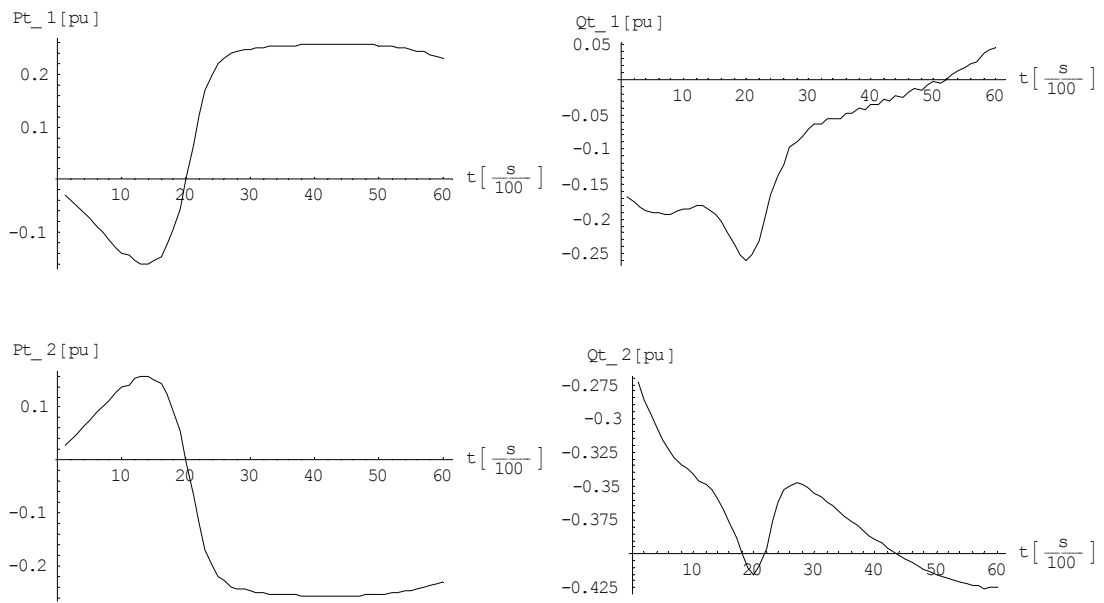


Slika 4.11: Potek kotov in hitrosti rotorjev devetvozliščnega sistema IEEE z napravo IPFC

Kritični čas odstranitve motnje se v primerjavi s konstantnima vrednostma $\varphi_{T1} = 280^\circ$, $\varphi_{T2} = 20^\circ$ po tabeli 3.17 poveča le za 2 ms.



Slika 4.12: Potek optimalnega kot φ_{T1} in odvisnega kota φ_{T2} naprave IPFC.



Slika 4.13: Potek injicirane delovne in jalove moči v posameznih vejah naprave IPFC

Pozitivna vrednost injicirane delovne moči pomeni injiciranje moči v vejo. S slike 4.13 je razvidno, da se injicirane delovne in jalove moči v obdobju prvega nihaja precej spreminjajo. V času do 200 ms po odpravi motnje teče delovna moč iz veje 1 v vejo 2, po tem času pa teče moč iz veje 2 v vejo 1.

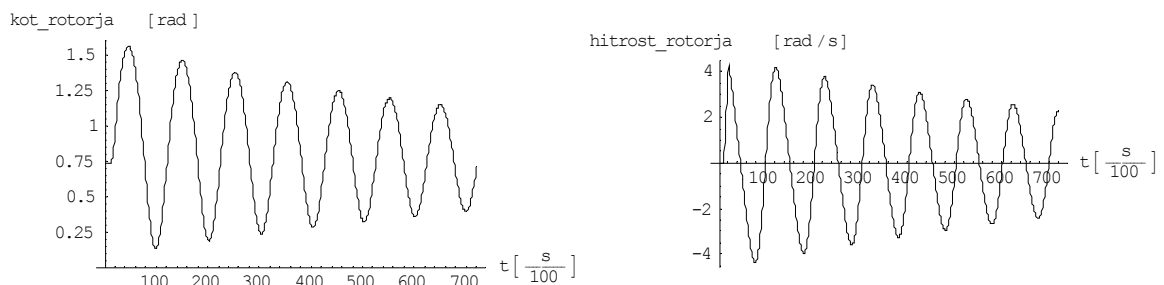
4.3 Dušenje nihanj

Regulacijsko strategijo, predstavljeno v poglavju 4.1, enako kot za izboljšanje stabilnosti prvega nihaja uporabimo tudi za dušenje nadaljnjih nihanj rotorskih kotov in s tem pretokov moči v EES. Nihajne enačbe sistema nadgradimo z dušenjem generatorja. Dušenje sistema smo hoteli doseči s čim manjšo injicirano serijsko napetostjo naprave UPFC oz. IPFC, ki smo jo po nekaj nihajih eksponencialno zmanjševali proti vrednosti 0. Topologija sistema po motnji, ki jo predstavlja tripolni kratki stik, ostane enaka topologiji pred motnjo, zato je stabilna ravnovesna točka sistema po odpravi motnje enaka stabilni ravnovesni točki sistema pred motnjo. Posledično se rotorski koti iznihajo na enako vrednost, kot jo imajo pred kratkim stikom. Rezultati so predstavljeni v naslednjih podpoglavjih.

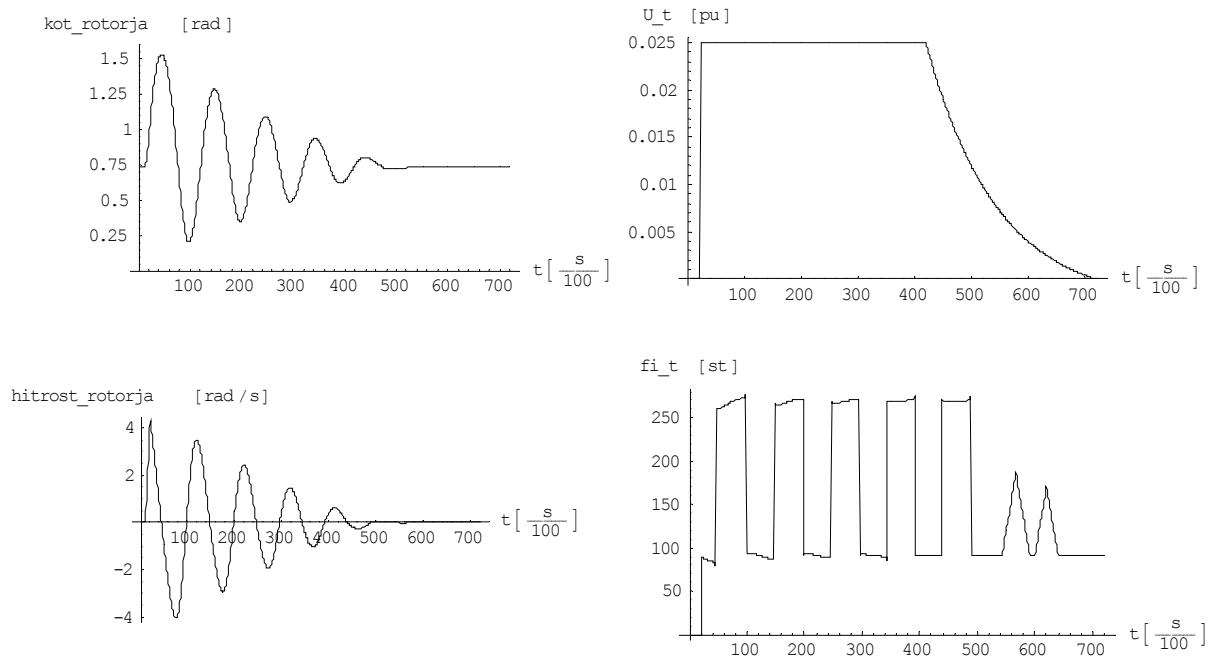
4.3.1 Naprava UPFC

Najprej smo napravo UPFC uporabili za dušenje nihanj v sistemu SMIB. UPFC je umeščen v sistem enako kot pri izboljševanju stabilnosti prvega nihaja, kot prikazuje slika 4.2. Motnjo v sistemu pomeni tripolni kratki stik na enem od vodov v bližini zbiralke 2 in traja 100 ms. Paralelni jalovi tok I_q smo nastavili na vrednost 0.

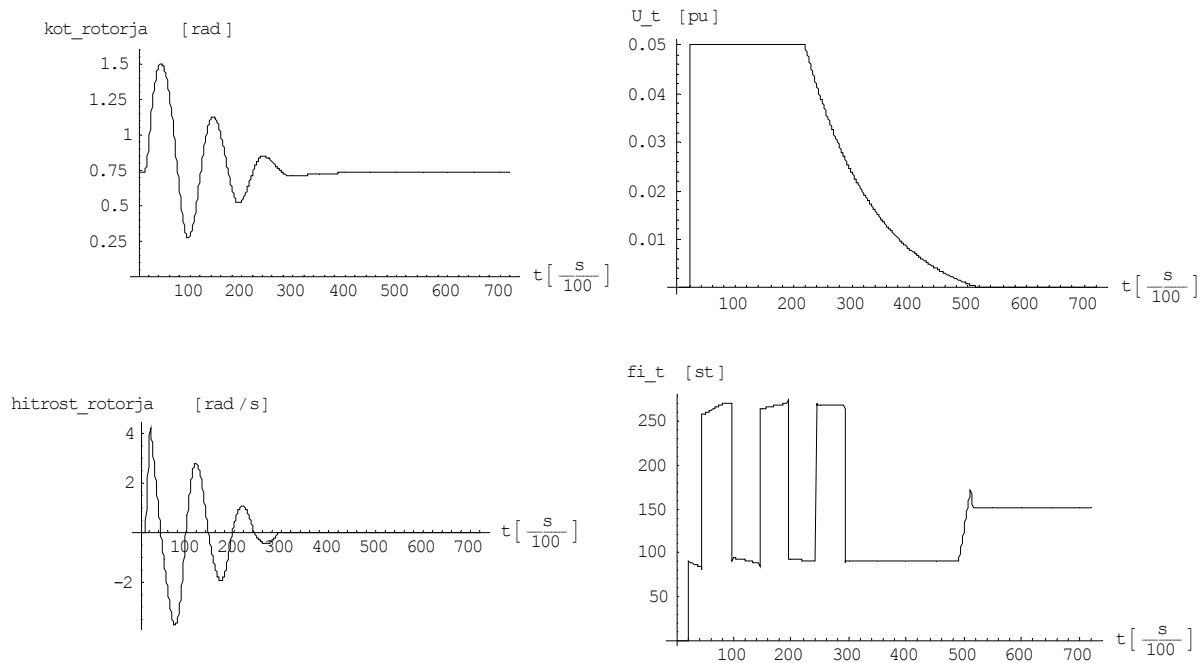
Za sistem SMIB smo izvedli več simulacij dušenja nihanja. Potek kota in hitrosti rotorja ter potek amplitude in kota injicirane napetosti pri različnih vrednostih amplitude serijsko injicirane napetosti U_T prikazujejo slike 4.14 do 4.18.



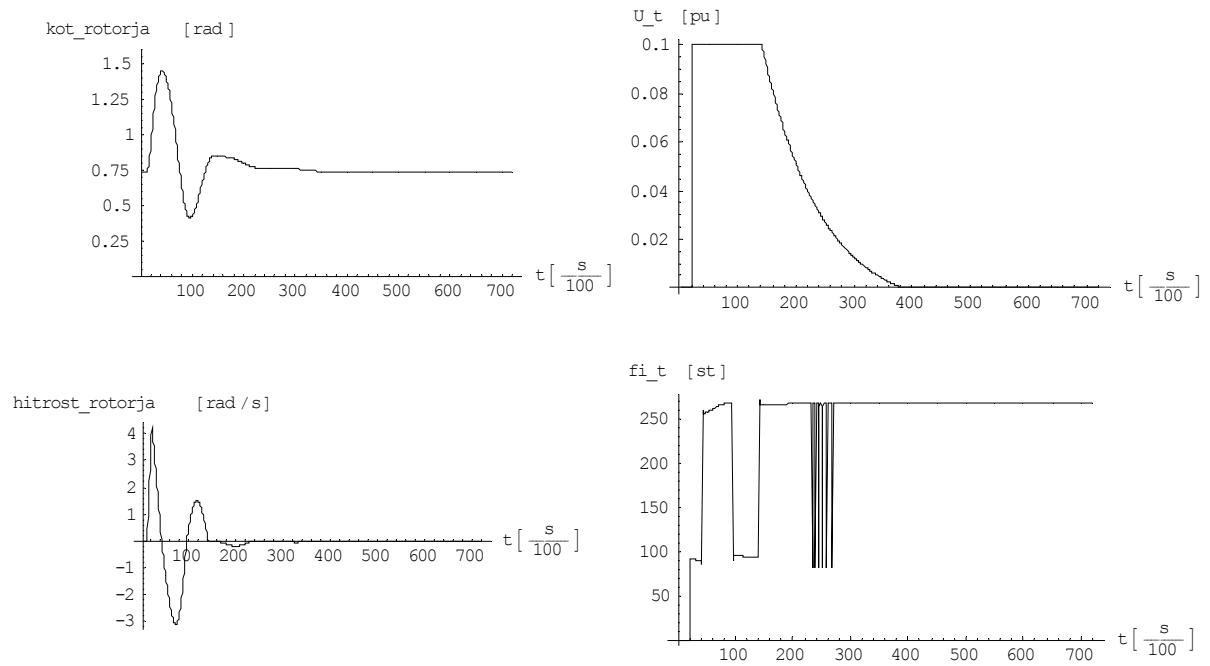
Slika 4.14: Potek kota in hitrosti rotorja pri $U_T = 0$



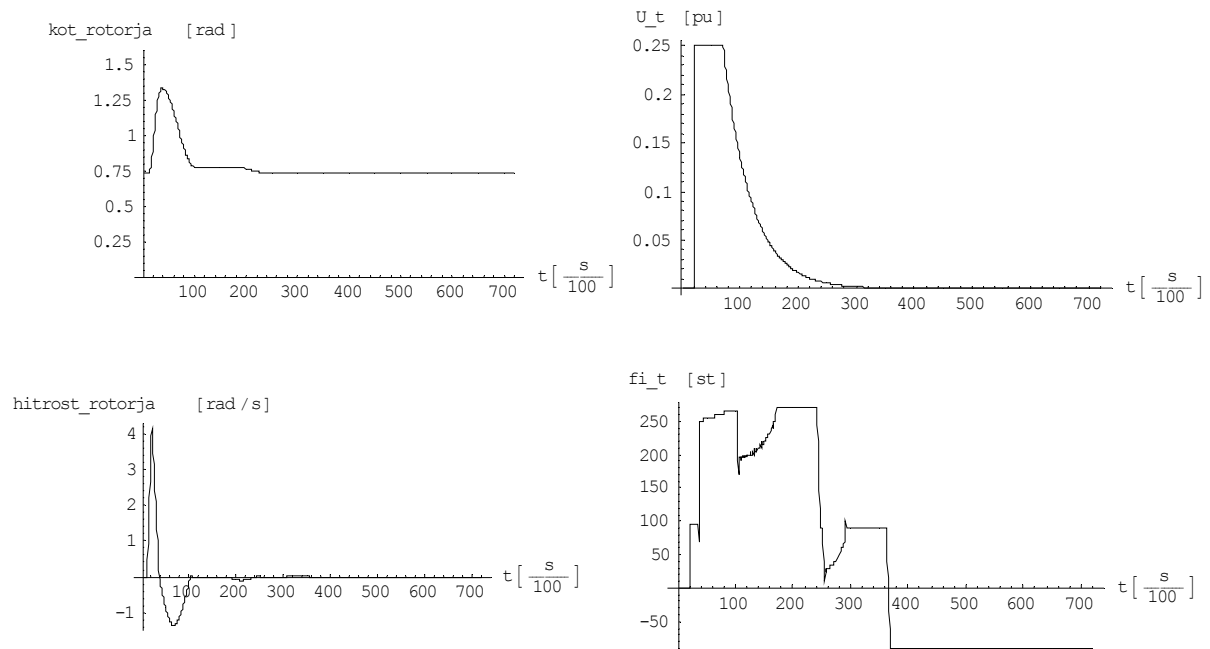
Slika 4.15: Potek kota in hitrosti rotorja ter velikosti in kota serijsko injicirane napetosti \underline{U}_T pri največji možni vrednosti $U_T = 0.025$



Slika 4.16: Potek kota in hitrosti rotorja ter velikosti in kota serijsko injicirane napetosti \underline{U}_T pri največji možni vrednosti $U_T = 0.05$

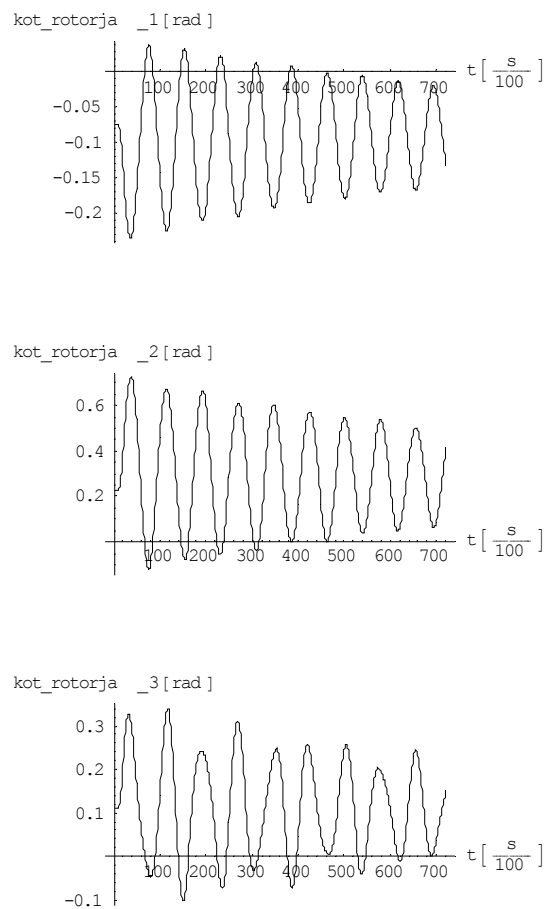


Slika 4.17: Potek kota in hitrosti rotorja ter velikosti in kota serijsko injicirane napetosti \underline{U}_T pri največji možni vrednosti $U_T = 0.1$



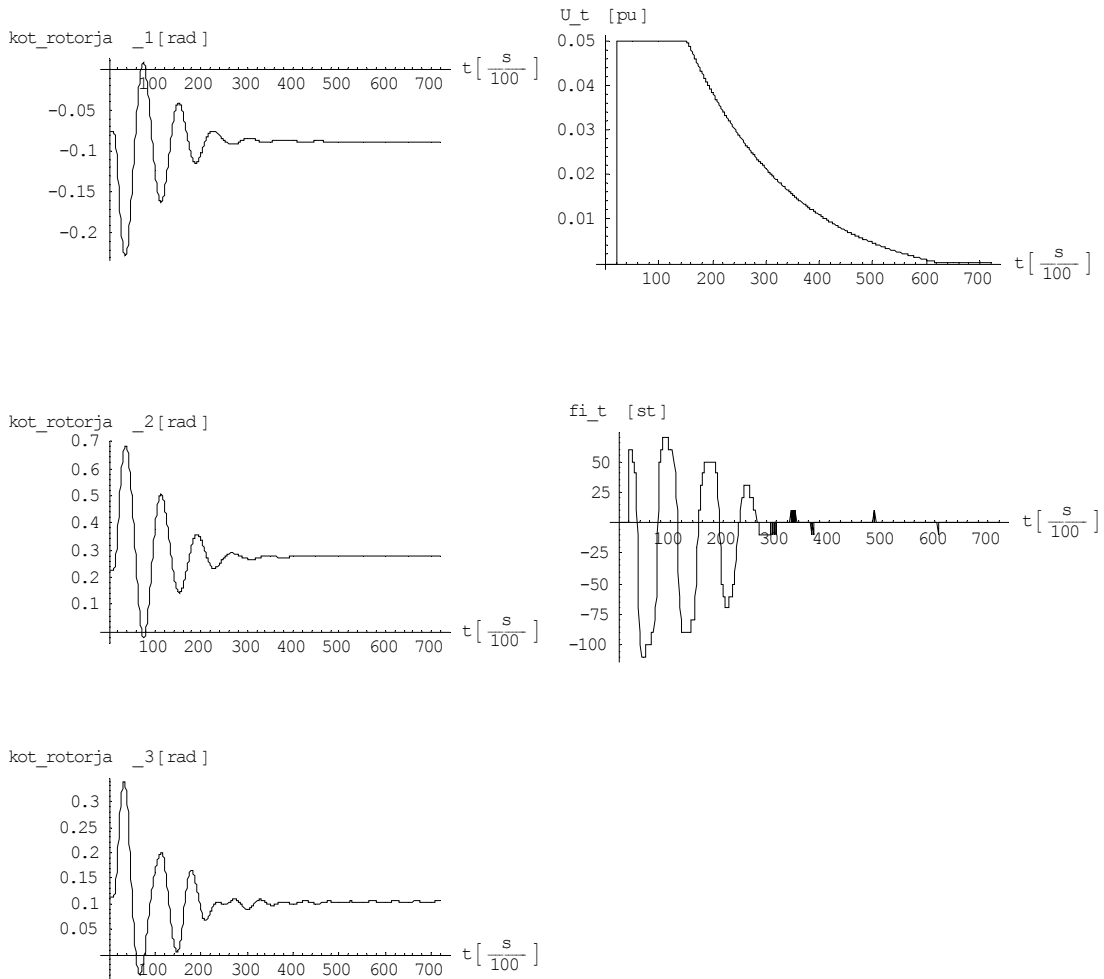
Slika 4.18: Potek kota in hitrosti rotorja ter velikosti in kota serijsko injicirane napetosti \underline{U}_T pri največji možni vrednosti $U_T = 0.25$

Naslednji primer uporabe opisane regulacijske strategije je regulacija naprave UPFC v devetvozliščnem sistemu IEEE. UPFC je v sistem vključen tako, kot je prikazano na sliki 4.4. Motnjo v sistemu pomeni tripolni kratki stik na enem od vodov v bližini zbiralke 7 in traja 100 ms. Potek kotov generatorjev brez dušenja z napravo UPFC (UPFC je vključen v omrežje, serijska injicirana napetost \underline{U}_T in paralelni jalovi tok I_q sta enaka 0) prikazuje slika 4.19.



Slika 4.19: Potek kotov rotorjev pri velikosti injicirane serijske napetosti $U_T = 0$

Simulacijo smo izvedli za $U_T = 0.05$. Paralelni jalovi tok I_q smo nastavili na vrednost 0. Rezultate digitalne simulacije prikazuje slika 4.20. Pri večjih vrednostih U_T dušenja ne izboljšamo – izboljša se dušenje generatorjev 1 in 2, medtem ko se dušenje generatorja 3 poslabša.

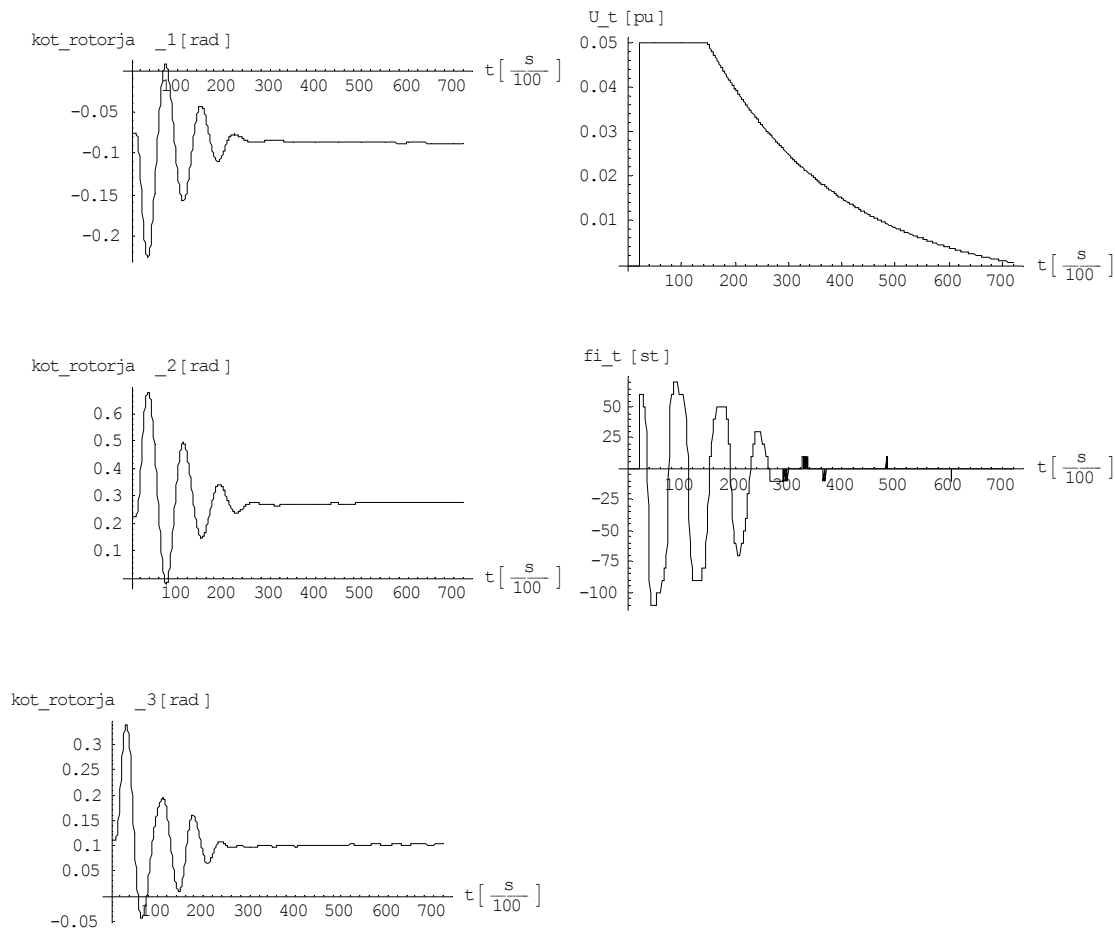


Slika 4.20: Potek kotov rotorjev ter velikosti in kota serijsko injicirane napetosti \underline{U}_T pri največji možni vrednosti $U_T = 0.05$

Z enakim testnim sistemom kot v prejšnjem primeru smo na enak način poleg iskanja optimalnega kota φ_T izvedli iskanje optimalne amplitude serijsko injicirane napetosti \underline{U}_T . Po pričakovanju glede na [21] je amplituda napetosti med trajanjem prvega nihaja in pri dušenju nadaljnjih nihanj vedno konstantna, tj. maksimalna glede na nazivno moč naprave. Rezultat digitalne simulacije je enak kot v primeru brez iskanja optimalne amplitude napetosti U_T in je prikazan na sliki 4.20. Če bi ta primer posplošili in bi regulacijo serijske veje naprave UPFC primerjali z regulacijsko strategijo naprave SSSC, razvite s pomočjo vodilne funkcije Ljapunova v [4] kot bang-bang strategija, bi lahko ugotovili, da je regulacija serijske veje naprave UPFC zelo podobna bang-bang strategiji, le da fazorja napetosti \underline{U}_T ne spreminjamo z amplitudo U_T , temveč s kotom φ_T .

V naslednji simulaciji smo poleg kota injicirane serijske napetosti po na novo razviti regulacijski strategiji optimirali tudi vrednost paralelnega jalovega toka I_q . Potek kotov

rotorjev ter potek velikosti in kota serijsko injicirane napetosti \underline{U}_T pri največji možni vrednosti $U_T = 0.05$ prikazuje slika 4.21.



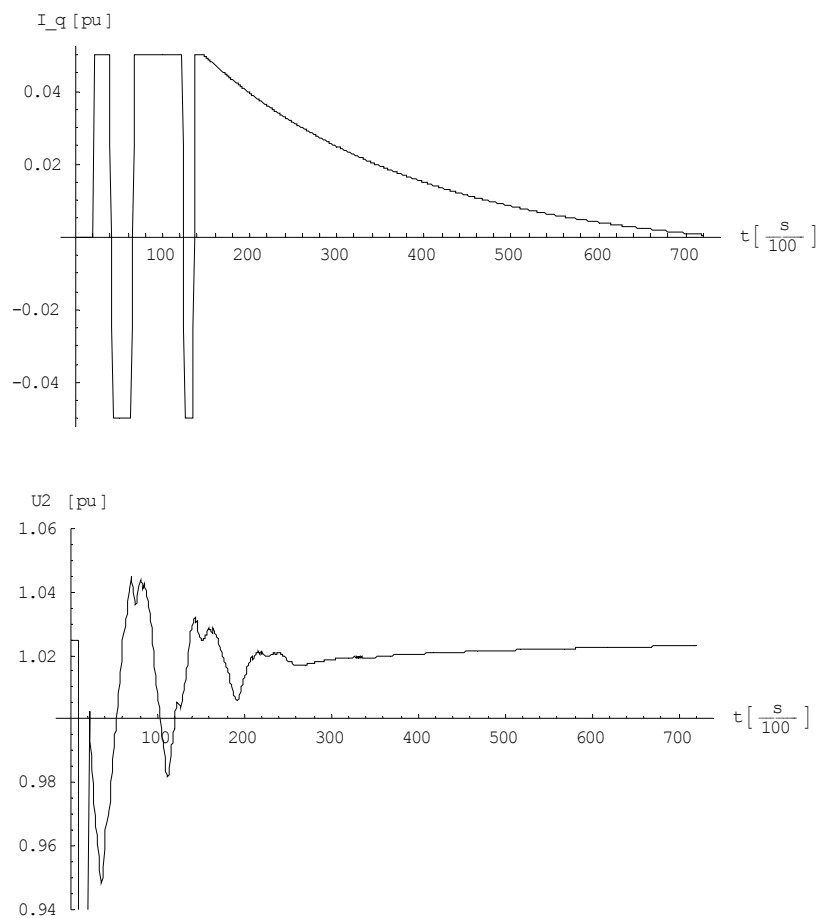
Slika 4.21: Potek kotov rotorjev ter velikosti in kota serijsko injicirane napetosti \underline{U}_T pri največji možni vrednosti $U_T = 0.05$ in optimalnem toku I_q

Iz poteka kotov rotorjev je razvidno izboljšanje dušenja glede na prejšnji primer brez optimiranja toka I_q , vendar je izboljšanje relativno majhno.

Paralelni jalovi tok naprave UPFC ima podoben vpliv na sistem kot naprava STATCOM. Energijska funkcija naprave STATCOM je enaka drugemu delu energijske funkcije naprave UPFC (2.17), ki predstavlja vpliv toka I_q . Regulacijska strategija naprave STATCOM, ki je v [4] izpeljana na podlagi vodilne funkcije Ljapunova, je predstavljena kot bang-bang strategija glede na odvod napetosti zbiralke, na katero je priključen STATCOM. Po bang-bang strategiji na podlagi vodilne funkcije Ljapunova [4] se tok I_q naprave STATCOM spreminja po tej enačbi:

$$I_q = \begin{cases} I_q^{\min} & ; \dot{U}_i \geq 0 \\ I_q^{\max} & ; \dot{U}_i < 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

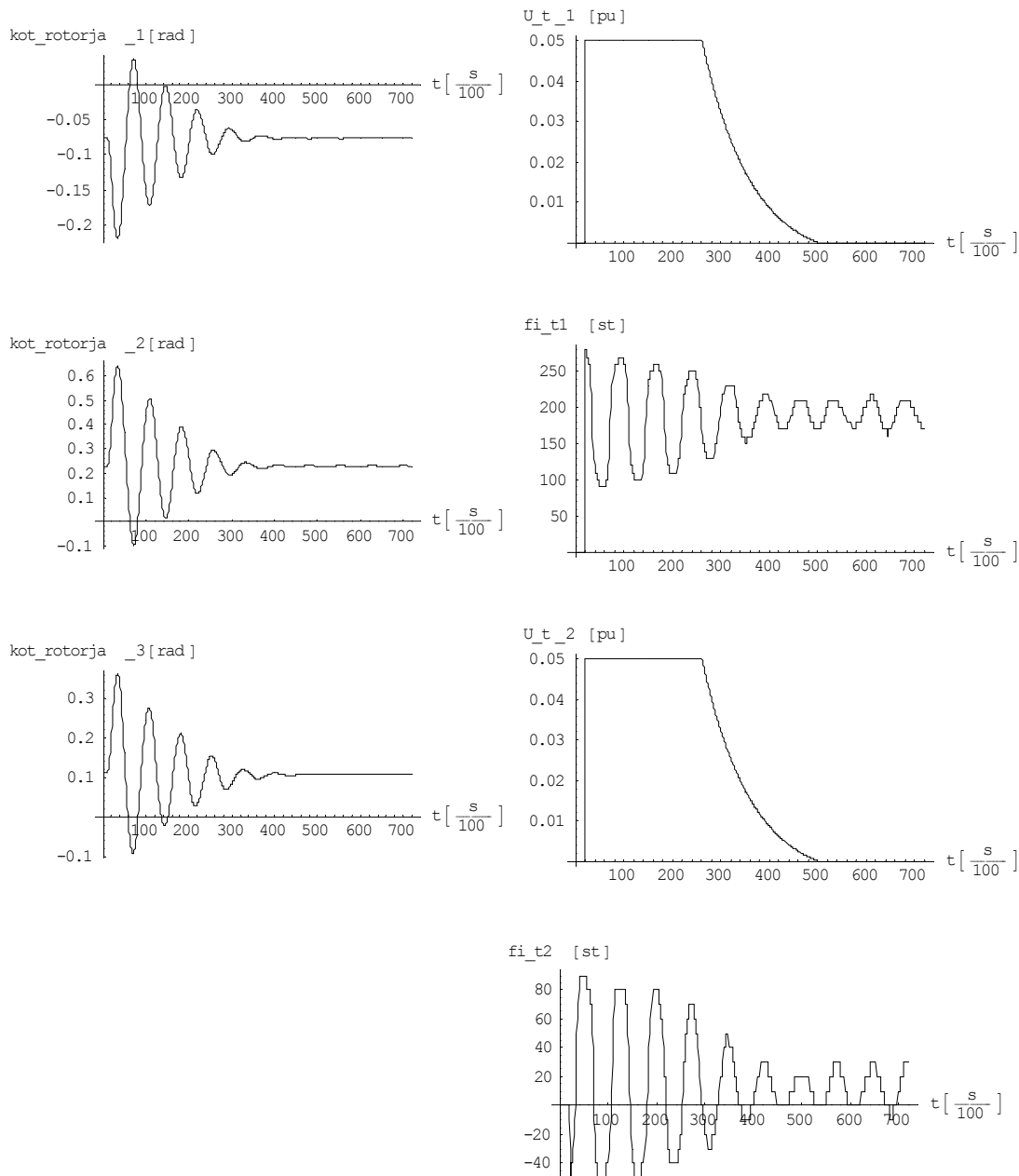
kjer je U_i napetost priključne zbiralke naprave STATCOM. Po tukaj predstavljeni regulacijski strategiji smo pričakovali podoben potek toka I_q glede na odvod napetosti na zbiralki 2 po sliki 4.4. Potek toka I_q in amplitude napetosti U_2 na priključni zbiralki naprave UPFC prikazuje slika 4.22.



Slika 4.22: Potek toka I_q in napetosti U_2 na priključni zbiralki naprave UPFC

S slike 4.22 lahko razberemo delno ujemanje poteka toka I_q glede na odvod napetosti U_2 . Tu je treba poudariti, da se na novo razvita regulacijska strategija razlikuje od strategije z uporabo vodilne funkcije Ljapunova, kot je opisano v poglavju 4.1.

Naslednji simulacijski primer se nanaša na regulacijo dveh naprav UPFC v devetvozliščnem sistemu IEEE, ki sta v sistem vključeni na zbiralkah 4 in 8 glede na sliko 4.7. Motnjo v sistemu ponovno pomeni tripolni kratki stik na enem od vodov v bližini zbiralke 7 in traja 100 ms. Paralelni jalovi tok I_{q1} in I_{q2} smo nastavili na vrednost 0. Simulacijo smo izvedli za $U_{T1} = U_{T2} = 0.05$ p.u. Rezultate digitalne simulacije prikazuje slika 4.23.



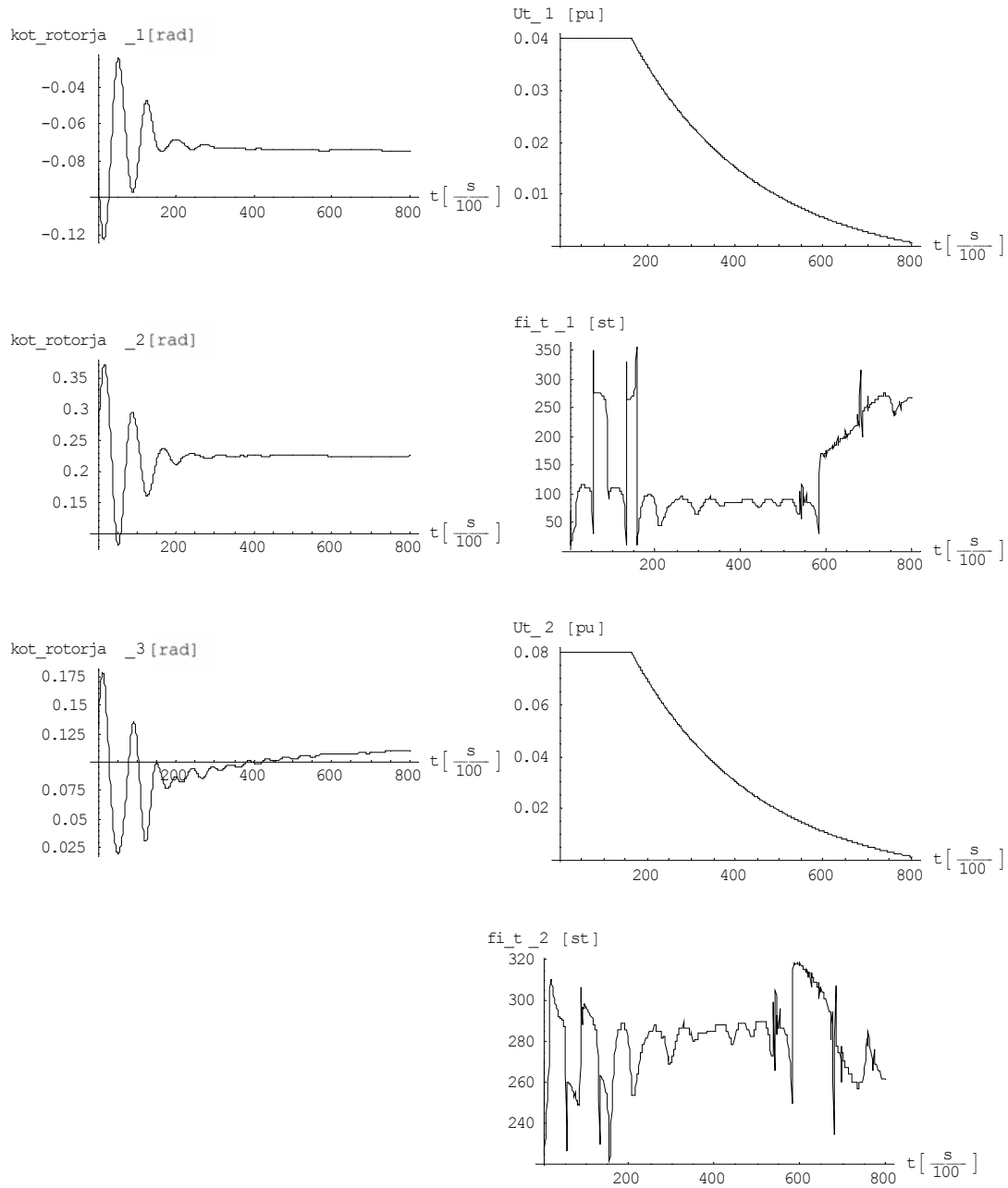
Slika 4.23: Potek kotov rotorjev ter velikosti in kotov serijsko injicirane napetosti \underline{U}_T pri največji možni vrednosti $U_{T1} = U_{T2} = 0.05$

Rezultati dušenja so zelo podobni kot v prejšnjem primeru z eno samo napravo UPFC. Glede medsebojnega vpliva posamezne naprave UPFC smo z dodatnimi digitalnimi simulacijami ugotovili, da druga na drugo bistveno ne vplivata; enak potek kota φ_{T1} kot na sliki 4.23 dobimo tudi pri konstantnem kotu φ_{T2} in enak potek kota φ_{T2} pri konstantnem kotu φ_{T1} . Podobno so ugotovili tudi avtorji v [14].

4.3.2 Naprava IPFC

Podobno kot za napravo UPFC smo regulacijsko strategijo, predstavljeno v poglavju 4.1, uporabili za regulacijo naprave IPFC v devetvozliščnem sistemu IEEE. IPFC je v testni sistem vključen enako kot pri dušenju prvega nihaja, to je v bližini generatorja 3, kot to predstavlja slika 4.10. Z na novo razvito regulacijsko strategijo smo regulirali kot injicirane napetosti v veji 1 glede na sliko 4.10. Motnjo v sistemu pomeni tripolni kratki stik na enem od vodov v bližini zbiralke 7 in traja 50 ms. Simulacijo smo izvedli za $U_{T1} = 0.04$ p.u. in $U_{T2} = 0.08$ p.u. Rezultate digitalne simulacije prikazuje slika 4.24.

Pri regulaciji naprave IPFC moramo omeniti, da soodvisnost posameznih vej zahteva dodatno obravnavo. Kot proste parametre smo v poglavju 2.2.3 določili U_{T1} , U_{T2} in φ_{T1} . Ker pa je delovna moč P_T , ki se pretaka med vejama naprave IPFC, odvisna od toka posamezne veje, parametri U_{T1} , U_{T2} in φ_{T1} niso povsem prosti. Če predpostavimo konstantna parametra U_{T1} in U_{T2} , potem moramo območje regulacije φ_{T1} glede na stanje omrežja sproti določiti tako, da veja 1 ne proizvaja ali porablja večje moči, kot jo veja 2 lahko porabi oz. proizvede. Problem je še posebej aktualen pri nihanju sistema, ko tok veje 2 niha med pozitivno in negativno vrednostjo, kajti čim bolj se tok približuje vrednosti 0, tem manjše je regulacijsko območje kota φ_{T1} , pri vrednosti toka 0 pa je možen en sam kot φ_{T1} (ob predpostavki da veja injicira samo induktivno ali samo kapacitivno moč). Pri tem nastane tudi problem pravilne izbire začetne vrednosti numeričnega reševanja pretoka moči, da dobimo pravega od dveh možnih kotov φ_{T2} glede na želeno injicirano induktivno ali kapacitivno moč veje 2.



Slika 4.24: Potek kotov rotorjev ter velikosti in kotov serijsko injicirane napetosti \underline{U}_{T1} in \underline{U}_{T2} naprave IPFC v devetvozliščnem sistemu IEEE

4.4 Sklepne ugotovitve uporabe nove regulacijske strategije

Rezultati dušenja prvega nihaja kažejo, da naprave FACTS lahko ob primerni regulacijski strategiji izboljšajo tranzientno stabilnost sistema. Pri iskanju optimalne regulacije smo se osredotočili predvsem na regulacijo kota serijsko injicirane napetosti naprave UPFC. Kot smo pričakovali glede na [4] in [21], sta velikosti serijsko injicirane napetosti in paralelnega jalovega toka naprave UPFC med trajanjem prvega nihaja optimalni, ko sta nastavljeni na največjo možno vrednost. To smo potrdili z rezultati testnih simulacij, predstavljenih v tem poglavju. Glede na te rezultate lahko ugotovimo, da se kot injicirane serijske napetosti med trajanjem prvega nihaja ne spreminja hitro in da je razlika pri izboljšanju tranzientne stabilnosti v primerjavi z določenim konstantnim kotom skoraj zanemarljiva. Vendar moramo pri tem poudariti, da optimalni kot po tu predstavljeni strategiji iščemo sproti glede na izmerjene parametre omrežja, medtem ko za določitev omenjenega konstantnega kota regulacijske strategije, ki bi temeljila na meritvah parametrov omrežja, ne poznamo in ga v tej doktorski disertaciji določamo s ponavljanjem simulacij.

Rezultati regulacijske strategije dušenja nihanj kažejo precejšnjo podobnost z bang-bang strategijo naprav FACTS, opisano v [4], s to razliko, da skočno spremembo regulabilnih parametrov serijske veje naprave UPFC predstavimo s spremembo kota in ne s spremembo amplitude, kot je to prikazano v [4] za napravo SSSC. Iz rezultatov dušenja nihanja sistema lahko ugotovimo, da je dušenje z napravami FACTS zelo učinkovito. V sistemu SMIB lahko z dovolj veliko injicirano serijsko napetostjo naprave UPFC nihanje zadržimo v prvem nihaju. Drugače pa je v sistemu z več generatorji. V devetvozliščnem sistemu IEEE s tremi generatorji dušenje z napravami FACTS kljub temu lahko ocenimo kot zelo učinkovito, vendar z večanjem moči naprave FACTS ne moremo doseči iznihanja generatorjev v prvem nihaju. Vsak generator ima svojo frekvenco nihanja, z energijsko funkcijo pa dušimo skupno nihanje. Pri tem je dušenje manjših generatorjev (tj. v našem devetvozliščnem testnem sistemu IEEE generator 3) slabše.

5 Povzetek energijskih funkcij naprav FACTS

5.1 Uvod

V tem poglavju so na enem mestu zbrane energijske funkcije vseh naprav FACTS za EES z ohranjeno strukturo omrežja. Poleg energijskih funkcij naprav, ki so vključene v to doktorsko disertacijo, podajamo tudi že znane energijske funkcije drugih naprav FACTS, določenih v različni literaturi. Za zapis energijskih funkcij smo uporabili poenotene oznake. Serijske naprave FACTS so vključene med zbiralki i in j z napetostma U_i in U_j ter kotoma ϕ_i in ϕ_j . Pri tem velja $\phi_{ij} = \phi_j - \phi_i$. Impedanco transformatorja serijskih naprav smo označili z X_{TRS} , amplitudo serijsko injicirane napetosti z U_T in kot serijsko injicirane napetosti s φ_T .

Pri serijskih napravah FACTS, ki so definirane kot napetostni vir, smo tisti del energijske funkcije, ki ga prispeva sama impedanca X_{TRS} serijskega transformatorja, v zapisu energijske funkcije naprave izpustili in to impedanco v celotni energijski funkciji EES upoštevali kot del omrežja.

5.2 Energijske funkcije naprav FACTS

5.2.1 SVC

Energijska funkcija naprave SVC je povzeta po [1], kjer je SVC modeliran kot paralelna spremenljiva susceptanca B_{SVC} in je med trajanjem prehodnega pojava konstantna, tj. maksimalna. Energijska funkcija je enaka polovici injicirane jalove moči naprave SVC.

$$V_{SVC} = \frac{1}{2} B_{SVC} \cdot U_i^2 \quad (5.1)$$

5.2.2 CSC

Energijska funkcija naprave CSC je povzeta po [33], kjer je CSC modeliran kot spremenljiva serijska susceptanca B_{CSC} , izpeljana iz kapacitivnosti kondenzatorja in je med trajanjem

prehodnega pojava konstantna, tj. maksimalna. Energijska funkcija je enaka polovici injicirane jalove moči naprave CSC.

$$V_{\text{CSC}} = \frac{1}{2} B_{\text{CSC}} \cdot (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\phi_{ij})) \quad (5.2)$$

5.2.3 PST-PAR

Energijska funkcija prečnega transformatorja PST-PAR je povzeta po [4], kjer je PST-PAR modeliran kot serijska injicirana napetost, ki fazorje napetosti priključnih sponk premakne za kot α . Pri izpeljavi energijske funkcije je ta kot med trajanjem prehodnega pojava upoštevan kot konstanten. Energijska funkcija je enaka polovici injicirane jalove moči naprave PST-PAR.

$$V_{\text{PST-PAR}} = \frac{1}{2 \cdot X_{\text{TRS}}} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\phi_{ij} + \alpha)) \quad (5.3)$$

5.2.4 PST-QBT

Energijska funkcija prečnega transformatorja PST-QBT je povzeta po [4], kjer je PST-QBT modeliran kot serijska injicirana napetost, ki je pravokotna na fazor vhodne napetosti U_i in ta fazor premakne za kot α ter poveča za faktor $1/\cos(\alpha)$. Pri izpeljavi energijske funkcije je regulacijski parameter, tj. kot α , med trajanjem prehodnega pojava upoštevan kot konstanten. Energijska funkcija je enaka polovici injicirane jalove moči naprave PST-QBT.

$$V_{\text{PST-QBT}} = \frac{1}{2 \cdot X_{\text{TRS}}} \left(\frac{U_i^2}{\cos^2(\alpha)} + U_j^2 - \frac{2U_i U_j}{\cos(\alpha)} \cos(\phi_{ij} + \alpha) \right) \quad (5.4)$$

5.2.5 STATCOM

Energijska funkcija naprave STATCOM je povzeta po [4], kjer je modelirana kot spremenljivi paralelni jalovi tokovni vir I_q in je med trajanjem prehodnega pojava konstanten, tj. maksimalen. Energijska funkcija je enaka celotni injicirani jalovi moči naprave.

$$V_{\text{STATCOM}} = I_q \cdot U_i \quad (5.5)$$

5.2.6 BESS-STATCOM

Energijska funkcija naprave STATCOM s hranilnikom energije je določena v tej doktorski disertaciji ter je modelirana kot paralelni tokovni vir, ki v omrežje daje ali odvzema tok I_p pod kotom β glede na napetost priključne sponke. Za napravo BESS- STATCOM smo definirali dve energijski funkciji glede na način regulacije same naprave.

Pri prvi izpeljavi sta med trajanjem pojava tok I_p in kot β konstantna. Energijska funkcija je enaka vsoti celotne injicirane jalove moči in integralu delovne moči po kotu ϕ :

$$\begin{aligned} V_{\text{BESS-STATCOM 1}} &= I_p \cdot \sin(\beta) \cdot U_i + I_p \cdot \cos(\beta) \cdot \int U_i d\theta_i \\ &= Q_{si} + \int P_{si} d\theta_i \end{aligned} \quad (5.6)$$

Pri drugi izpeljavi je med trajanjem prehodnega pojava tok I_p konstanten, kot β pa reguliran tako, da je injicirana delovna moč P_{si} konstantna. Energijska funkcija je enaka vsoti celotne injicirane jalove moči in produktu delovne moči in vsote kotov ϕ in β :

$$\begin{aligned} V_{\text{BESS-STATCOM 2}} &= I_p \cdot \sin(\beta) \cdot U_i + P_{si} \cdot (\theta_i - \beta) \\ &= Q_{si} + P_{si} \cdot (\theta_i - \beta) \end{aligned} \quad (5.7)$$

5.2.7 SSSC

Energijska funkcija naprave SSSC je povzeta po [4], kjer je modelirana kot spremenljiva serijska injicirana napetost U_T , ki je pravokotna na tok skozi napravo in s tem injicira samo

jalovo moč. Med trajanjem prehodnega pojava je napetost U_T konstantna, tj. maksimalna. Energijska funkcija je enaka celotni injicirani jalovi moči naprave SSSC.

$$V_{\text{SSSC}} = -\frac{U_T}{X_{\text{TRS}}} \sqrt{U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\phi_{ij})} \quad (5.8)$$

5.2.8 BESS-SSSC

Energijska funkcija naprave SSSC s hranilnikom energije je določena v tej doktorski disertaciji ter je modelirana kot serijska injicirana napetost spremenljive amplitude U_T in spremenljivega kota φ_T glede na kot ϕ . Tako lahko injicira delovno in jalovo moč. Za napravo BESS-SSSC smo definirali dve energijski funkciji glede na način regulacije same naprave.

Pri prvi izpeljavi energijske funkcije smo oba regulabilna parametra, tj. U_T in φ_T , upoštevali kot konstantna in definirali energijsko funkcijo, ki je enaka vsoti injiciranih jalovih moči naprave in integrala delovne moči po kotu ϕ :

$$V_{\text{BES-SSSC } 1} = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\phi_{ij} + \varphi_T) + \int \left[\frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\phi_{ij} + \varphi_T) \right] \partial \phi_i \quad (5.9)$$

Pri drugi izpeljavi energijske funkcije smo kot regulacijski parameter izbrali amplitudo napetosti U_T in injicirano delovno moč P_T ter pri konstantnih vrednostih U_T in P_T definirali naslednjo energijsko funkcijo naprave, ki je enaka vsoti injiciranih jalovih moči in produkta delovne moči s kotom ($\phi_i + \varphi_T$):

$$V_{\text{BESS-SSSC } 2} = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\phi_{ij} + \varphi_T) + P_T \cdot (\phi_i + \varphi_T) \quad (5.10)$$

5.2.9 UPFC

Energijska funkcija naprave UPFC je določena v tej doktorski disertaciji. UPFC je modeliran kot serijsko vezan napetostni vir spremenljive amplitude U_T in spremenljivega kota φ_T glede na kot ϕ_i in paralelno priključenim tokovnim virom I_q . Za definiranje energijske funkcije smo upoštevali vse tri regulabilne parametre U_T , φ_T in I_q kot konstantne. Paralelni tokovni vir I_q lahko obravnavamo ločeno kot samostojno napravo STATCOM. Energijska funkcija je enaka celotni injicirani jalovi moči naprave UPFC.

$$V_{\text{UPFC}} = \frac{U_T}{X_{\text{TRS}}} \left(U_i \cdot \cos(\varphi_T) - U_j \cdot \cos(\phi_{ij} + \varphi_T) \right) + U_i \cdot I_q \quad (5.11)$$

5.2.10 BESS-UPFC

Energijska funkcija naprave UPFC s hranilnikom energije je določena v tej doktorski disertaciji. Serijska veja naprave BESS-UPFC je modelirana enako kot serijska veja UPFC, paralelna veja pa kot BESS-STATCOM. Glede na regulacijo paralelnega delovnega toka I_p , ki je razlika med delovno močjo serijske in paralelne veje, smo definirali dve energijski funkciji. Za definiranje energijske funkcije smo pri izpeljavi obeh energijskih funkcij upoštevali prve tri regulabilne parametre U_T , φ_T in I_q kot konstantne.

Pri prvi izpeljavi smo poleg konstantnih parametrov U_T , φ_T in I_q upoštevali konstanten delovni tok I_p . Energijska funkcija je enaka vsoti celotne injicirane jalove moči naprave UPFC in integralu paralelne delovne moči po kotu ϕ_i .

$$V_{\text{BESS-UPFC 1}} = V_{\text{UPFC}} + I_{T2} \cdot \int U_i \cdot \partial \phi_i \quad (5.12)$$

Pri drugi izpeljavi smo poleg konstantnih parametrov U_T , φ_T in I_q upoštevali konstantno delovno moč paralelne veje P_T , ki je razlika med delovno močjo serijske in paralelne veje. Energijska funkcija je enaka vsoti celotne injicirane jalove moči naprave UPFC ter produktu paralelne delovne moči in kota ϕ_i .

$$V_{\text{BESS-UPFC } 2} = V_{\text{UPFC}} + P_T \cdot \phi_i \quad (5.13)$$

5.2.11 GUPFC

Energijska funkcija naprave GUPFC je določena v tej doktorski disertaciji. GUPFC z n serijskimi vejami in eno paralelno vejo smo predstavili z n samostojnih naprav UPFC. Pri tem je posamezna serijska veja naprave GUPFC enaka serijski veji posamezne naprave UPFC, paralelna veja naprave GUPFC pa je enaka vsoti paralelnih vej vseh posameznih naprav UPFC. Za definiranje energijske funkcije smo upoštevali vse regulabilne parametre, t.j. amplitude in kote serijsko injicirane napetosti posamezne veje U_T in φ_T ter paralelni tok I_q , konstantne. Energijska funkcija naprave UPFC z n serijskimi vejami je enaka celotni injicirani jalovi moči naprave.

$$V_{\text{GUPFC}} = \sum_{w=1}^n \left[\frac{U_{T_w}}{X_{\text{TRS}_w}} \left(U_i \cdot \cos(\varphi_{T_w}) - U_{j_w} \cdot \cos(\theta_{ijw} + \varphi_{T_w}) \right) \right] + I_q \cdot U_i \quad (5.14)$$

5.2.12 IPFC

Energijska funkcija naprave IPFC je določena v tej doktorski disertaciji. Posamezna veja naprave IPFC je modelirana kot serijsko vezan napetostni vir spremenljive amplitude U_T in spremenljivega kota φ_T glede na kot ϕ . Vsota injiciranih delovnih moči posameznih serijskih vej je enaka 0. Glede na regulacijo regulabilnih parametrov smo definirali dve energijski funkciji.

Pri definiranju prve energijske funkcije smo upoštevali konstantne amplitude napetosti U_T v vseh vejah in konstantne kote φ_T v vseh razen v prvi veji naprave IPFC. Kot φ_T v prvi veji je odvisen od delovne moči v preostalih vejah. Energijska funkcija je enaka seštevku vsote injiciranih jalovih moči posameznih vej in integrala injicirane delovne moči po kotu φ_T prve veje naprave IPFC.

$$\begin{aligned}
V_{\text{IPFC 1}} = & \sum_{v=1}^n \left(\frac{U_i U_{T_v}}{X_{\text{TRS}_v}} \cos(\varphi_{T_v}) - \frac{U_j U_{T_v}}{X_{\text{TRS}_v}} \cos(\theta_{i-v} + \varphi_{T_v}) \right) \\
& + \frac{U_{T1}}{X_{\text{TRS}}} \int [U_i \cdot \sin(\varphi_{T1}) - U_k \cdot \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T1})] \partial \varphi_{T1}
\end{aligned} \tag{5.15}$$

Pri definiranju druge energijske funkcije smo upoštevali konstantne amplitude napetosti U_T in konstantne injicirane delovne moči P_T v vseh vejah naprave IPFC. Energijska funkcija je enaka seštevku vsote injiciranih jalovih moči posameznih vej ter vsote produktov delovne moči P_T in kota φ_T posameznih vej naprave IPFC.

$$\begin{aligned}
V_{\text{IPFC 2}} = & \sum_{v=1}^n \left(\frac{U_i U_{T_v}}{X_{\text{TRS}_v}} \cos(\varphi_{T_v}) - \frac{U_j U_{T_v}}{X_{\text{TRS}_v}} \cos(\theta_{i-v} + \varphi_{T_v}) \right) \\
& + \sum_{v=1}^n P_{T_v} \cdot \varphi_{T_v}
\end{aligned} \tag{5.16}$$

5.3 Povzetek

Energijske funkcije naprav FACTS so tesno povezane z injiciranimi jalovimi močmi naprav v omrežje. Pri napravah, ki so definirane kot napetostni pretvornik (angl. *voltage source converter*) ali tokovni pretvornik (angl. *current source converter*) in je injicirana jalova moč linearno odvisna od napetosti priključnih sponk (oz. injicirana napetost ali/in tok nista odvisna od napetosti priključnih sponk), je energijska funkcija enaka celotni vsoti jalovih moči, ki jih naprava injicira v omrežje. Take naprave so STATCOM, SSSC, UPFC, GUPFC in IPFC.. Pri napravah, pri katerih je vir napetosti ali toka pasivni element in je injicirana jalova moč kvadratno odvisna od napetosti priključnih sponk (oz. sta injicirana napetost ali tok linearno odvisna od napetosti priključnih sponk), je energijska funkcija enaka polovici injicirane jalove moči naprave v omrežje. Take naprave so SVC, CSC, PAR in QBT. Če napravam dodamo hranilnike energije, lahko injicirajo v omrežje poleg jalove moči tudi delovno moč. Prispevek te delovne moči se kaže tudi v energijskih funkcijah, in sicer na podoben način, kot velja za obravnavanje delovnih bremen pri definiranju energijske funkcije EES in je podrobneje opisano v [8] in [10]. Če injicirana delovna moč ni konstantna, je energijska funkcija za injicirano delovno moč v obliki integrala in s tem odvisna od poti. Energijska funkcija postane neodvisna od poti le tedaj, ko je injicirana delovna moč konstantna. Posebej naj

omenimo še napravo IPFC, ki v EES kot celoto ne injicira delovne moči, pretaka pa delovne moči med posameznimi vejami in se te moči deloma kažejo v energijski funkciji te naprave.

V tabeli 5.1 so zbrane energijske funkcije za EES z ohranjeno strukturo omrežja, ki so vključene v to doktorsko disertacijo, in energijske funkcije preostalih naprav FACTS, ki so določene v različni literaturi.

TABELA 5.1: ENERGIJSKE FUNKCIJE NAPRAV FACTS

Naprava	Energijska funkcija
SVC	$V_{\text{SVC}} = \frac{1}{2} B_{\text{SVC}} \cdot U_i^2$
CSC	$V_{\text{CSC}} = \frac{1}{2} B_{\text{CSC}} \cdot (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\phi_{ij}))$
PAR	$V_{\text{PST-PAR}} = \frac{1}{2 \cdot X_{\text{TRS}}} (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\phi_{ij} + \alpha))$
QBT	$V_{\text{PST-QBT}} = \frac{1}{2 \cdot X_{\text{TRS}}} \left(\frac{U_i^2}{\cos^2(\alpha)} + U_j^2 - \frac{2U_i U_j}{\cos(\alpha)} \cos(\phi_{ij} + \alpha) \right)$
STATCOM	$V_{\text{STATCOM}} = I_q \cdot U_i$
BESS- STATCOM	$V_{\text{BESS-STATCOM 1}} = I_p \cdot \sin(\beta) \cdot U_i + I_p \cdot \cos(\beta) \cdot \int U_i d\theta_i$ $V_{\text{BESS-STATCOM 2}} = I_p \cdot \sin(\beta) \cdot U_i + P_{si} \cdot (\theta_i + \beta)$
SSSC	$V_{\text{SSSC}} = -\frac{U_T}{X_{\text{TRS}}} \sqrt{U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos(\phi_{ij})}$

Naprava	Energijska funkcija
BESS-SSSC	$V_{\text{BESS-SSSC } 1} = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\phi_{ij} + \varphi_T)$ $+ \int \left[\frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \sin(\phi_{ij} + \varphi_T) \right] \partial \phi_i$ $V_{\text{BESS-SSSC } 2} = \frac{U_i \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\varphi_T) - \frac{U_j \cdot U_T}{X_{\text{TRS}}} \cos(\phi_{ij} + \varphi_T)$ $+ P_T \cdot (\phi_i + \varphi_T)$
UPFC	$V_{\text{UPFC}} = \frac{U_T}{X_{\text{TRS}}} (U_i \cdot \cos(\varphi_T) - U_j \cdot \cos(\phi_{ij} + \varphi_T)) + U_i \cdot I_q$
BESS-UPFC	$V_{\text{BESS-UPFC } 1} = V_{\text{UPFC}} + I_{T2} \cdot \int U_i \cdot \partial \phi_i$ $V_{\text{BESS-UPFC } 2} = V_{\text{UPFC}} + P_T \cdot \phi_i$
GUPFC	$V_{\text{GUPFC}} = \sum_{w=1}^n \left[\frac{U_{T_w}}{X_{\text{TRS}_w}} (U_i \cdot \cos(\varphi_{T_w}) - U_{j_w} \cdot \cos(\theta_{ij_w} + \varphi_{T_w})) \right] + I_q \cdot U_i$
IPFC	$V_{\text{IPFC } 1} = \sum_{v=1}^n \left(\frac{U_i U_{T_v}}{X_{\text{TRS}_v}} \cos(\varphi_{T_v}) - \frac{U_j U_{T_v}}{X_{\text{TRS}_v}} \cos(\theta_{i-v} + \varphi_{T_v}) \right)$ $+ \frac{U_{T1}}{X_{\text{TRS}}} \int [U_i \cdot \sin(\varphi_{T1}) - U_k \cdot \sin(\theta_{ik} + \varphi_{T1})] \partial \varphi_{T1}$ $V_{\text{IPFC } 2} = \sum_{v=1}^n \left(\frac{U_i U_{T_v}}{X_{\text{TRS}_v}} \cos(\varphi_{T_v}) - \frac{U_j U_{T_v}}{X_{\text{TRS}_v}} \cos(\theta_{i-v} + \varphi_{T_v}) \right)$ $+ \sum_{v=1}^n P_{T_v} \varphi_{T_v}$

6 Sklep

Doktorska disertacija obravnava kombinirane naprave FACTS – tj. naprave FACTS z več kot enim regulacijskim parametrom – v energijskih funkcijah EES. Določili smo prispevke v energijskih funkcijah EES za naprave UPFC, IPFC, GUPFC, BESS-STATCOM, BESS-SSSC in BESS-UPFC. Ker smo energijske funkcije določili za EES z ohranjeno strukturo, imajo prispevki naprav FACTS obliko samostojnih dodatnih členov k energijski funkciji za EES brez naprav FACTS.

Pri napravah FACTS smo ugotovili tesno povezanost energijske funkcije z jalovo energijo, ki jo naprava injicira v omrežje. Pri napravah FACTS, katerih obratovanje temelji na uporabi pasivnih elementov (SVC, CSC, PAR in QBT) in je injicirana jalova moč kvadratno odvisna od napetosti priključnih sponk (oz. sta injicirana napetost ali tok linearno odvisna od napetosti priključnih sponk), je energijska funkcija enaka polovici injiciranih jalovih moči. Pri napravah FACTS, katerih obratovanje temelji na pretvornikih AC/DC/AC (STATCOM, SSSC, UPFC, GUPFC, IPFC) in je injicirana jalova moč linearno odvisna od napetosti priključnih sponk (oz. injicirana napetost ali/in tok nista odvisna od napetosti priključnih sponk), je energijska funkcija enaka celotni injicirani jalovi moči naprave FACTS.

Naprave FACTS s hranilnikom energije lahko poleg jalove moči v omrežje injicirajo tudi delovno moč. Energijske funkcije teh naprav so sestavljene iz dveh delov. Prvi del je enak energijski funkciji naprave brez hranilnika energije. Drugi del kaže vpliv injicirane delovne moči in ga lahko obravnavamo enako kot delovna bremena, katerih upoštevanje v energijskih funkcijah EES je znano. Če injicirana delovna moč ni konstantna, ta drugi del energijske funkcije ostaja v obliki integrala, ki ga analitično ne moremo rešiti.

Energijske funkcije EES s kombiniranimi napravami FACTS smo preverili in uporabili v direktnih metodah za ugotavljanje tranzientne stabilnosti, s katerimi smo določali kritične čase odstranitve motnje v testnem sistemu generator – toga mreža in v devetvozliščnem sistemu IEEE s tremi generatorji. Kritični časi odstranitve motnje v testnem sistemu generator – toga mreža, določeni z direktnimi metodami, se ujemajo s kritičnimi časi odstranitve motnje, ugotovljenimi s ponavljanjem digitalne simulacije, kar potrjuje ustreznost energijskih funkcij naprav FACTS.

Poleg uporabe v direktnih metodah smo energijske funkcije uporabili tudi za določanje regulacijske strategije naprav FACTS. Predstavljena regulacijska strategija temelji na numeričnem iskanju najbolj negativnega odvoda energijske funkcije EES in daje rezultate v obliki odsekoma konstantnih regulacijskih parametrov. Regulacijska strategija lahko velja za poljubno napravo FACTS. V preteklosti se je izkazalo, da morajo naprave za največje izboljšanje stabilnosti prvega nihaja injicirati največje možne napetosti ali tokove. Tako se regulacijska strategija kombiniranih naprav FACTS osredotoči na iskanje optimalnega kota serijsko injicirane napetosti, medtem ko so drugi optimalni regulacijski parametri (tj. amplituda serijsko injicirane napetosti ali paralelni tok) konstantni, tj. maksimalni. Pri dušenju nihanj rezultati regulacijske strategije kažejo veliko podobnost s tako imenovanimi bang-bang strategijami, ki se pri serijskih napravah FACTS z regulabilnim kotom injicirane napetosti (UPFC, IPFC) kaže v hitrih spremembah tega kota za približno 180° .

V zadnjem delu doktorske disertacije povzemamo že znane in tu določene energijske funkcije naprav FACTS.

Kot se pri raziskovalnem delu pogosto zgodi, se je tudi tukaj z rešitvijo enega vprašanja pojavilo več novih. Nadaljnje delo bi bilo lahko usmerjeno v izpopolnitev regulacijske strategije IPFC in v druge načine regulacije naprav FACTS, ki bi EES obravnavali glede na kritične točke, v katerih pride do cepitve sistema. Zanimiva tema bi bila verjetno tudi dejanska izvedba sprotnega ugotavljanja stabilnosti slovenskega EES, kar pa je trenutno še v povojih.

7 Izvirni prispevki doktorske disertacije

Doktorska disertacija obravnava tematiko razvoja energijskih funkcij EES z upoštevanjem kompleksnih naprav FACTS druge generacije in podaja izvirne prispevke znanosti na področju elektroenergetike:

- Razvoj energijske funkcije za poljubno število univerzalnih prečnih transformatorjev (UPFC) v EES;
 - razvoj energijske funkcije za poljubno število medlinijskih regulatorjev pretokov moči (IPFC) poljubne strukture v EES;
 - razvoj energijske funkcije za poljubno število posplošenih univerzalnih prečnih transformatorjev (GUPFC) poljubne strukture v EES;
 - razvoj energijskih funkcij za poljubno število naprav FACTS s hranilniki energije v EES;
 - izpeljava metode upoštevanja odsekoma zveznih regulacijskih parametrov naprav FACTS pri določanju CCT z direktno metodo;
 - postopek za določanje regulacijske strategije naprav FACTS z več regulacijskimi parametri za dušenje sistema na podlagi ekstremnega gradienta energijske funkcije.
1. Nove energijske funkcije za EES z napravami FACTS omogočajo uporabo direktnih metod z ohranjeno strukturo omrežja za oceno kritičnega časa odstranitve motnje v takih sistemih, kar predstavlja dobro podlago za uvedbo "on-line" ocene tranzientne stabilnosti sodobnih EES v centrih vodenja. Hkrati omogočajo določitev strategije regulacije teh naprav za učinkovito dušenje sistema.

8 Literatura

- [1] I. A. Hiskens, D. J. Hill, "Incorporation of SVCs into energy function methods," *Trans. Power Systems*, vol 7, pp 133–140, Feb. 1992.
- [2] K. R. Padiyar, V. Immanuel, Modelling of SVC for stability evaluation using structure preserving energy function, *Electric Power & Energy Systems*, Vol 16, No. 5, 1994, pp 339-348.
- [3] U. Gabrijel, Uporaba energijskih funkcij v elektroenergetskih sistemih s FACTS napravami, magistrsko delo, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Univerza v Ljubljani, april 2001.
- [4] U. Gabrijel. Naprave FACTS v energijskih funkcijah elektroenergetskih sistemov. Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2003.
- [5] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal. Definition and classification of power system stability – IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions. *IEEE Transactions on Power Systems*, Volume: 19 , Issue: 3 , Pages:1387 – 1401, Aug. 2004.
- [6] H.K. Khalil. *Nonlinear systems*. Prentice Hall, New Jersey, 1996.
- [7] J. Machowski, Janusz W. Bialek, James R. Bumby, *Power System Dynamics and Stability*, John Wiley&Sons, 1997.
- [8] T. Van Cutsem, M. Ribbens-Pavella. Structure preserving direct methods for transient stability analysis of power systems. *Proceedings of 24th Conference on Decision and Control*, str 70-77, 1985.
- [9] P. Sauer, M. A. Pai, *Power System Dynamics and Stability*, Prentice Hall, 1998.
- [10] M. A. Pai, *Energy Function Analysis For Power System Stability*, Kluwer Academic Publishers, 1989.

- [11] T. Athay, R. Podmore, S. Virmani. A practical method for the direct analysis of transient stability. *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, vol PAS-98, str. 573-582, 1979.
- [12] M. Pavella, P.G. Murthy. Transient stability of power systems. John Wiley & Sons, 1994.
- [13] M. Noroozian, L. Angquist, G. Ingestrom. Series compensation. Y. H. Song in A. T. Johns, *Flexible ac transmission systems (FACTS)*, IEE cop., str. 199-242, London, 1999.
- [14] M. Ghandhari, Control Lyapunov functions: A control strategy for damping of power oscillations in large power systems, Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2000.
- [15] K. L. Lo, T. T. Ma, "UPFC damping control strategy based on transient energy function," *Electric Power System Research*, vol. 56, pp 195-203, 2000.
- [16] R. Mihalič, P. Žunko, D. Povh. Improvement of transient stability using unified power flow controller. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 11, str. 485-492, 1996.
- [17] X. Wei, J. H. Chow, B. Fardanesh, A. Edris. A common modeling framework of voltage-sourced converters for load-flow, sensitivity and dispatch analysis. *Trans. Power Systems*, vol 19, pp 934–941, May 2004.
- [18] Z. Xiao-Ping, E. Handschin, M. Yao. Modeling of the generalized unified power flow controller (GUPFC) in a nonlinear interior point OPF. *Trans. Power Systems*, vol 16, pp 367–373, Aug. 2001.
- [19] A. Vinkovič. Medlinijski regulator pretokov moči. Diplomaska naloga, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 1999.
- [20] L. Gyugyi, K. K. Sen, C. D. Schauder. The interline power flow controller concept: a new approach to power flow management in transmission system. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, str. 1115-1123, July 1999.
- [21] R. Mihalič. Določitev obratovalnih parametrov prečnega transformatorja za izboljšanje obratovalnih razmer in povečanje prenosne zmogljivosti elektroenergetskega sistema,

- doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo, Ljubljana, 1993.
- [22] P. M. Anderson, A.A Fouad, Power system control and stability, The Iowa State university Press, First Edition, 1977.
- [23] A.A. Hashmani, Y. Wang, T.T. Lie. Enhancement of power system transient stability using a nonlinear coordinated excitation and TCPS controller. *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 24, str 201-214, 2002.
- [24] H.F. Wang. Damping function of unified power flow controller. *IEE Procs. Generation, transmission and distribution*, vol. 146, No. 1, January 1999.
- [25] H.F. Wang. Static synchronous series compensator to damp power system oscillations. *Electric power system research*, vol. 54, str 113-119, 2000.
- [26] J. Machowski, D. Nelles, Power system transient stability enhancement by optimal control of static VAR compensators, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol 14, No 6, December 1992.
- [27] J. Machowski, D. Nelles, Optimal modulation controller for superconducting magnetic energy storage, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol 16, No 5, 1994.
- [28] K.R. Padiyar, K. Uma Rao. Discrete control of series compensation for stability improvement in power systems. *Int. journal of electric power and energy systems*, vol. 19, no. 5. pp 311-319, 1997.
- [29] J. Chang, J.H. Chow. Time-optimal series capacitor control for damping interarea modes in interconnected power systems. *IEEE transactions on power systems*, vol. 12, no. 1. Februar 1997.
- [30] Q. Lu, W. Wang, C. Shen, S. Mei, M. Goto, A. Yokoyama. Intelligent optimal sieving method for FACTS device control in multi-machine systems. *Electric power system research*, vol. 62, str 209-214, 2002.
- [31] M. Ghandari, G. Andersson and I.A. Hiskens. Control Lyapunov functions for controllable series devices. *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 16, No. 4, str. 689-694, 2001.

- [32] M. Ghandari. Control Lyapunov functions: A control strategy for damping of power oscillations in large power systems. Doctoral thesis, Royal institute of technology, Stockholm4, 2000.
- [33] M. Ghandari, G. Andersson, M. Pavella, D. Ernst. A control strategy for controllable series capacitor in electric powersystems, *Automatica*, vol. 37, str. 1575-1583, 2001.
- [34] M. Ghandari, G. Andersson and I.A. Hiskens. Control Lyapunov functions for controllable series devices. VII. Sepope, Brasil, 12-26 May 2000.
- [35] M. Januszevski, J. Machowski and J.W. Bialek. Application of the direct Lyapunov method to improve damping of power swings by control of UPFC. *IEE Procs. Generation, transmission and distribution*, vol. 151, No. 2, str. 252-260, 2004.
- [36] J. Machowski, S. Robak, J.W. Bialek. Damping of power swings by optimal control of series compensator, Proc. 10th Int. Conf. Power system automation and control, Bled, Slovenia, str. 39-44, 1997.
- [37] J. Machowski, A. Smolarczyk, J.W. Bialek. Damping of power swings by control of braking resistors, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol 23, str. 539-548, 2001.
- [38] W. Zhaoia, W. Yingtao. PMU-based Wide Area Monitoring in Power System. *Power System and Communications Infrastructures for the future*, Beijing, September 2002. Dostopno naspletni strani: http://www.cris-inst.com/publications/beijing_2002/sessions/Full%20Papers/SessionIX/crispprIX3.pdf
- [39] S. Kabra. A technique for estimating system-wide phasors in real time. Master thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, State University, Blacksburg, Virginia, January 1997. Dostopno na spletni strani: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/public/etd-19211742972620/etd.pdf>
- [40] S. Chen, J. Chen. A novel approach based on global positioning system for parallel load flow analysis. *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 27, str 53-59, Januar 2005.

9 Priloge

9.1 Longitudinalni testni sistem SMIB

9.1.1 Primer datoteke z napravo UPFC za določevanje CCT-jev po simulacijski metodi

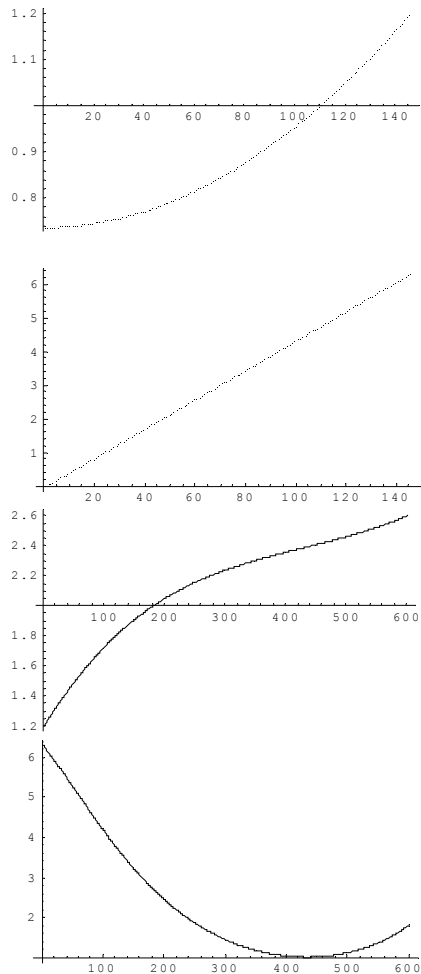
```
(* P in Q iz generatorja izracunam sam ----> Eo in δo *)
tkorak = 0.001;
tpre = 0.1;
Ut = 0.1;
gama = 85 / 180 * pi;
Iq = 0.0;
tkx = 0.145;
tpo = 0.6;
stdpre = tpre / tkorak;
stdkx = tkx / tkorak;
stdpo = tpo / tkorak;
m = 6.6 / (2 * pi * 60);
Sb = 1500; (* bazna moc *)
Ub = 500;
Zb = Ub^2 / Sb;
Yb = Zb^-1;
xd = 0.27; (* tranzientna reaktanca *)
Bxd = Im[1 / (i xd)];
B12 = Im[1 / (i 32.7557 / Zb)];
B23 = Im[1 / (i 63.5786 / Zb)];
B11 = Im[1 / (-1101.1 i / Zb)];
B22 = Im[1 / (-542.24 i / Zb)];
MVA = 265;
Uks = 3.75;
Bxupfc = Im[1 / (i Ub^2 / MVA * (Uks / 100) / Zb)];
PL = -150. / Sb; (* P breme *)
QL = -15. / Sb;
d0 = 30 / 180 * pi;
%180 / pi;
V3 = 1;
e3 = 0;
V1o = 1;
e1o = d0;
(* LF vozlisca 2 *)
LF1 = FindRoot[{ - B12 V1o V2 Sin[e2 - e1o] - Bxupfc V2 Vmid Sin[e2 - emid] - PL == 0,
  - (B11 + B12 + Bxupfc) V2^2 + B12 V1o V2 Cos[e2 - e1o] + Bxupfc V2 Vmid Cos[e2 - emid] - QL == 0,
  - Bxupfc Vmid V2 Sin[emid - e2] - B23 Vmid V3 Sin[emid - e3] == 0,
  - (Bxupfc + B22 + B23) Vmid^2 + Bxupfc Vmid V2 Cos[emid - e2] + B23 Vmid V3 Cos[emid - e3] == 0},
  {V2, 1.}, {Vmid, 1}, {e2, 0.47}, {emid, 0.34}];
V22 = V2 /. Part[LF1, 1];
Vmid2 = Vmid /. Part[LF1, 2];
e22 = e2 /. Part[LF1, 3];
emid2 = emid /. Part[LF1, 4];
(* Vozlisce 1 proti 2 *)
(* netomac kaze enako *)
"P2="
(- B12 V1o V22 Sin[e1o - e22]) * 1500;
Pm = P = % / 1500;
"Q2="
(-( (B11 + B12) V1o^2 - (B12 V1o V22 Cos[e1o - e22]) ) * 1500);
Q = % / 1500;
(* LF vozlisca 1 in 2 *)
(* vzamem moci iz prejsnjega LF *)
Ug = Cos[d0] + i Sin[d0];
I0 = (P - Qi) / (1 (Cos[d0] - i Sin[d0]));
EE = 1 (Cos[d0] + i Sin[d0]) + xdi * I0;
"E="
E1 = Abs[EE];
"δ0="
δ0 = Arg[EE];
%180 / pi;
(* vse OK *)
(* LF vozlisca 1, 2, Mid *)
```



```

LF2 = FindRoot[{{
  - Bxd E1 V1 Sin[e1 - e0] - B12 V1 V2 Sin[e1 - e2] == 0, - (Bxd + B12 + B11) V1^2 + Bxd E1 V1 Cos[e1 - e0] + B12 V1 V2 Cos[e2 - e1] == 0,
  - B12 V1 V2 Sin[e2 - e1] - Bxupfc V2 Vmid Sin[e2 - emid] - PL == 0, - (B12 + Bxupfc + B11) V2^2 + B12 V1 V2 Cos[e2 - e1] + Bxupfc V2 Vmid Cos[e2 - emid] - QL == 0,
  - Bxupfc Vmid V2 Sin[emid - e2] - B23 Vmid V3 Sin[emid - e3] == 0, - (Bxupfc + B23 + B22) Vmid^2 + Bxupfc Vmid V2 Cos[emid - e2] + B23 Vmid V3 Cos[emid - e3] == 0
}}, {V1, 1.}, {V2, 1.}, {Vmid, 1.}, {e1, 0.47}, {e2, 0.35}, {emid, 0.35}];
VW1 = VW2 = ee1 = ee2 = VVmid = eemid = {};
e1 = {e0};
w1 = {};
YL2 = (PL - QL + i) / V2^2;
YL2r = Re[YL2];
YL2i = Im[YL2];
VW1 = VW2 = ee1 = ee2 = {};
LF3 = FindRoot[{{
  - Bxd E1 V1 Sin[e1 - e0] - B12 V1 V2 Sin[e1 - e2] == 0, - (Bxd + B12 + B11) V1^2 + Bxd E1 V1 Cos[e1 - e0] + B12 V1 V2 Cos[e2 - e1] == 0,
  - B12 V1 V2 Sin[e2 - e1] - Bxupfc V2 Vmid Sin[e2 - emid] - YL2r V2^2 == 0,
  - (B12 + Bxupfc + B11) V2^2 + B12 V1 V2 Cos[e2 - e1] + Bxupfc V2 Vmid Cos[e2 - emid] + YL2i V2^2 == 0,
  - Bxupfc Vmid V2 Sin[emid - e2] - B23 Vmid V3 Sin[emid - e3] == 0, - (Bxupfc + B23 + B22) Vmid^2 + Bxupfc Vmid V2 Cos[emid - e2] + B23 Vmid V3 Cos[emid - e3] == 0
}}, {V1, 1.}, {V2, 1.}, {Vmid, 1.}, {e1, 0.47}, {e2, 0.35}, {emid, 0.35}];
V11 = V1 /. Part[LF3, 1];
VW1 = {V11};
V22 = V2 /. Part[LF3, 2];
VW2 = {V22};
Vmid1 = Vmid /. Part[LF3, 3];
VWmid = {Vmid1};
e11 = e1 /. Part[LF3, 4];
ee1 = {e11};
e22 = e2 /. Part[LF3, 5];
ee2 = {e22};
emid1 = emid /. Part[LF3, 6];
eemid = {emid1};
(* Fault *)
(* izracun napetosti med KS *)
num = stlks;
LF4 = FindRoot[{{
  - Bxupfc V2 Vmid Sin[e2 - emid] - YL2r V2^2 == 0, - (B12 + Bxupfc + B11) V2^2 + Bxupfc V2 Vmid Cos[e2 - emid] + YL2i V2^2 == 0,
  - Bxupfc Vmid V2 Sin[emid - e2] - B23 Vmid V3 Sin[emid - e3] == 0, - (Bxupfc + B23 + B22) Vmid^2 + Bxupfc Vmid V2 Cos[emid - e2] + B23 Vmid V3 Cos[emid - e3] == 0
}}, {V2, 1.}, {Vmid, 1.}, {e2, 0.35}, {emid, 0.35}];
V2ks = V2 /. Part[LF4, 1];
Vmidks = Vmid /. Part[LF4, 2];
e2ks = e2 /. Part[LF4, 3];
emidks = emid /. Part[LF4, 4];
(* izracun trajektorije *)
While[num = num - 1 > 0,
  solution = NDSolve[{delta'[t] * m - Pm == 0, delta[0] == Last[e1], delta'[0] == Last[w1]}, delta, {t, 0, tkorak}];
  e1 = (delta /. Last[solution])[tkorak];
  w1 = (delta' /. Last[solution])[tkorak];
  AppendTo[e1, e1];
  AppendTo[w1, w1];
  AppendTo[VW1, 10^-12];
  AppendTo[ee1, 10^-12];
  AppendTo[VW2, V2ks];
  AppendTo[ee2, e2ks];
  AppendTo[VWmid, Vmidks];
  AppendTo[eemid, emidks];
];
ListPlot[e1]
ListPlot[w1]
(* Post Fault *)
LF3 = FindRoot[{{
  - Bxd E1 V1 Sin[e1 - Last[e1]] - B12 V1 V2 Sin[e1 - e2] == 0, - (Bxd + B12 + B11) V1^2 + Bxd E1 V1 Cos[e1 - Last[e1]] + B12 V1 V2 Cos[e2 - e1] == 0,
  - B12 V1 V2 Sin[e2 - e1] - Bxupfc V2 Vmid Sin[e2 - emid] - YL2r V2^2 - (Vmid Ut Bxupfc Sin[e2 - emid + gama]) == 0,
  - (B12 + Bxupfc + B11) V2^2 + B12 V1 V2 Cos[e2 - e1] + Bxupfc V2 Vmid Cos[e2 - emid] + YL2i V2^2 - (V2 Ut Bxupfc Cos[gama]) - V2 Iq == 0,
  - Bxupfc Vmid V2 Sin[emid - e2] - B23 Vmid V3 Sin[emid - e3] - (-Vmid Ut Bxupfc Sin[e2 - emid + gama]) == 0,
  - (Bxupfc + B23 + B22) Vmid^2 + Bxupfc Vmid V2 Cos[emid - e2] + B23 Vmid V3 Cos[emid - e3] - (-Vmid Ut Bxupfc Cos[e2 - emid + gama]) == 0
}}, {V1, 1.}, {V2, 1.}, {Vmid, 1.}, {e1, 0.43}, {e2, 0.238}, {emid, 0.235}];
V11 = V1 /. Part[LF3, 1];
V22 = V2 /. Part[LF3, 2];
Vmid1 = Vmid /. Part[LF3, 3];
e11 = e1 /. Part[LF3, 4];
e22 = e2 /. Part[LF3, 5];
emid1 = emid /. Part[LF3, 6];
tkon = tpo;
solution = NDSolve[{{delta'[t] * m - Pm - E1 + V1[t] * Bxd + Sin[delta[t] - e1[t]] == 0, delta[0] == Last[e1], delta'[0] == Last[w1]},
  { - Bxd E1 V1[t] Sin[e1[t] - delta[t]] - B12 V1[t] V2[t] Sin[e1[t] - e2[t]] == 0,
  - (Bxd + B12 + B11) V1[t]^2 + Bxd E1 V1[t] Cos[e1[t] - delta[t]] + B12 V1[t] V2[t] Cos[e2[t] - e1[t]] == 0,
  - B12 V1[t] V2[t] Sin[e2[t] - e1[t]] - Bxupfc V2[t] Vmid[t] Sin[e2[t] - emid[t]] - YL2r V2[t]^2 - (Vmid[t] Ut Bxupfc Sin[e2[t] - emid[t] + gama]) == 0,
  - (B12 + Bxupfc + B11) V2[t]^2 + B12 V1[t] V2[t] Cos[e2[t] - e1[t]] + Bxupfc V2[t] Vmid[t] Cos[e2[t] - emid[t]] + YL2i V2[t]^2 -
  (V2[t] Ut Bxupfc Cos[gama]) - V2[t] Iq == 0,
  - Bxupfc Vmid[t] V2[t] Sin[emid[t] - e2[t]] - B23 Vmid[t] V3 Sin[emid[t] - e3] - (-Vmid[t] Ut Bxupfc Sin[e2[t] - emid[t] + gama]) == 0,
  - (Bxupfc + B23 + B22) Vmid[t]^2 + Bxupfc Vmid[t] V2[t] Cos[emid[t] - e2[t]] + B23 Vmid[t] V3 Cos[emid[t] - e3] - (-Vmid[t] Ut Bxupfc Cos[e2[t] - emid[t] + gama]) ==
  0
}}, {V1, V2, Vmid, e1, e2, emid, delta}, {t, 0, tkon}];
d1 = delta /. Part[Part[solution, 1], 7];
cm1 = delta' /. Part[Part[solution, 1], 7];
ListPlot[Table[d1[t], {t, 0, tkon, tkorak}], PlotRange -> All, PlotJoined -> True];
ListPlot[Table[cm1[t], {t, 0, tkon, tkorak}], PlotRange -> All, PlotJoined -> True];

```



9.1.2 Primer datoteke z napravo UPFC za določevanje CCT-jev po direktni metodi

```
(* P in Q iz generatorja izracunam sam ----> Eo in δo *)
tkorak = 0.001;
Ut = 0.1;
Iq = 0.0;
gamma = 85 / 180 * pi;
tkcs = 0.3;
tpo = 0.8;
stdkcs = tkcs / tkorak;
stdpo = tpo / tkorak;
m = 6.6 / (2 * pi * 60);
Sb = 1500; (* bazna moc *)
Ub = 500;
Zb = Ub^2 / Sb;
Yb = Zb^-1;
xdl = 0.27; (* tranzientna reaktanca *)
Bxd = Im[1 / (i * xdl)];
B12 = Im[1 / (i * 32.7557 / Zb)];
B23 = Im[1 / (i * 63.5786 / Zb)];
B11 = Im[1 / (-1101.1i / Zb)];
B22 = Im[1 / (-542.24i / Zb)];
MVA = 265;
Uks = 3.75;
Bxssc = Im[1 / (i * Ub^2 / MVA * (Uks / 100) / Zb)];
PL = -150. / Sb; (* P breme *)
QL = -15. / Sb;
d0 = 30 / 180 * pi;
% * 180 / pi;
V3 = 1;
e3 = 0;
V1o = 1;
e1o = d0;
```

```

(* LF vozlišca 2 *)
LF1 = FindRoot[{- B12 V1o V2 Sin[ $\theta_2 - \theta_{1o}$ ] - Bxsssc V2 Vmid Sin[ $\theta_2 - \theta_{mid}$ ] - PL == 0,
  - (B11 + B12 + Bxsssc) V22 + B12 V1o V2 Cos[ $\theta_2 - \theta_{1o}$ ] + Bxsssc V2 Vmid Cos[ $\theta_2 - \theta_{mid}$ ] - QL == 0,
  - Bxsssc Vmid V2 Sin[ $\theta_{mid} - \theta_2$ ] - B23 Vmid V3 Sin[ $\theta_{mid} - \theta_3$ ] == 0,
  - (Bxsssc + B22 + B23) Vmid2 + Bxsssc Vmid V2 Cos[ $\theta_{mid} - \theta_2$ ] + B23 Vmid V3 Cos[ $\theta_{mid} - \theta_3$ ] == 0},
  {V2, 1.}, {Vmid, 1}, { $\theta_2$ , 0.47}, { $\theta_{mid}$ , 0.34}]
V22 = V2 /. Part[LF1, 1];
Vmidd = Vmid /. Part[LF1, 2];
 $\theta_{22}$  =  $\theta_2$  /. Part[LF1, 3];
 $\theta_{midd}$  =  $\theta_{mid}$  /. Part[LF1, 4];
(* Vozlišce 1 proti 2 *)
(* netomac kaze enako *)
"P2="
(- B12 V1o V22 Sin[ $\theta_{1o} - \theta_{22}$ ]) * 1500
Pm = P = % / 1500;
"Q2="
(- ((B11 + B12) V1o2 - (B12 V1o V22 Cos[ $\theta_{1o} - \theta_{22}$ ])) * 1500)
Q = % / 1500;
(* LF vozlišca 1 in 2 *)
(* vzamem moci iz prejšnjega LF *)
Ug = Cos[d0] + i * Sin[d0];
I0 = (P - Q i) / (1 (Cos[d0] - i Sin[d0]));
EE = 1 (Cos[d0] + i Sin[d0]) + xd i * I0;
"E="
E1 = Abs[EE]
" $\delta_0$ ="
 $\delta_0$  = Arg[EE];
% * 180 /  $\pi$ 
(* vse OK *)
(* LF vozlišca 1, 2, Mid *)
LF2 = FindRoot[{- Bxd E1 V1 Sin[ $\theta_1 - \delta_0$ ] - B12 V1 V2 Sin[ $\theta_1 - \theta_2$ ] == 0, - (Bxd + B12 + B11) V12 + Bxd E1 V1 Cos[ $\theta_1 - \delta_0$ ] + B12 V1 V2 Cos[ $\theta_2 - \theta_1$ ] == 0,
  - B12 V1 V2 Sin[ $\theta_2 - \theta_1$ ] - Bxsssc V2 Vmid Sin[ $\theta_2 - \theta_{mid}$ ] - PL == 0,
  - (B12 + Bxsssc + B11) V22 + B12 V1 V2 Cos[ $\theta_2 - \theta_1$ ] + Bxsssc V2 Vmid Cos[ $\theta_2 - \theta_{mid}$ ] - QL == 0,
  - Bxsssc Vmid V2 Sin[ $\theta_{mid} - \theta_2$ ] - B23 Vmid V3 Sin[ $\theta_{mid} - \theta_3$ ] == 0,
  - (Bxsssc + B23 + B22) Vmid2 + Bxsssc Vmid V2 Cos[ $\theta_{mid} - \theta_2$ ] + B23 Vmid V3 Cos[ $\theta_{mid} - \theta_3$ ] == 0
  }, {V1, 1.}, {V2, 1.}, {Vmid, 1.}, { $\theta_1$ , 0.47}, { $\theta_2$ , 0.35}, { $\theta_{mid}$ , 0.35}]
VW1 = VW2 =  $\theta\theta_1$  =  $\theta\theta_2$  = VVmid =  $\theta\theta_{mid}$  = {};
 $\delta_1$  = { $\delta_0$ };
 $\omega_1$  = {0};
YL2 = (PL - QL * i) / V222;
YL2r = Re[YL2];
YL2i = Im[YL2];
VW1 = VW2 =  $\theta\theta_1$  =  $\theta\theta_2$  = {};
LF3 = FindRoot[{- Bxd E1 V1 Sin[ $\theta_1 - \delta_0$ ] - B12 V1 V2 Sin[ $\theta_1 - \theta_2$ ] == 0, - (Bxd + B12 + B11) V12 + Bxd E1 V1 Cos[ $\theta_1 - \delta_0$ ] + B12 V1 V2 Cos[ $\theta_2 - \theta_1$ ] == 0,
  - B12 V1 V2 Sin[ $\theta_2 - \theta_1$ ] - Bxsssc V2 Vmid Sin[ $\theta_2 - \theta_{mid}$ ] - YL2r V22 == 0,
  - (B12 + Bxsssc + B11) V22 + B12 V1 V2 Cos[ $\theta_2 - \theta_1$ ] + Bxsssc V2 Vmid Cos[ $\theta_2 - \theta_{mid}$ ] + YL2i V22 == 0,
  - Bxsssc Vmid V2 Sin[ $\theta_{mid} - \theta_2$ ] - B23 Vmid V3 Sin[ $\theta_{mid} - \theta_3$ ] == 0,
  - (Bxsssc + B23 + B22) Vmid2 + Bxsssc Vmid V2 Cos[ $\theta_{mid} - \theta_2$ ] + B23 Vmid V3 Cos[ $\theta_{mid} - \theta_3$ ] == 0
  }, {V1, 1.}, {V2, 1.}, {Vmid, 1.}, { $\theta_1$ , 0.47}, { $\theta_2$ , 0.35}, { $\theta_{mid}$ , 0.35}]
V11 = V1 /. Part[LF3, 1];
VW1 = {V11};
V22 = V2 /. Part[LF3, 2];
VW2 = {V22};
Vmidd = Vmid /. Part[LF3, 3];
VWmid = {Vmidd};
 $\theta_{11}$  =  $\theta_1$  /. Part[LF3, 4];
 $\theta\theta_1$  = { $\theta_{11}$ };
 $\theta_{22}$  =  $\theta_2$  /. Part[LF3, 5];
 $\theta\theta_2$  = { $\theta_{22}$ };
 $\theta_{midd}$  =  $\theta_{mid}$  /. Part[LF3, 6];
 $\theta\theta_{mid}$  = { $\theta_{midd}$ };

```

```

(* Fault *)
(* izracun napetosti med KS *)
num = stdks;
LF4 = FindRoot[{
  - Bxsssc V2 Vmid Sin[ $\theta 2 - \theta mid$ ] - YL2r V22 == 0, - (B12 + Bxsssc + B11) V22 + Bxsssc V2 Vmid Cos[ $\theta 2 - \theta mid$ ] + YL2i V22 == 0,
  - Bxsssc Vmid V2 Sin[ $\theta mid - \theta 2$ ] - B23 Vmid V3 Sin[ $\theta mid - \theta 3$ ] == 0,
  - (Bxsssc + B23 + B22) Vmid2 + Bxsssc Vmid V2 Cos[ $\theta mid - \theta 2$ ] + B23 Vmid V3 Cos[ $\theta mid - \theta 3$ ] == 0
}, {V2, 1.}, {Vmid, 1.}, { $\theta 2$ , 0.35}, { $\theta mid$ , 0.35}];
V2ks = V2 /. Part[LF4, 1];
Vmidks = Vmid /. Part[LF4, 2];
 $\theta 2ks = \theta 2$  /. Part[LF4, 3];
 $\theta midks = \theta mid$  /. Part[LF4, 4];
(* izracun trajektorije *)
While[(num = num - 1) >= 0,
  solution = NDSolve[{delta'[t] * m - Pm == 0, delta[0] == Last[ $\delta 1$ ], delta'[0] == Last[ $\omega 1$ ]}, delta, {t, 0, tkorak}];
   $\delta 1 =$  (delta /. Last[solution])[tkorak];
   $\omega 1 =$  (delta' /. Last[solution])[tkorak];
  AppendTo[ $\delta 1$ ,  $\delta 1$ ];
  AppendTo[ $\omega 1$ ,  $\omega 1$ ];
  AppendTo[VV1, 10-12];
  AppendTo[ $\theta \theta 1$ , 10-12];
  AppendTo[VV2, V2ks];
  AppendTo[ $\theta \theta 2$ ,  $\theta 2ks$ ];
  AppendTo[VVmid, Vmidks];
  AppendTo[ $\theta \theta mid$ ,  $\theta midks$ ];
];
ListPlot[ $\delta 1$ ]
ListPlot[ $\omega 1$ ]
(* Post Fault *)
(*Energijske funkcije*)
n = 1;
VV11 = VV22 = VVmid = {1};
 $\theta \theta 11 =$  {0.47};
 $\theta \theta 22 =$  {0.35};
 $\theta \theta mid =$  {0.23};
While[n ≤ Length[VV1],
   $\delta 0 =$  Part[ $\delta 1$ , n];
  LF5 = FindRoot[{
    - Bxd E1 V1 Sin[ $\theta 1 - \delta 0$ ] - B12 V1 V2 Sin[ $\theta 1 - \theta 2$ ] == 0, - (Bxd + B12 + B11) V12 + Bxd E1 V1 Cos[ $\theta 1 - \delta 0$ ] + B12 V1 V2 Cos[ $\theta 2 - \theta 1$ ] == 0,
    - B12 V1 V2 Sin[ $\theta 2 - \theta 1$ ] - Bxsssc V2 Vmid Sin[ $\theta 2 - \theta mid$ ] - YL2r V22 - (Vmid Ut Bxsssc Sin[ $\theta 2 - \theta mid + \gamma$ ]) == 0,
    - (B12 + Bxsssc + B11) V22 + B12 V1 V2 Cos[ $\theta 2 - \theta 1$ ] + Bxsssc V2 Vmid Cos[ $\theta 2 - \theta mid$ ] + YL2i V22 - (V2 Ut Bxsssc Cos[ $\gamma$ ]) - V2 Iq == 0,
    - Bxsssc Vmid V2 Sin[ $\theta mid - \theta 2$ ] - B23 Vmid V3 Sin[ $\theta mid - \theta 3$ ] - (-Vmid Ut Bxsssc Sin[ $\theta 2 - \theta mid + \gamma$ ]) == 0,
    - (Bxsssc + B23 + B22) Vmid2 + Bxsssc Vmid V2 Cos[ $\theta mid - \theta 2$ ] + B23 Vmid V3 Cos[ $\theta mid - \theta 3$ ] - (-Vmid Ut Bxsssc Cos[ $\theta 2 - \theta mid + \gamma$ ]) == 0
  }, {V1, Last[VV11]}, {V2, Last[VV22]}, {Vmid, Last[VVmid]}, { $\theta 1$ , Last[ $\theta \theta 11$ ]}, { $\theta 2$ , Last[ $\theta \theta 22$ ]}, { $\theta mid$ , Last[ $\theta \theta mid$ ]}];
  V11 = V1 /. Part[LF5, 1];
  AppendTo[VV11, V11];
  V22 = V2 /. Part[LF5, 2];
  AppendTo[VV22, V22];
  Vmid = Vmid /. Part[LF5, 3];
  AppendTo[VVmid, Vmid];
   $\theta 11 = \theta 1$  /. Part[LF5, 4];
  AppendTo[ $\theta \theta 11$ ,  $\theta 11$ ];
   $\theta 22 = \theta 2$  /. Part[LF5, 5];
  AppendTo[ $\theta \theta 22$ ,  $\theta 22$ ];
   $\theta mid = \theta mid$  /. Part[LF5, 6];
  AppendTo[ $\theta \theta mid$ ,  $\theta mid$ ];
  n = n + 1;
]

```

```

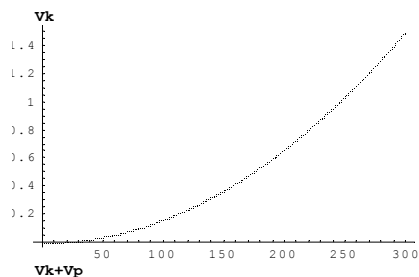
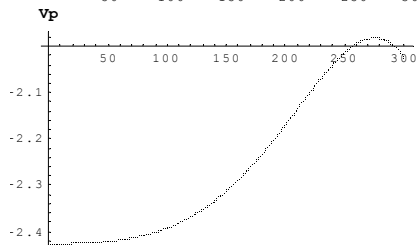
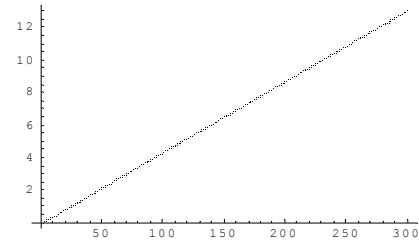
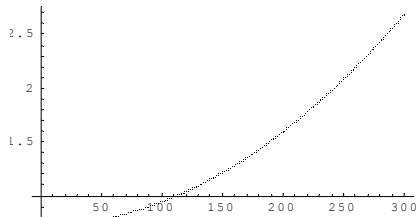
(* Fault *)
(* izracun napetosti med KS *)
num = stdks;
LF4 = FindRoot[{
  - Bxsssc V2 Vmid Sin[ $\theta 2 - \theta mid$ ] - YL2r V22 == 0, - (B12 + Bxsssc + B11) V22 + Bxsssc V2 Vmid Cos[ $\theta 2 - \theta mid$ ] + YL2i V22 == 0,
  - Bxsssc Vmid V2 Sin[ $\theta mid - \theta 2$ ] - B23 Vmid V3 Sin[ $\theta mid - \theta 3$ ] == 0,
  - (Bxsssc + B23 + B22) Vmid2 + Bxsssc Vmid V2 Cos[ $\theta mid - \theta 2$ ] + B23 Vmid V3 Cos[ $\theta mid - \theta 3$ ] == 0
}, {V2, 1.}, {Vmid, 1.}, { $\theta 2$ , 0.35}, { $\theta mid$ , 0.35}];
V2ks = V2 /. Part[LF4, 1];
Vmidks = Vmid /. Part[LF4, 2];
 $\theta 2ks = \theta 2 /. Part[LF4, 3];$ 
 $\theta midks = \theta mid /. Part[LF4, 4];$ 
(* izracun trajektorije *)
While[num = num - 1] >= 0,
  solution = NDSolve[{delta'[t] * m - Pm == 0, delta[0] == Last[ $\delta 1$ ], delta'[0] == Last[ $\omega 1$ ]}, delta, {t, 0, tkorak}];
   $\delta 1 = (delta /. Last[solution])[tkorak];$ 
   $\omega 1 = (delta' /. Last[solution])[tkorak];$ 
  AppendTo[ $\delta 1$ ,  $\delta 1$ ];
  AppendTo[ $\omega 1$ ,  $\omega 1$ ];
  AppendTo[VW1, 10-12];
  AppendTo[ $\theta e 1$ , 10-12];
  AppendTo[VW2, V2ks];
  AppendTo[ $\theta e 2$ ,  $\theta 2ks$ ];
  AppendTo[VVmid, Vmidks];
  AppendTo[ $\theta e mid$ ,  $\theta midks$ ];
];
ListPlot[ $\delta 1$ ]
ListPlot[ $\omega 1$ ]
(* Post Fault *)
(*Energijske funkcije*)
n = 1;
VW11 = VW22 = VVmid = {1};
 $\theta e 11 = \{0.47\};$ 
 $\theta e 22 = \{0.35\};$ 
 $\theta e mid = \{0.23\};$ 
While[n <= Length[VW1],
   $\delta 0 = Part[\delta 1, n];$ 
  LF5 = FindRoot[{
    - Bxd E1 V1 Sin[ $\theta 1 - \delta 0$ ] - B12 V1 V2 Sin[ $\theta 1 - \theta 2$ ] == 0, - (Bxd + B12 + B11) V12 + Bxd E1 V1 Cos[ $\theta 1 - \delta 0$ ] + B12 V1 V2 Cos[ $\theta 2 - \theta 1$ ] == 0,
    - B12 V1 V2 Sin[ $\theta 2 - \theta 1$ ] - Bxsssc V2 Vmid Sin[ $\theta 2 - \theta mid$ ] - YL2r V22 - (Vmid Ut Bxsssc Sin[ $\theta 2 - \theta mid + \text{gama}$ ]) == 0,
    - (B12 + Bxsssc + B11) V22 + B12 V1 V2 Cos[ $\theta 2 - \theta 1$ ] + Bxsssc V2 Vmid Cos[ $\theta 2 - \theta mid$ ] + YL2i V22 - (V2 Ut Bxsssc Cos[ $\text{gama}$ ]) - V2 Iq == 0,
    - Bxsssc Vmid V2 Sin[ $\theta mid - \theta 2$ ] - B23 Vmid V3 Sin[ $\theta mid - \theta 3$ ] - (Vmid Ut Bxsssc Sin[ $\theta 2 - \theta mid + \text{gama}$ ]) == 0,
    - (Bxsssc + B23 + B22) Vmid2 + Bxsssc Vmid V2 Cos[ $\theta mid - \theta 2$ ] + B23 Vmid V3 Cos[ $\theta mid - \theta 3$ ] - (Vmid Ut Bxsssc Cos[ $\theta 2 - \theta mid + \text{gama}$ ]) == 0
  }, {V1, Last[VW11]}, {V2, Last[VW22]}, {Vmid, Last[VVmid]}, { $\theta 1$ , Last[ $\theta e 11$ ]}, { $\theta 2$ , Last[ $\theta e 22$ ]}, { $\theta mid$ , Last[ $\theta e mid$ ]}];
  V11 = V1 /. Part[LF5, 1];
  AppendTo[VW11, V11];
  V22 = V2 /. Part[LF5, 2];
  AppendTo[VW22, V22];
  Vmid = Vmid /. Part[LF5, 3];
  AppendTo[VVmid, Vmid];
   $\theta 11 = \theta 1 /. Part[LF5, 4];$ 
  AppendTo[ $\theta e 11$ ,  $\theta 11$ ];
   $\theta 22 = \theta 2 /. Part[LF5, 5];$ 
  AppendTo[ $\theta e 22$ ,  $\theta 22$ ];
   $\theta mid = \theta mid /. Part[LF5, 6];$ 
  AppendTo[ $\theta e mid$ ,  $\theta mid$ ];
  n = n + 1;
]
VW11 = Drop[VW11, 1];
VW22 = Drop[VW22, 1];
VVmid = Drop[VVmid, 1];
 $\theta e 11 = Drop[\theta e 11, 1];$ 
 $\theta e 22 = Drop[\theta e 22, 1];$ 
 $\theta e mid = Drop[\theta e mid, 1];$ 
Vk = 0.5 * m *  $\omega 1$ 2;
Vp11 = - Pm *  $\delta 1$ ;
Vp12 = 0.5 * YL2i VW222;
Vp13 = - 0.5 * ((Bxd + B11 + B12) * VW112 + (B12 + B11 + Bxsssc) * VW222 + (Bxsssc + B22 + B23) * VVmid2 + (B23 + B22) * V32);
Vp14 = (Bxd * E1 * VW11 * Cos[ $\delta 1 - \theta e 11$ ] + B12 * VW11 * VW22 * Cos[ $\theta e 11 - \theta e 22$ ] + Bxsssc * VW22 * VVmid * Cos[ $\theta e mid - \theta e 22$ ] +
  B23 * VVmid * V3 * Cos[ $\theta e mid - \theta 3$ ]);
Vpupfc = - Ut Bxsssc (VW22 Cos[ $\text{gama}$ ] - VVmid Cos[ $\theta e 22 - \theta e mid + \text{gama}$ ]) - VW22 Iq;
Pkrozna = - Ut Bxsssc (VW22 Sin[ $\text{gama}$ ] + VVmid Sin[ $\theta e 22 - \theta e mid + \text{gama}$ ]);
num = Length[Vp11];

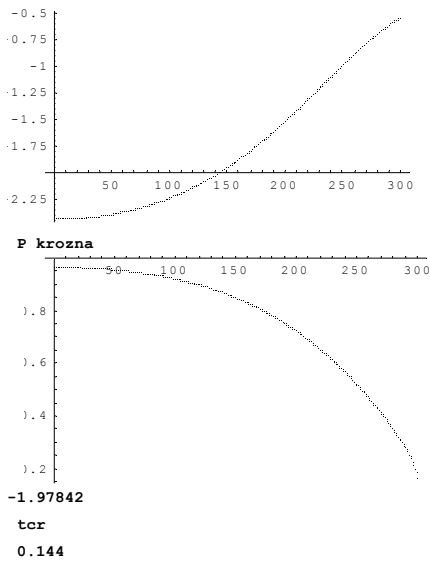
```

```

(* Moc bremen numericno *)
Vp15temp = 0;
Vp15 = {};
n = 1;
While[ n < Length[Vp11], Vp15temp = Vp15temp + (-Yl2r* Part[VW22, n]^2) * (Part[θθ22, n+1] - Part[θθ22, n]);
  AppendTo[Vp15, Vp15temp];
  n = n + 1]
AppendTo[Vp15, Vp15temp];
"Vp"
Vp = Vp11 + Vp12 + Vp13 + Vp14 + Vp15 + Vpupfc;
ListPlot[Vp]
"Vk"
ListPlot[Vk]
"Vk+Vp"
V = Vk + Vp;
ListPlot[V]
"P krozna"
ListPlot[Pkrozna]
Vcr = Max[Vp]
n = 1;
While[ (V[[n]] - Vcr < 0), n = n + 1];
"tcr"
tcr = (n - 1) * tkorak
{V2→1.02615,Vmid→1.04418,θ2→0.376797,θmid→0.244926}
P2=
1145.61
Q2=
-342.402
E=
0.960758
δ0=
42.3939
{V1→1.,V2→1.02615,Vmid→1.04418,θ1→0.523599,θ2→0.376797,θmid→0.244926}
{V1→1.,V2→1.02615,Vmid→1.04418,θ1→0.523599,θ2→0.376797,θmid→0.244926}

```





9.2 Devetvozliščni IEEE testni sistem s tremi generatorji

9.2.1 Primer datoteke z dvema napravama UPFC na zbiralki 4 in 8 za določevanje CCT-jev po direktni metodi

```

Off[General::spell]
Off[General::spell1]
Sb = 100; Ub = 230; Zb = Ub2 / Sb;
MVA = 100; Uks = 3.75;
Xxts = Im[(i Ub2 / MVA * (Uks / 100) / Zb)];
Bxts = Im[1 / (i Ub2 / MVA * (Uks / 100) / Zb)];
Bxts1 = Bxts;
Bxts2 = Bxts;
(*vod ostnae notri*)
tkorak = 0.001;
tks = 0.38;
Ut1 = 0.10;
Ut2 = 0.10;
beta1 = 300 / 180 * pi;
beta2 = 20 / 180 * pi;
deltabeta = 20 / 180 * pi;
Iq1 = 0.1;
Iq2 = 0.1;
tpo = 0.8;
stlks = tks / tkorak;
stlpo = tpo / tkorak;
m1 = 2364 / (60 pi 100); m2 = 640 / (60 pi 100); m3 = 301 / (60 pi 100);
Sb = 100;
PL5 = -125 / Sb; QL5 = -50 / Sb;
PL6 = -90 / Sb; QL6 = -30 / Sb;
PL8 = -100 / Sb; QL8 = -35 / Sb;
U1o = 1.040; e1o = 0;
U2o = 1.025; e2o = 9.3 / 180 * pi;
U3o = 1.025; e3o = 4.7 / 180 * pi;
(* podatki *)
xd1 = 0.0608;
xd2 = 0.1198;
xd3 = 0.1813;
xtr1 = 0.0576;
xtr2 = 0.0625;
xtr3 = 0.0586;
Bxd1 = Im[1 / (i xd1)];
Bxd2 = Im[1 / (i xd2)];
Bxd3 = Im[1 / (i xd3)];
Btr1 = Im[1 / (i xtr1)];
Btr2 = Im[1 / (i xtr2)];
Btr3 = Im[1 / (i xtr3)];

```

```

B45 = Im[1 / (0.01 + i 0.085)];
B45y = Im[i 0.088];
B46 = Im[1 / (0.017 + i 0.092)];
B46y = Im[i 0.079];
B75 = Im[1 / (0.032 + i 0.161)];
B75y = Im[i 0.153];
B78 = Im[1 / (0.0085 + i 0.072)];
B78y = Im[i 0.0745];
B96 = Im[1 / (0.039 + i 0.170)];
B96y = Im[i 0.179];
B98 = Im[1 / (0.0119 + i 0.1008)];
B98y = Im[i 0.1045];
(* susceptance vozli?č *)
B11 = Bxd1 + Btr1;
B22 = Bxd2 + Btr2;
B33 = Bxd3 + Btr3;
B44 = Btr1 + B45 + B45y + B46 + B46y;
B44pf = Btr1 + B45 + B45y;
B44upfc2 = B44pf + Bxts2;
B55 = B45 + B45y + B75 + B75y;
B66 = B46 + B46y + B96 + B96y;
B77 = Btr2 + B78 + B78y + B75 + B75y;
B88 = B78 + B78y + B98 + B98y;
B88pf = B98 + B98y;
B88upfc1 = B88pf + Bxts1;
B99 = Btr3 + B96 + B96y + B98 + B98y;
BFF = B78 + B78y;
BKK = B46 + B46y;
EF = BFF + Bxts1;
EK = BKK + Bxts2;
(* susceptance vodbv *)
B1v4 = Btr1;
B2v7 = Btr2;
B3v9 = Btr3;
B4v5 = B45;
B4v6 = B46;
B5v7 = B75;
B6v9 = B96;
B7v8 = B78;
B8v9 = B98;
LF = FindRoot[{- B1v4 U1o V4 Sin[e4 - e1o] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - B4v6 V4 V6 Sin[e4 - e6] = 0,
- B44 V4^2 + B1v4 U1o V4 Cos[e4 - e1o] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + B4v6 V4 V6 Cos[e4 - e6] = 0, - B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - B5v7 V5 V7 Sin[e5 - e7] - PL5 = 0,
- B55 V5^2 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] + B5v7 V5 V7 Cos[e5 - e7] - QL5 = 0, - B4v6 V4 V6 Sin[e6 - e4] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - PL6 = 0,
- B66 V6^2 + B4v6 V4 V6 Cos[e6 - e4] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - QL6 = 0, - B2v7 U2o V7 Sin[e7 - e2o] - B5v7 V5 V7 Sin[e7 - e5] - B7v8 V7 V8 Sin[e7 - e8] = 0,
- B77 V7^2 + B2v7 U2o V7 Cos[e7 - e2o] + B5v7 V5 V7 Cos[e7 - e5] + B7v8 V7 V8 Cos[e7 - e8] = 0, - B7v8 V7 V8 Sin[e8 - e7] - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - PL8 = 0,
- B88 V8^2 + B7v8 V7 V8 Cos[e8 - e7] + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - QL8 = 0, - B3v9 U3o V9 Sin[e9 - e3o] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] = 0,
- B99 V9^2 + B3v9 U3o V9 Cos[e9 - e3o] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] = 0}, {V4, 1.}, {V5, 1.}, {V6, 1.}, {V7, 1.},
{V8, 1.}, {V9, 1.}, {e4, 0}, {e5, 0}, {e6, 0}, {e7, 0}, {e8, 0}, {e9, 0}];
V44 = V4 /. Part[LF, 1]; VV4 = {V44}; V55 = V5 /. Part[LF, 2]; VV5 = {V55}; V66 = V6 /. Part[LF, 3]; VV6 = {V66}; V77 = V7 /. Part[LF, 4];
VV7 = {V77}; V88 = V8 /. Part[LF, 5]; VV8 = {V88}; V99 = V9 /. Part[LF, 6]; VV9 = {V99}; e44 = e4 /. Part[LF, 7]; ee4 = {e44};
e55 = e5 /. Part[LF, 8];
ee5 = {e55}; e66 = e6 /. Part[LF, 9]; ee6 = {e66}; e77 = e7 /. Part[LF, 10]; ee7 = {e77}; e88 = e8 /. Part[LF, 11]; ee8 = {e88};
e99 = e9 /. Part[LF, 12];
ee9 = {e99};

Em1 = B1v4 U1o V44 Sin[e44 - e1o]; Qm1 = -Btr1 U1o (U1o - V44 Cos[e44 - e1o]);
Em2 = B2v7 U2o V77 Sin[e77 - e2o]; Qm2 = -Btr2 U2o (U2o - V77 Cos[e77 - e2o]);
Em3 = B3v9 U3o V99 Sin[e99 - e3o]; Qm3 = -Btr3 U3o (U3o - V99 Cos[e99 - e3o]);
i11 = (Em1 - Qm1 * i) / U1o; i22 = (Em2 - Qm2 * i) / (U2o (Cos[e2o] - i Sin[e2o])); i33 = (Em3 - Qm3 * i) / (U3o (Cos[e3o] - i Sin[e3o]));
e11 = U1o + xd1 * i * i11; E1 = Abs[e11]; e1 = Arg[e11]; e1o = {e1};
e22 = U2o (Cos[e2o] + i Sin[e2o]) + xd2 * i * i22; E2 = Abs[e22]; e2 = Arg[e22]; e2o = {e2};
e33 = U3o (Cos[e3o] + i Sin[e3o]) + xd3 * i * i33; E3 = Abs[e33]; e3 = Arg[e33]; e3o = {e3};
w1 = w2 = w3 = {0};
YL5 = (PL5 - QL5 * i) / V55^2;
YL5r = Re[YL5];
YL5i = -Im[YL5];
YL6 = (PL6 - QL6 * i) / V66^2;
YL6r = Re[YL6];
YL6i = -Im[YL6];
YL8 = (PL8 - QL8 * i) / V88^2;
YL8r = Re[YL8];
YL8i = -Im[YL8];

```



```

LF = FindRoot[{- B1v4 V1 V4 Sin[e1 - e4] - Bxd1 V1 E1 Sin[e1 - First[δ1o]] = 0, - B11 V12 + B1v4 V1 V4 Cos[e1 - e4] + Bxd1 V1 E1 Cos[e1 - First[δ1o]] = 0,
- B2v7 V2 V7 Sin[e2 - e7] - Bxd2 V2 E2 Sin[e2 - First[δ2o]] = 0, - B22 V22 + B2v7 V2 V7 Cos[e2 - e7] + Bxd2 V2 E2 Cos[e2 - First[δ2o]] = 0,
- B3v9 V3 V9 Sin[e3 - e9] - Bxd3 V3 E3 Sin[e3 - First[δ3o]] = 0, - B33 V32 + B3v9 V3 V9 Cos[e3 - e9] + Bxd3 V3 E3 Cos[e3 - First[δ3o]] = 0,
- B1v4 V1 V4 Sin[e4 - e1] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - B4v6 V4 V6 Sin[e4 - e6] = 0,
- B44 V42 + B1v4 V1 V4 Cos[e4 - e1] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + B4v6 V4 V6 Cos[e4 - e6] = 0,
- B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - B5v7 V5 V7 Sin[e5 - e7] - YL5r * V52 = 0, - B55 V52 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] + B5v7 V5 V7 Cos[e5 - e7] - YL5i * V52 = 0,
- B4v6 V4 V6 Sin[e6 - e4] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - YL6r * V62 = 0, - B66 V62 + B4v6 V4 V6 Cos[e6 - e4] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - YL6i * V62 = 0,
- B2v7 V2 V7 Sin[e7 - e2] - B5v7 V5 V7 Sin[e7 - e5] - B7v8 V7 V8 Sin[e7 - e8] = 0,
- B77 V72 + B2v7 V2 V7 Cos[e7 - e2] + B5v7 V5 V7 Cos[e7 - e5] + B7v8 V7 V8 Cos[e7 - e8] = 0,
- B7v8 V7 V8 Sin[e8 - e7] - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - YL8r * V82 = 0, - B88 V82 + B7v8 V7 V8 Cos[e8 - e7] + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - YL8i * V82 = 0,
- B3v9 V3 V9 Sin[e9 - e3] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] = 0,
- B99 V92 + B3v9 V3 V9 Cos[e9 - e3] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] = 0}, {V1, 1.}, {V2, 1.}, {V3, 1.}, {V4, 1.},
{V5, 1.}, {V6, 1.}, {V7, 1.}, {V8, 1.}, {V9, 1.}, {e1, .1}, {e2, .1}, {e3, .1}, {e4, .1}, {e5, .1}, {e6, .1}, {e7, .1}, {e8, 0.17}, {e9, 0.17}]
V11 = V1 /. Part[LF, 1]; VV1 = {V11}; V22 = V2 /. Part[LF, 2]; VV2 = {V22}; V33 = V3 /. Part[LF, 3]; VV3 = {V33}; V44 = V4 /. Part[LF, 4];
VV4 = {V44}; V55 = V5 /. Part[LF, 5]; VV5 = {V55}; V66 = V6 /. Part[LF, 6]; VV6 = {V66}; V77 = V7 /. Part[LF, 7]; VV7 = {V77};
V88 = V8 /. Part[LF, 8]; VV8 = {V88}; V99 = V9 /. Part[LF, 9]; VV9 = {V99}; e11 = e1 /. Part[LF, 10]; e22 = e2 /. Part[LF, 11];
e33 = e3 /. Part[LF, 12]; e44 = e4 /. Part[LF, 13]; e55 = e5 /. Part[LF, 14]; e66 = e6 /. Part[LF, 15];
e77 = e7 /. Part[LF, 16]; e88 = e8 /. Part[LF, 17]; e99 = e9 /. Part[LF, 18];
(* 3 EKS *)
While[(stdks = stdks - 1) > 0,
LF3 = FindRoot[{- B1v4 V1 V4 Sin[e1 - e4] - Bxd1 V1 E1 Sin[e1 - Last[δ1o]] = 0, - B11 V12 + B1v4 V1 V4 Cos[e1 - e4] + Bxd1 V1 E1 Cos[e1 - Last[δ1o]] = 0,
- B3v9 V3 V9 Sin[e3 - e9] - Bxd3 V3 E3 Sin[e3 - Last[δ3o]] = 0, - B33 V32 + B3v9 V3 V9 Cos[e3 - e9] + Bxd3 V3 E3 Cos[e3 - Last[δ3o]] = 0,
- B1v4 V1 V4 Sin[e4 - e1] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - B4v6 V4 V6 Sin[e4 - e6] = 0,
- B44 V42 + B1v4 V1 V4 Cos[e4 - e1] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + B4v6 V4 V6 Cos[e4 - e6] = 0, - B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - YL5r * V52 = 0,
- B55 V52 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] - YL5i * V52 = 0, - B4v6 V4 V6 Sin[e6 - e4] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - YL6r * V62 = 0,
- B66 V62 + B4v6 V4 V6 Cos[e6 - e4] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - YL6i * V62 = 0, - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - YL8r * V82 = 0,
- B88 V82 + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - YL8i * V82 = 0, - B3v9 V3 V9 Sin[e9 - e3] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] = 0,
- B99 V92 + B3v9 V3 V9 Cos[e9 - e3] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] = 0},
{V1, Last[VV1]}, {V3, Last[VV3]}, {V4, Last[VV4]}, {V5, Last[VV5]}, {V6, Last[VV6]}, {V8, Last[VV8]}, {V9, Last[VV9]},
{e1, Last[e1]}, {e3, Last[e3]}, {e4, Last[e4]}, {e5, Last[e5]}, {e6, Last[e6]}, {e8, Last[e8]}, {e9, Last[e9]}];
V11 = V1 /. Part[LF3, 1]; AppendTo[VV1, V11]; V33 = V3 /. Part[LF3, 2]; AppendTo[VV3, V33];
V44 = V4 /. Part[LF3, 3]; AppendTo[VV4, V44]; V55 = V5 /. Part[LF3, 4]; AppendTo[VV5, V55]; V66 = V6 /. Part[LF3, 5];
AppendTo[VV6, V66];
V88 = V8 /. Part[LF3, 6]; AppendTo[VV8, V88]; V99 = V9 /. Part[LF3, 7]; AppendTo[VV9, V99];
e11 = e1 /. Part[LF3, 8]; AppendTo[e11, e11]; e33 = e3 /. Part[LF3, 9]; AppendTo[e33, e33];
e44 = e4 /. Part[LF3, 10]; AppendTo[e44, e44]; e55 = e5 /. Part[LF3, 11]; AppendTo[e55, e55]; e66 = e6 /. Part[LF3, 12];
AppendTo[e66, e66];
e88 = e8 /. Part[LF3, 13]; AppendTo[e88, e88]; e99 = e9 /. Part[LF3, 14]; AppendTo[e99, e99];
solution = NDSolve[{{δ1'[t] * m1 - Pm1 + E1 Last[VV1] / xdl * Sin[δ1[t] - Last[e1]] = 0, δ2'[t] * m2 - Pm2 = 0,
δ3'[t] * m3 - Pm3 + E3 Last[VV3] / xd3 * Sin[δ3[t] - Last[e3]] = 0, δ1[0] = Last[ω1], δ2[0] = Last[δ2o],
δ3[0] = Last[ω2], δ3[0] = Last[δ3o], δ3[0] = Last[ω3]}, {δ1, δ2, δ3}, {t, 0, tkorak}];
V22 = Bxd2 / B22 E2; AppendTo[VV2, V22];
e22 = e2; AppendTo[e22, e22];
V77 = 0; AppendTo[VV7, V77];
AppendTo[e77, e77];
δ1 = (δ1 /. Last[solution])[tkorak];
δ2 = (δ2 /. Last[solution])[tkorak];
δ3 = (δ3 /. Last[solution])[tkorak];
ω11 = (δ1' /. Last[solution])[tkorak];
ω22 = (δ2' /. Last[solution])[tkorak];
ω33 = (δ3' /. Last[solution])[tkorak];
AppendTo[δ1o, δ1];
AppendTo[δ2o, δ2];
AppendTo[δ3o, δ3];
AppendTo[ω1, ω11];
AppendTo[ω2, ω22];
AppendTo[ω3, ω33];];
(* izracun post fault trajektorije *)
(* prvi LF *)
Tcr360 = {};
UU1 = UU2 = UU3 = UU4 = UU5 = UU6 = UU7 = UU8 = UU9 = UUF = UUK = {};
Theta1 = Theta2 = Theta3 = Theta4 = Theta5 = Theta6 = Theta7 = Theta8 = Theta9 = ThetaK = ThetaF = {};

```

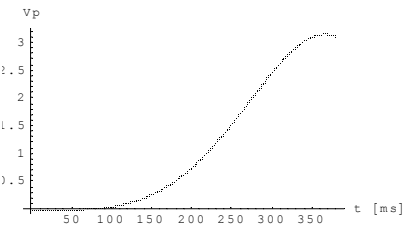
```

LF4 = FindRoot[{- Blv4 V1 V4 Sin[e1 - e4] - Bxd1 V1 E1 Sin[e1 - First[delta1o]] == 0, - B11 V1^2 + Blv4 V1 V4 Cos[e1 - e4] + Bxd1 V1 E1 Cos[e1 - First[delta1o]] == 0,
- B2v7 V2 V7 Sin[e2 - e7] - Bxd2 V2 E2 Sin[e2 - First[delta2o]] == 0, - B22 V2^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e2 - e7] + Bxd2 V2 E2 Cos[e2 - First[delta2o]] == 0,
- B3v9 V3 V9 Sin[e3 - e9] - Bxd3 V3 E3 Sin[e3 - First[delta3o]] == 0, - B33 V3^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e3 - e9] + Bxd3 V3 E3 Cos[e3 - First[delta3o]] == 0,
- Blv4 V1 V4 Sin[e4 - e1] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - Bxts2 V4 VK Sin[e4 - eK] - Bxts2 VK Ut2 Sin[e4 - eK + beta2] == 0,
- B44upfc2 V4^2 - Bxts2 V4 Ut2 Cos[beta2] - V4 Iq2 + Blv4 V1 V4 Cos[e4 - e1] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + Bxts2 V4 VK Cos[e4 - eK] == 0,
- B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - B5v7 V7 V5 Sin[e5 - e7] - YL5r * V5^2 == 0, - B55 V5^2 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] + B5v7 V7 V5 Cos[e5 - e7] - YL5i * V5^2 == 0,
- B4v6 VK V6 Sin[eK - e6] - Bxts2 VK V4 Sin[eK - e4] + Bxts2 VK Ut2 Sin[e4 - eK + beta2] == 0,
- BK VK^2 + B4v6 VK V6 Cos[eK - e6] + Bxts2 VK Ut2 Cos[e4 - eK + beta2] + Bxts2 V4 VK Cos[eK - e4] == 0,
- B4v6 VK V6 Sin[e6 - eK] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - YL6r * V6^2 == 0, - B66 V6^2 + B4v6 VK V6 Cos[e6 - eK] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - YL6i * V6^2 == 0,
- B7v8 VF V7 Sin[eF - e7] - Bxts2 VF V8 Sin[eF - e8] + Bxts1 VF Ut1 Sin[e8 - eF + beta1] == 0,
- BF VF^2 + B7v8 VF V7 Cos[eF - e7] + Bxts1 VF Ut1 Cos[e8 - eF + beta1] + Bxts2 V8 VF Cos[eF - e8] == 0,
- B2v7 V2 V7 Sin[e7 - e2] - B5v7 V5 V7 Sin[e7 - e5] - B7v8 V7 VF Sin[e7 - eF] == 0,
- B77 V7^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e7 - e2] + B5v7 V5 V7 Cos[e7 - e5] + B7v8 V7 VF Cos[e7 - eF] == 0,
- Bxts1 VF V8 Sin[e8 - eF] - Bxts1 VF Ut1 Sin[e8 - eF + beta1] - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - YL8r * V8^2 == 0,
- B88upfc1 V8^2 - Bxts1 V8 Ut1 Cos[beta1] - V8 Iq1 + Bxts1 V8 VF Cos[e8 - eF] + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - YL8i * V8^2 == 0,
- B3v9 V3 V9 Sin[e9 - e3] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] == 0,
- B99 V9^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e9 - e3] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] == 0}, {V1, 1.}, {V2, 1.}, {V3, 1.}, {V4, 1.1},
{V5, 1.}, {VK, 1.1}, {V6, 1.}, {V7, 1.}, {VF, 0.9}, {V8, 1.}, {V9, 1.}, {e1, .3}, {e2, 1.}, {e3, 1.}, {e4, .4}, {e5, .5},
{eK, .6}, {e6, .5}, {e7, 1.}, {eF, 1.}, {e8, 1.}, {e9, 1.}];
V11 = V1 /. Part[LF4, 1]; V22 = V2 /. Part[LF4, 2]; V33 = V3 /. Part[LF4, 3]; V44 = V4 /. Part[LF4, 4]; V55 = V5 /. Part[LF4, 5];
VKK = VK /. Part[LF4, 6]; V66 = V6 /. Part[LF4, 7]; V77 = V7 /. Part[LF4, 8]; VFF = VF /. Part[LF4, 9]; V88 = V8 /. Part[LF4, 10];
V99 = V9 /. Part[LF4, 11]; e11 = e1 /. Part[LF4, 12]; e22 = e2 /. Part[LF4, 13]; e33 = e3 /. Part[LF4, 14]; e44 = e4 /. Part[LF4, 15];
e55 = e5 /. Part[LF4, 16]; eKK = eK /. Part[LF4, 17]; e66 = e6 /. Part[LF4, 18]; e77 = e7 /. Part[LF4, 19]; eFF = eF /. Part[LF4, 20];
e88 = e8 /. Part[LF4, 21]; e99 = e9 /. Part[LF4, 22];
AppendTo[UU1, V11]; AppendTo[UU2, V22]; AppendTo[UU3, V33]; AppendTo[UU4, V44]; AppendTo[UU5, V55]; UUK = {VKK};
AppendTo[UU6, V66]; AppendTo[UU7, V77]; UUF = {VFF}; AppendTo[UU8, V88]; AppendTo[UU9, V99]; AppendTo[Theta1, e11];
AppendTo[Theta2, e22];
AppendTo[Theta3, e33]; AppendTo[Theta4, e44]; AppendTo[Theta5, e55]; ThetaK = {eKK}; AppendTo[Theta6, e66]; AppendTo[Theta7, e77];
ThetaF = {eFF}; AppendTo[Theta8, e88]; AppendTo[Theta9, e99];
(* nadaljni LF *)
n = tks / tkorak;
nn = 1;
While[nm <= Length[VV1],
If[Mod[nn, 100] == 0, Print[nn];
LF5 = FindRoot[{- Blv4 V1 V4 Sin[e1 - e4] - Bxd1 V1 E1 Sin[e1 - Part[delta1o, nn]] == 0,
- B11 V1^2 + Blv4 V1 V4 Cos[e1 - e4] + Bxd1 V1 E1 Cos[e1 - Part[delta1o, nn]] == 0, - B2v7 V2 V7 Sin[e2 - e7] - Bxd2 V2 E2 Sin[e2 - Part[delta2o, nn]] == 0,
- B22 V2^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e2 - e7] + Bxd2 V2 E2 Cos[e2 - Part[delta2o, nn]] == 0, - B3v9 V3 V9 Sin[e3 - e9] - Bxd3 V3 E3 Sin[e3 - Part[delta3o, nn]] == 0,
- B33 V3^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e3 - e9] + Bxd3 V3 E3 Cos[e3 - Part[delta3o, nn]] == 0,
- Blv4 V1 V4 Sin[e4 - e1] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - Bxts2 V4 VK Sin[e4 - eK] - Bxts2 VK Ut2 Sin[e4 - eK + beta2] == 0,
- B44upfc2 V4^2 - Bxts2 V4 Ut2 Cos[beta2] - V4 Iq2 + Blv4 V1 V4 Cos[e4 - e1] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + Bxts2 V4 VK Cos[e4 - eK] == 0,
- B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - B5v7 V7 V5 Sin[e5 - e7] - YL5r * V5^2 == 0, - B55 V5^2 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] + B5v7 V7 V5 Cos[e5 - e7] - YL5i * V5^2 == 0,
- B4v6 VK V6 Sin[eK - e6] - Bxts2 VK V4 Sin[eK - e4] + Bxts2 VK Ut2 Sin[e4 - eK + beta2] == 0,
- BK VK^2 + B4v6 VK V6 Cos[eK - e6] + Bxts2 VK Ut2 Cos[e4 - eK + beta2] + Bxts2 V4 VK Cos[eK - e4] == 0,
- B4v6 VK V6 Sin[e6 - eK] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - YL6r * V6^2 == 0, - B66 V6^2 + B4v6 VK V6 Cos[e6 - eK] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - YL6i * V6^2 == 0,
- B7v8 VF V7 Sin[eF - e7] - Bxts2 VF V8 Sin[eF - e8] + Bxts1 VF Ut1 Sin[e8 - eF + beta1] == 0,
- BF VF^2 + B7v8 VF V7 Cos[eF - e7] + Bxts1 VF Ut1 Cos[e8 - eF + beta1] + Bxts2 V8 VF Cos[eF - e8] == 0,
- B2v7 V2 V7 Sin[e7 - e2] - B5v7 V5 V7 Sin[e7 - e5] - B7v8 V7 VF Sin[e7 - eF] == 0,
- B77 V7^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e7 - e2] + B5v7 V5 V7 Cos[e7 - e5] + B7v8 V7 VF Cos[e7 - eF] == 0,
- Bxts1 VF V8 Sin[e8 - eF] - Bxts1 VF Ut1 Sin[e8 - eF + beta1] - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - YL8r * V8^2 == 0,
- B88upfc1 V8^2 - Bxts1 V8 Ut1 Cos[beta1] - V8 Iq1 + Bxts1 V8 VF Cos[e8 - eF] + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - YL8i * V8^2 == 0,
- B3v9 V3 V9 Sin[e9 - e3] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] == 0,
- B99 V9^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e9 - e3] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] == 0}, {V1, Last[UU1]}, {V2, Last[UU2]},
{V3, Last[UU3]}, {V4, Last[UU4]}, {V5, Last[UU5]}, {VK, Last[UUK]}, {V6, Last[UU6]}, {V7, Last[UU7]}, {VF, Last[UUF]},
{V8, Last[UU8]}, {V9, Last[UU9]}, {e1, Last[Theta1]}, {e2, Last[Theta2]}, {e3, Last[Theta3]}, {e4, Last[Theta4]},
{e5, Last[Theta5]}, {eK, Last[ThetaK]}, {e6, Last[Theta6]}, {e7, Last[Theta7]}, {eF, Last[ThetaF]}, {e8, Last[Theta8]},
{e9, Last[Theta9]}];
V11 = V1 /. Part[LF5, 1]; V22 = V2 /. Part[LF5, 2]; V33 = V3 /. Part[LF5, 3]; V44 = V4 /. Part[LF5, 4]; V55 = V5 /. Part[LF5, 5];
VKK = VK /. Part[LF5, 6]; V66 = V6 /. Part[LF5, 7]; V77 = V7 /. Part[LF5, 8]; VFF = VF /. Part[LF5, 9]; V88 = V8 /. Part[LF5, 10];
V99 = V9 /. Part[LF5, 11]; e11 = e1 /. Part[LF5, 12]; e22 = e2 /. Part[LF5, 13]; e33 = e3 /. Part[LF5, 14]; e44 = e4 /. Part[LF5, 15];
e55 = e5 /. Part[LF5, 16]; eKK = eK /. Part[LF5, 17]; e66 = e6 /. Part[LF5, 18]; e77 = e7 /. Part[LF5, 19]; eFF = eF /. Part[LF5, 20];
e88 = e8 /. Part[LF5, 21]; e99 = e9 /. Part[LF5, 22];
AppendTo[UU1, V11]; AppendTo[UU2, V22]; AppendTo[UU3, V33]; AppendTo[UU4, V44]; AppendTo[UU5, V55];
AppendTo[UUK, VKK]; AppendTo[UU6, V66]; AppendTo[UU7, V77]; AppendTo[UUF, VFF]; AppendTo[UU8, V88]; AppendTo[UU9, V99];
AppendTo[Theta1, e11]; AppendTo[Theta2, e22]; AppendTo[Theta3, e33]; AppendTo[Theta4, e44]; AppendTo[Theta5, e55];
AppendTo[ThetaK, eKK]; AppendTo[Theta6, e66]; AppendTo[Theta7, e77]; AppendTo[ThetaF, eFF]; AppendTo[Theta8, e88];
AppendTo[Theta9, e99]; nn = nn + 1;];
UU1 = Drop[UU1, 1]; UU2 = Drop[UU2, 1]; UU3 = Drop[UU3, 1]; UU4 = Drop[UU4, 1]; UU5 = Drop[UU5, 1]; UUK = Drop[UUK, 1];
UU6 = Drop[UU6, 1]; UU7 = Drop[UU7, 1]; UUF = Drop[UUF, 1]; UU8 = Drop[UU8, 1]; UU9 = Drop[UU9, 1]; Theta1 = Drop[Theta1, 1];
Theta2 = Drop[Theta2, 1]; Theta3 = Drop[Theta3, 1]; Theta4 = Drop[Theta4, 1]; Theta5 = Drop[Theta5, 1]; ThetaK = Drop[ThetaK, 1];
Theta6 = Drop[Theta6, 1]; Theta7 = Drop[Theta7, 1]; ThetaF = Drop[ThetaF, 1]; Theta8 = Drop[Theta8, 1];
Theta9 = Drop[Theta9, 1];

```

```
(* COA *)
Mt = m1 + m2 + m3;
wcoi = (m1 w1 + m2 w2 + m3 w3) / Mt;
ecoi = (m1 δ1o + m2 δ2o + m3 δ3o) / Mt;
Thetaθ1 = Theta1 - ecoi;
Thetaθ2 = Theta2 - ecoi; Thetaθ3 = Theta3 - ecoi; Thetaθ4 = Theta4 - ecoi; Thetaθ5 = Theta5 - ecoi;
Thetaθ6 = Theta6 - ecoi; Thetaθ7 = Theta7 - ecoi; ThetaθF = ThetaF - ecoi; ThetaθK = ThetaK - ecoi;
Thetaθ8 = Theta8 - ecoi; Thetaθ9 = Theta9 - ecoi;
ωω1 = ω1 - ωcoi;
ωω2 = ω2 - ωcoi;
ωω3 = ω3 - ωcoi;
dd1 = δ1o - ecoi;
dd2 = δ2o - ecoi; dd3 = δ3o - ecoi;
(* LYAFUNOV 1 *)
Vk = 0.5 (m1 * ωω12 + m2 * ωω22 + m3 * ωω32);
Vp11 = - (Pm1 * dd1 + Pm2 * dd2 + Pm3 * dd3);
Vp12 = -0.5 (YL5i UU52 + YL6i UU62 + YL8i UU82);
Vp13 = -0.5 (B11 UU12 + B22 UU22 + B33 UU32 + B44upfc2 UU42 + B55 UU52 + B66 UU62 + B77 UU72 + BF UUF2 + BK UUK2 + B88upfc1 UU82 + B99 UU92);
Vp14 = - (xd1-1 UU1 E1 Cos[Thetaθ1 - dd1] + xd2-1 UU2 E2 Cos[Thetaθ2 - dd2] + xd3-1 UU3 E3 Cos[Thetaθ3 - dd3]) +
(B1v4 UU1 UU4 Cos[Thetaθ1 - Thetaθ4] + B2v7 UU2 UU7 Cos[Thetaθ2 - Thetaθ7] + B3v9 UU3 UU9 Cos[Thetaθ3 - Thetaθ9] +
B4v5 UU4 UU5 Cos[Thetaθ4 - Thetaθ5] + Bxts1 UU4 UUK Cos[Thetaθ4 - ThetaθK] + B5v7 UU5 UU7 Cos[Thetaθ5 - Thetaθ7] +
B6v9 UU6 UU9 Cos[Thetaθ6 - Thetaθ9] + B7v8 UU7 UUF Cos[Thetaθ7 - ThetaθF] + B8v9 UU8 UU9 Cos[Thetaθ8 - Thetaθ9] +
B4v6 UUK UU6 Cos[ThetaθK - Thetaθ6] + Bxts1 UUF UU8 Cos[ThetaθF - Thetaθ8]);
VpUPFC = (Bxts1 (Ut1 UU8 Cos[beta1] - Ut1 UUF Cos[Thetaθ8 - ThetaθF + beta1]) +
Bxts2 (Ut2 UU4 Cos[beta2] - Ut2 UUK Cos[Thetaθ4 - ThetaθK + beta2])) + UU8 Iq1 + UU4 Iq2;
(* P integrirano *)
num = Length[Vp11] - 1;
Vp15temp = 0;
Vp15 = {};
n = 0;
While[(num = num - 1) >= 0,
  Vp15temp = Vp15temp + (-YL5r Part[UU5, n + 1]2) * (Part[Thetaθ5, n + 2] - Part[Thetaθ5, n + 1]) +
  (-YL6r Part[UU6, n + 1]2) * (Part[Thetaθ6, n + 2] - Part[Thetaθ6, n + 1]) +
  (-YL8r Part[UU8, n + 1]2) * (Part[Thetaθ8, n + 2] - Part[Thetaθ8, n + 1]);
  AppendTo[Vp15, Vp15temp];
  n = n + 1;
];
AppendTo[Vp15, Vp15temp];
Vp = Vp11 + Vp12 + Vp13 + Vp14 + Vp15 - VpUPFC;
Vp = Vp - Part[Vp, 1];
(*ListPlot[-VpUPFC, Part[VpUPFC, 1], PlotRange -> {0, 0.6}, AxesLabel -> {"t [ms]", "Vp"}]*)
V = Vp + Vk;
Vcr = Max[Vp];
n = 1;
While[(V[[n]] - Vcr < 0), n = n + 1];
tcr = (n - 1) * tkorak;
Print[tcr];
AppendTo[Tcr360, tcr];
ListPlot[Vp, AxesLabel -> {"t [ms]", "Vp"}];
Null
{V4 1.03186, V5 1.01058, V6 1.02774, V7 1.02207, V8 1.01784, V9 1.03076, 4 -0.0379696, 5 -0.0713503, 6 -
0.0651912, 7 0.0661864, 8 0.0126394, 9 0.0357603}
{V1 -> 1.04, V2 -> 1.025, V3 -> 1.025, V4 -> 1.03186, V5 -> 1.01058, V6 -> 1.02774, V7 -> 1.02207, V8 -> 1.01784, V9 -> 1.03076, θ1 -> 1.47014 × 10-17,
θ2 -> 0.162316, θ3 -> 0.0820305, θ4 -> -0.0379696, θ5 -> -0.0713503, θ6 -> -0.0651912, θ7 -> 0.0661864, θ8 -> 0.0126394, θ9 -> 0.0357603}
100
200
300
300
```

FindRoot::lstol : The line search decreased the step size to within tolerance specified by AccuracyGoal and PrecisionGoal but was unable to find a sufficient decrease in the merit function. You may need more than MachinePrecision digits of working precision to meet these tolerances. [More...](#)
0.251



9.2.2 Primer datoteke z dvema napravama UPFC na zbiralki 4 in 8 za določevanje optimalnega kota za prvi nihaj

```

Off[General::spell]
Off[General::spell1]
start = Date[];
Sb = 100; Ub = 230; Zb = Ub2 / Sb;
MVA = 100; Uks = 3.75;
Xxts = Im[ (i Ub2 / MVA * (Uks / 100) / Zb) ];
Bxts = Im[ 1 / (i Ub2 / MVA * (Uks / 100) / Zb) ];
Bxts1 = Bxts;
Bxts2 = Bxts;
(* vod ostnae notri *)
tkorak = 0.001;
tkorakPRE = 0.001;
tks = 0.259;
Ut1 = 0.20;
Ut2 = 0.20;
Iq1 = 0.1;
Iq2 = 0.1;
stdks = tks / tkorakPRE;
stdpo = tpo / tkorak;
m1 = 2364 / (60 π 100); m2 = 640 / (60 π 100); m3 = 301 / (60 π 100);
Sb = 100;
FL5 = -125 / Sb; QL5 = -50 / Sb;
FL6 = -90 / Sb; QL6 = -30 / Sb;
FL8 = -100 / Sb; QL8 = -35 / Sb;
U1o = 1.040; e1o = 0;
U2o = 1.025; e2o = 9.3 / 180 * π;
U3o = 1.025; e3o = 4.7 / 180 * π;
(* podatki *)
xd1 = 0.0608;
xd2 = 0.1198;
xd3 = 0.1813;
xtr1 = 0.0576;
xtr2 = 0.0625;
xtr3 = 0.0586;
Bxd1 = Im[ 1 / (i xd1) ];
Bxd2 = Im[ 1 / (i xd2) ];
Bxd3 = Im[ 1 / (i xd3) ];
Btr1 = Im[ 1 / (i xtr1) ];
Btr2 = Im[ 1 / (i xtr2) ];
Btr3 = Im[ 1 / (i xtr3) ];
B45 = Im[ 1 / (0.01 + i 0.085) ];
B45y = Im[ i 0.088 ];
B46 = Im[ 1 / (0.017 + i 0.092) ];
B46y = Im[ i 0.079 ];
B75 = Im[ 1 / (0.032 + i 0.161) ];
B75y = Im[ i 0.153 ];
B78 = Im[ 1 / (0.0085 + i 0.072) ];
B78y = Im[ i 0.0745 ];
B96 = Im[ 1 / (0.039 + i 0.170) ];
B96y = Im[ i 0.179 ];
B98 = Im[ 1 / (0.0119 + i 0.1008) ];
B98y = Im[ i 0.1045 ];
(* susceptance vozli?č *)
B11 = Bxd1 + Btr1;
B22 = Bxd2 + Btr2;
B33 = Bxd3 + Btr3;
B44 = Btr1 + B45 + B45y + B46 + B46y;
B44pf = Btr1 + B45 + B45y;
B44upfc2 = B44pf + Bxts2;
B55 = B45 + B45y + B75 + B75y;
B66 = B46 + B46y + B96 + B96y;
B77 = Btr2 + B78 + B78y + B75 + B75y;
B88 = B78 + B78y + B98 + B98y;
B88pf = B98 + B98y;
B88upfc1 = B88pf + Bxts1;
B99 = Btr3 + B96 + B96y + B98 + B98y;
EFF = B78 + B78y;
EKK = B46 + B46y;
BF = EFF + Bxts1;
EK = EKK + Bxts2;

```

```
(* susceptance vodov *)
B1v4 = Btr1;
B2v7 = Btr2;
B3v9 = Btr3;
B4v5 = B45;
B4v6 = B46;
B5v7 = B75;
B6v9 = B96;
B7v8 = B78;
B8v9 = B98;
LF = FindRoot[{- B1v4 U1o V4 Sin[e4 - e1o] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - B4v6 V4 V6 Sin[e4 - e6] == 0,
- B44 V4^2 + B1v4 U1o V4 Cos[e4 - e1o] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + B4v6 V4 V6 Cos[e4 - e6] == 0,
- B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - B5v7 V5 V7 Sin[e5 - e7] - PL5 == 0, - B55 V5^2 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] + B5v7 V5 V7 Cos[e5 - e7] - QL5 == 0,
- B4v6 V4 V6 Sin[e6 - e4] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - PL6 == 0, - B66 V6^2 + B4v6 V4 V6 Cos[e6 - e4] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - QL6 == 0,
- B2v7 U2o V7 Sin[e7 - e2o] - B5v7 V5 V7 Sin[e7 - e5] - B7v8 V7 V8 Sin[e7 - e8] == 0,
- B77 V7^2 + B2v7 U2o V7 Cos[e7 - e2o] + B5v7 V5 V7 Cos[e7 - e5] + B7v8 V7 V8 Cos[e7 - e8] == 0,
- B7v8 V7 V8 Sin[e8 - e7] - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - PL8 == 0, - B88 V8^2 + B7v8 V7 V8 Cos[e8 - e7] + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - QL8 == 0,
- B3v9 U3o V9 Sin[e9 - e3o] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] == 0,
- B99 V9^2 + B3v9 U3o V9 Cos[e9 - e3o] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] == 0}, {V4, 1.}, {V5, 1.}, {V6, 1.},
{V7, 1.}, {V8, 1.}, {V9, 1.}, {e4, 0}, {e5, 0}, {e6, 0}, {e7, 0}, {e8, 0}, {e9, 0}]
V44 = V4 /. Part[LF, 1]; VV4 = {V44}; V55 = V5 /. Part[LF, 2]; VV5 = {V55}; V66 = V6 /. Part[LF, 3]; VV6 = {V66}; V77 = V7 /. Part[LF, 4];
VV7 = {V77}; V88 = V8 /. Part[LF, 5]; VV8 = {V88}; V99 = V9 /. Part[LF, 6]; VV9 = {V99}; e44 = e4 /. Part[LF, 7]; ee4 = {e44};
e55 = e5 /. Part[LF, 8]; ee5 = {e55}; e66 = e6 /. Part[LF, 9]; ee6 = {e66}; e77 = e7 /. Part[LF, 10]; ee7 = {e77}; e88 = e8 /. Part[LF, 11];
ee8 = {e88}; e99 = e9 /. Part[LF, 12]; ee9 = {e99};
Pm1 = B1v4 U1o V44 Sin[ee4 - e1o]; Qm1 = -Btr1 U1o (U1o - V44 Cos[ee4 - e1o]);
Pm2 = B2v7 U2o V77 Sin[ee7 - e2o]; Qm2 = -Btr2 U2o (U2o - V77 Cos[ee7 - e2o]);
Pm3 = B3v9 U3o V99 Sin[ee9 - e3o]; Qm3 = -Btr3 U3o (U3o - V99 Cos[ee9 - e3o]);
i11 = (Pm1 - Qm1 * i) / U1o; i22 = (Pm2 - Qm2 * i) / (U2o (Cos[ee2o] - i Sin[ee2o])); i33 = (Pm3 - Qm3 * i) / (U3o (Cos[ee3o] - i Sin[ee3o]));
e11 = U1o + xdl * i * i11; E1 = Abs[e11]; e1 = Arg[e11]; e1o = {e1};
e22 = U2o (Cos[ee2o] + i Sin[ee2o]) + xdl * i * i22; E2 = Abs[e22]; e2 = Arg[e22]; e2o = {e2};
e33 = U3o (Cos[ee3o] + i Sin[ee3o]) + xdl * i * i33; E3 = Abs[e33]; e3 = Arg[e33]; e3o = {e3};
w1 = w2 = w3 = {0};
YL5 = (PL5 - QL5 * i) / V55^2; YL5r = Re[YL5]; YL5i = -Im[YL5];
YL6 = (PL6 - QL6 * i) / V66^2; YL6r = Re[YL6]; YL6i = -Im[YL6];
YL8 = (PL8 - QL8 * i) / V88^2; YL8r = Re[YL8]; YL8i = -Im[YL8];
LF = FindRoot[{- B1v4 V1 V4 Sin[e1 - e4] - Bxd1 V1 E1 Sin[e1 - e1] == 0, - B11 V1^2 + B1v4 V1 V4 Cos[e1 - e4] + Bxd1 V1 E1 Cos[e1 - e1] == 0,
- B2v7 V2 V7 Sin[e2 - e7] - Bxd2 V2 E2 Sin[e2 - e2] == 0, - B22 V2^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e2 - e7] + Bxd2 V2 E2 Cos[e2 - e2] == 0,
- B3v9 V3 V9 Sin[e3 - e9] - Bxd3 V3 E3 Sin[e3 - e3] == 0, - B33 V3^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e3 - e9] + Bxd3 V3 E3 Cos[e3 - e3] == 0,
- B1v4 V1 V4 Sin[e4 - e1] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - B4v6 V4 V6 Sin[e4 - e6] == 0,
- B44 V4^2 + B1v4 V1 V4 Cos[e4 - e1] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + B4v6 V4 V6 Cos[e4 - e6] == 0,
- B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - B5v7 V5 V7 Sin[e5 - e7] - YL5r * V5^2 == 0, - B55 V5^2 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] + B5v7 V5 V7 Cos[e5 - e7] - YL5i * V5^2 == 0,
- B4v6 V4 V6 Sin[e6 - e4] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - YL6r * V6^2 == 0, - B66 V6^2 + B4v6 V4 V6 Cos[e6 - e4] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - YL6i * V6^2 == 0,
- B2v7 V2 V7 Sin[e7 - e2] - B5v7 V5 V7 Sin[e7 - e5] - B7v8 V7 V8 Sin[e7 - e8] == 0,
- B77 V7^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e7 - e2] + B5v7 V5 V7 Cos[e7 - e5] + B7v8 V7 V8 Cos[e7 - e8] == 0,
- B7v8 V7 V8 Sin[e8 - e7] - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - YL8r * V8^2 == 0, - B88 V8^2 + B7v8 V7 V8 Cos[e8 - e7] + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - YL8i * V8^2 == 0,
- B3v9 V3 V9 Sin[e9 - e3] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] == 0,
- B99 V9^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e9 - e3] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] == 0}, {V1, 1.}, {V2, 1.}, {V3, 1.},
{V4, 1.}, {V5, 1.}, {V6, 1.}, {V7, 1.}, {V8, 1.}, {V9, 1.}, {e1, .1}, {e2, .1}, {e3, .1}, {e4, .1}, {e5, .1}, {e6, .1},
{e7, .1}, {e8, 0.17}, {e9, 0.17}]
V11 = V1 /. Part[LF, 1]; VV1 = {V11}; V22 = V2 /. Part[LF, 2]; VV2 = {V22}; V33 = V3 /. Part[LF, 3]; VV3 = {V33}; V44 = V4 /. Part[LF, 4];
VV4 = {V44}; V55 = V5 /. Part[LF, 5]; VV5 = {V55}; V66 = V6 /. Part[LF, 6]; VV6 = {V66}; V77 = V7 /. Part[LF, 7]; VV7 = {V77};
V88 = V8 /. Part[LF, 8];
VV8 = {V88}; V99 = V9 /. Part[LF, 9]; VV9 = {V99}; e11 = e1 /. Part[LF, 10]; ee1 = {e11}; e22 = e2 /. Part[LF, 11]; ee2 = {e22};
e33 = e3 /. Part[LF, 12]; ee3 = {e33}; e44 = e4 /. Part[LF, 13]; ee4 = {e44}; e55 = e5 /. Part[LF, 14]; ee5 = {e55};
e66 = e6 /. Part[LF, 15];
ee6 = {e66}; e77 = e7 /. Part[LF, 16]; ee7 = {e77}; e88 = e8 /. Part[LF, 17]; ee8 = {e88}; e99 = e9 /. Part[LF, 18]; ee9 = {e99};
(* 3 EKS *)
While[(stdks = stdks - 1) > 0,
LF3 = FindRoot[{- B1v4 V1 V4 Sin[e1 - e4] - Bxd1 V1 E1 Sin[e1 - Last[e1o]] == 0,
- B11 V1^2 + B1v4 V1 V4 Cos[e1 - e4] + Bxd1 V1 E1 Cos[e1 - Last[e1o]] == 0, - B3v9 V3 V9 Sin[e3 - e9] - Bxd3 V3 E3 Sin[e3 - Last[e3o]] == 0,
- B33 V3^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e3 - e9] + Bxd3 V3 E3 Cos[e3 - Last[e3o]] == 0,
- B1v4 V1 V4 Sin[e4 - e1] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - B4v6 V4 V6 Sin[e4 - e6] == 0,
- B44 V4^2 + B1v4 V1 V4 Cos[e4 - e1] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + B4v6 V4 V6 Cos[e4 - e6] == 0, - B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - YL5r * V5^2 == 0,
- B55 V5^2 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] - YL5i * V5^2 == 0, - B4v6 V4 V6 Sin[e6 - e4] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - YL6r * V6^2 == 0,
- B66 V6^2 + B4v6 V4 V6 Cos[e6 - e4] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - YL6i * V6^2 == 0, - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - YL8r * V8^2 == 0,
- B88 V8^2 + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - YL8i * V8^2 == 0, - B3v9 V3 V9 Sin[e9 - e3] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] == 0,
- B99 V9^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e9 - e3] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] == 0},
{V1, Last[VV1]}, {V3, Last[VV3]}, {V4, Last[VV4]}, {V5, Last[VV5]}, {V6, Last[VV6]}, {V8, Last[VV8]}, {V9, Last[VV9]},
{e1, Last[ee1]}, {e3, Last[ee3]}, {e4, Last[ee4]}, {e5, Last[ee5]}, {e6, Last[ee6]}, {e8, Last[ee8]}, {e9, Last[ee9]};
```

```

V11 = V1 /. Part[LF3, 1]; AppendTo[VV1, V11]; V33 = V3 /. Part[LF3, 2]; AppendTo[VV3, V33];
V44 = V4 /. Part[LF3, 3]; AppendTo[VV4, V44]; V55 = V5 /. Part[LF3, 4]; AppendTo[VV5, V55]; V66 = V6 /. Part[LF3, 5];
AppendTo[VV6, V66];
V88 = V8 /. Part[LF3, 6]; AppendTo[VV8, V88]; V99 = V9 /. Part[LF3, 7]; AppendTo[VV9, V99];
e11 = e1 /. Part[LF3, 8]; AppendTo[ee1, e11]; e33 = e3 /. Part[LF3, 9]; AppendTo[ee3, e33];
e44 = e4 /. Part[LF3, 10]; AppendTo[ee4, e44]; e55 = e5 /. Part[LF3, 11]; AppendTo[ee5, e55]; e66 = e6 /. Part[LF3, 12];
AppendTo[ee6, e66];
e88 = e8 /. Part[LF3, 13]; AppendTo[ee8, e88]; e99 = e9 /. Part[LF3, 14]; AppendTo[ee9, e99];

solution = NDSolve[{{δ1'[t] * m1 - Pm1 + E1 Last[VV1] / xdl * Sin[δ1[t] - Last[ee1]] = 0, δ2'[t] * m2 - Pm2 = 0,
δ3'[t] * m3 - Pm3 + E3 Last[VV3] / xdl * Sin[δ3[t] - Last[ee3]] = 0, δ1[0] = Last[δ1o], δ1'[0] = Last[ω1],
δ2[0] = Last[δ2o], δ2'[0] = Last[ω2], δ3[0] = Last[δ3o], δ3'[0] = Last[ω3]}, {t, 0, tkorakPRE}];

δ1 = (δ1 /. Last[solution]) [tkorakPRE];
δ2 = (δ2 /. Last[solution]) [tkorakPRE];
δ3 = (δ3 /. Last[solution]) [tkorakPRE];
ω11 = (δ1' /. Last[solution]) [tkorakPRE];
ω22 = (δ2' /. Last[solution]) [tkorakPRE];
ω33 = (δ3' /. Last[solution]) [tkorakPRE];
AppendTo[δ1o, δ1];
AppendTo[δ2o, δ2];
AppendTo[δ3o, δ3];
AppendTo[ω1, ω11];
AppendTo[ω2, ω22];
AppendTo[ω3, ω33];
];
(* zacetek iskanja opt *)

δ1POST = {δ1}; δ2POST = {δ2}; δ3POST = {δ3}; ω1POST = {ω11}; ω2POST = {ω22}; ω3POST = {ω33};
δ1POSTcoi = δ2POSTcoi = δ3POSTcoi = ω1POSTcoi = ω2POSTcoi = ω3POSTcoi = {};
V11a = 0.93; V22a = 0.79; V33a = 0.89; V44a = 0.83; V55a = 0.75; V66a = 0.9; V77a = 0.76; V88a = 0.78; V99a = 0.85; VFFa = 0.81;
VKKa = 0.99;
e11a = 0.29; e22a = 1.43; e33a = 1.03; e44a = 0.45; e55a = 0.58; e66a = 0.53; e77a = 1.1; e88a = 1.1; e99a = 0.94; eFFa = 0.92;
eKKa = 0.42;
tkoncni = 0;
deltat = 0.01;
tpo = 0.6;
betaoptlst = beta2optlst = {};
betaopt = -50/180 * Pi;
beta2opt = -20/180 * Pi;
beta2 = beta2opt;
While[tkoncni < tpo,
Print[tkoncni];
razlikaVt360360 = {};
deltabeta = 5/180 * Pi;
zbeta1 = betaopt - 2 * deltabeta;
kbeta1 = betaopt + 1 * deltabeta;
zbeta2 = beta2opt - 1 * deltabeta;
kbeta2 = beta2opt + 2 * deltabeta;
beta1 = zbeta1;
While[beta1 <= kbeta1,
razlikaVt360 = {};
beta2 = zbeta2;
While[beta2 <= kbeta2,
LF4 = FindRoot[{-B1v4 V1 V4 Sin[e1 - e4] - Bxd1 V1 E1 Sin[e1 - Last[δ1POST]] = 0,
-B11 V1^2 + B1v4 V1 V4 Cos[e1 - e4] + Bxd1 V1 E1 Cos[e1 - Last[δ1POST]] = 0, -B2v7 V2 V7 Sin[e2 - e7] - Bxd2 V2 E2 Sin[e2 - Last[δ2POST]] = 0,
-B22 V2^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e2 - e7] + Bxd2 V2 E2 Cos[e2 - Last[δ2POST]] = 0, -B3v9 V3 V9 Sin[e3 - e9] - Bxd3 V3 E3 Sin[e3 - Last[δ3POST]] = 0,
-B33 V3^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e3 - e9] + Bxd3 V3 E3 Cos[e3 - Last[δ3POST]] = 0,
-B1v4 V1 V4 Sin[e4 - e1] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - Bxts2 V4 VK Sin[e4 - eK] - Bxts2 VK Ut2 Sin[e4 - eK + beta2] = 0,
-B44upfc2 V4^2 - Bxts2 V4 Ut2 Cos[beta2] - V4 Iq2 + B1v4 V1 V4 Cos[e4 - e1] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + Bxts2 V4 VK Cos[e4 - eK] = 0,
-B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - B5v7 V7 V5 Sin[e5 - e7] - YL5r * V5^2 = 0, -B55 V5^2 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] + B5v7 V7 V5 Cos[e5 - e7] - YL5i * V5^2 = 0,
-B4v6 VK V6 Sin[eK - e6] - Bxts2 VK V4 Sin[eK - e4] + Bxts2 VK Ut2 Sin[e4 - eK + beta2] = 0,
-BK VK^2 + B4v6 VK V6 Cos[eK - e6] + Bxts2 VK Ut2 Cos[e4 - eK + beta2] + Bxts2 V4 VK Cos[eK - e4] = 0,
-B4v6 VK V6 Sin[e6 - eK] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - YL6r * V6^2 = 0,
-B66 V6^2 + B4v6 VK V6 Cos[e6 - eK] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - YL6i * V6^2 = 0,
-B7v8 VF V7 Sin[eF - e7] - Bxts2 VF V8 Sin[eF - e8] + Bxts1 VF Ut1 Sin[e8 - eF + beta1] = 0,
-BF VF^2 + B7v8 VF V7 Cos[eF - e7] + Bxts1 VF Ut1 Cos[e8 - eF + beta1] + Bxts2 V8 VF Cos[eF - e8] = 0,
-B2v7 V2 V7 Sin[e7 - e2] - B5v7 V5 V7 Sin[e7 - e5] - B7v8 V7 VF Sin[e7 - eF] = 0,
-B77 V7^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e7 - e2] + B5v7 V5 V7 Cos[e7 - e5] + B7v8 V7 VF Cos[e7 - eF] = 0,
-Bxts1 VF V8 Sin[e8 - eF] - Bxts1 VF Ut1 Sin[e8 - eF + beta1] - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - YL8r * V8^2 = 0,
-B88upfc1 V8^2 - Bxts1 V8 Ut1 Cos[beta1] - V8 Iq1 + Bxts1 V8 VF Cos[e8 - eF] + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - YL8i * V8^2 = 0,
-B3v9 V3 V9 Sin[e9 - e3] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] = 0,
-B99 V9^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e9 - e3] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] = 0}, {V1, V11a}, {V2, V22a}, {V3, V33a},
{V4, V44a}, {V5, V55a}, {VK, VKKa}, {V6, V66a}, {V7, V77a}, {VF, VFFa}, {V8, V88a}, {V9, V99a}, {e1, e11a}, {e2, e22a},
{e3, e33a}, {e4, e44a}, {e5, e55a}, {eK, eKKa}, {e6, e66a}, {e7, e77a}, {eF, eFFa}, {e8, e88a}, {e9, e99a}];

```

```

V11a = V1 /. Part[LF4, 1]; V22a = V2 /. Part[LF4, 2]; V33a = V3 /. Part[LF4, 3]; V44a = V4 /. Part[LF4, 4]; V55a = V5 /. Part[LF4, 5];
VKKa = VK /. Part[LF4, 6]; V66a = V6 /. Part[LF4, 7]; V77a = V7 /. Part[LF4, 8]; VFFa = VF /. Part[LF4, 9]; V88a = V8 /. Part[LF4, 10];
V99a = V9 /. Part[LF4, 11]; e11a = e1 /. Part[LF4, 12]; e22a = e2 /. Part[LF4, 13]; e33a = e3 /. Part[LF4, 14]; e44a = e4 /. Part[LF4, 15];
e55a = e5 /. Part[LF4, 16]; eKKa = eK /. Part[LF4, 17]; e66a = e6 /. Part[LF4, 18]; e77a = e7 /. Part[LF4, 19]; eFFa = eF /. Part[LF4, 20];
e88a = e8 /. Part[LF4, 21]; e99a = e9 /. Part[LF4, 22];
PostFault = NDSolve[{{Omega1'[t] * m1 - Pm1 + E1 * V1[t] / xd1 * Sin[delta1[t] - e1[t]] == 0, Omega1[0] == Last[omega1POST]},
{Omega2'[t] * m2 - Pm2 + E2 * V2[t] / xd2 * Sin[delta2[t] - e2[t]] == 0, Omega2[0] == Last[omega2POST]},
{Omega3'[t] * m3 - Pm3 + E3 * V3[t] / xd3 * Sin[delta3[t] - e3[t]] == 0, Omega3[0] == Last[omega3POST]},
{Omega1[t] == delta1'[t], delta1[0] == Last[delta1POST]}, {Omega2[t] == delta2'[t], delta2[0] == Last[delta2POST]},
{Omega3[t] == delta3'[t], delta3[0] == Last[delta3POST]},
{- B1v4 V1[t] V4[t] Sin[e1[t] - e4[t]] - Bxd1 V1[t] E1 Sin[e1[t] - delta1[t]] == 0,
- B11 V1[t]^2 + B1v4 V1[t] V4[t] Cos[e1[t] - e4[t]] + Bxd1 V1[t] E1 Cos[e1[t] - delta1[t]] == 0,
- B2v7 V2[t] V7[t] Sin[e2[t] - e7[t]] - Bxd2 V2[t] E2 Sin[e2[t] - delta2[t]] == 0,
- B22 V2[t]^2 + B2v7 V2[t] V7[t] Cos[e2[t] - e7[t]] + Bxd2 V2[t] E2 Cos[e2[t] - delta2[t]] == 0,
- B3v9 V3[t] V9[t] Sin[e3[t] - e9[t]] - Bxd3 V3[t] E3 Sin[e3[t] - delta3[t]] == 0,
- B33 V3[t]^2 + B3v9 V3[t] V9[t] Cos[e3[t] - e9[t]] + Bxd3 V3[t] E3 Cos[e3[t] - delta3[t]] == 0,
- B1v4 V1[t] V4[t] Sin[e4[t] - e1[t]] - B4v5 V4[t] V5[t] Sin[e4[t] - e5[t]] - Bxts2 V4[t] VK[t] Sin[e4[t] - eK[t]] -
  Bxts2 VK[t] Vt2 Sin[e4[t] - eK[t]] + beta2 == 0,
- B44upfc2 V4[t]^2 + B1v4 V1[t] V4[t] Cos[e4[t] - e1[t]] + B4v5 V4[t] V5[t] Cos[e4[t] - e5[t]] + Bxts2 V4[t] VK[t] Cos[e4[t] - eK[t]] -
  Bxts2 V4[t] Vt2 Cos[beta2] - V4[t] Iq2 == 0,
- B4v5 V4[t] V5[t] Sin[e5[t] - e4[t]] - B5v7 V7[t] V5[t] Sin[e5[t] - e7[t]] - YL5r * V5[t]^2 == 0,
- B55 V5[t]^2 + B4v5 V4[t] V5[t] Cos[e5[t] - e4[t]] + B5v7 V7[t] V5[t] Cos[e5[t] - e7[t]] - YL5i * V5[t]^2 == 0,
- B4v6 VK[t] V6[t] Sin[eK[t] - e6[t]] - Bxts2 VK[t] V4[t] Sin[eK[t] - e4[t]] + Bxts2 VK[t] Vt2 Sin[e4[t] - eK[t]] + beta2 == 0,
- BK VK[t]^2 + B4v6 VK[t] V6[t] Cos[eK[t] - e6[t]] + Bxts2 VK[t] Vt2 Cos[e4[t] - eK[t]] + beta2 + Bxts2 V4[t] VK[t] Cos[eK[t] - e4[t]] == 0,
- B4v6 VK[t] V6[t] Sin[e6[t] - eK[t]] - B6v9 V6[t] V9[t] Sin[e6[t] - e9[t]] - YL6r * V6[t]^2 == 0,
- B66 V6[t]^2 + B4v6 VK[t] V6[t] Cos[e6[t] - eK[t]] + B6v9 V6[t] V9[t] Cos[e6[t] - e9[t]] - YL6i * V6[t]^2 == 0,
- B7v8 VF[t] V7[t] Sin[eF[t] - e7[t]] - Bxts1 VF[t] V8[t] Sin[eF[t] - e8[t]] + Bxts1 VF[t] Vt1 Sin[e8[t] - eF[t]] + beta1 == 0,
- BF VF[t]^2 + B7v8 VF[t] V7[t] Cos[eF[t] - e7[t]] + Bxts1 VF[t] Vt1 Cos[e8[t] - eF[t]] + beta1 + Bxts2 V8[t] VF[t] Cos[eF[t] - e8[t]] == 0,
- B2v7 V2[t] V7[t] Sin[e7[t] - e2[t]] - B5v7 V5[t] V7[t] Sin[e7[t] - e5[t]] - B7v8 V7[t] VF[t] Sin[e7[t] - eF[t]] == 0,
- B77 V7[t]^2 + B2v7 V2[t] V7[t] Cos[e7[t] - e2[t]] + B5v7 V5[t] V7[t] Cos[e7[t] - e5[t]] + B7v8 V7[t] VF[t] Cos[e7[t] - eF[t]] == 0,
- Bxts1 VF[t] V8[t] Sin[e8[t] - eF[t]] - Bxts1 VF[t] Vt1 Sin[e8[t] - eF[t]] + beta1 - B8v9 V8[t] V9[t] Sin[e8[t] - e9[t]] - YL8r * V8[t]^2 == 0,
- B88upfc1 V8[t]^2 - Bxts1 V8[t] Vt1 Cos[beta1] - V8[t] Iq1 + Bxts1 V8[t] VF[t] Cos[e8[t] - eF[t]] + B8v9 V8[t] V9[t] Cos[e8[t] - e9[t]] -
  YL8i * V8[t]^2 == 0,
- B3v9 V3[t] V9[t] Sin[e9[t] - e3[t]] - B6v9 V6[t] V9[t] Sin[e9[t] - e6[t]] - B8v9 V8[t] V9[t] Sin[e9[t] - e8[t]] == 0,
- B99 V9[t]^2 + B3v9 V3[t] V9[t] Cos[e9[t] - e3[t]] + B6v9 V6[t] V9[t] Cos[e9[t] - e6[t]] + B8v9 V8[t] V9[t] Cos[e9[t] - e8[t]] == 0},
{{V1[0] == V11a}, {V2[0] == V22a}, {V3[0] == V33a}, {V4[0] == V44a}, {V5[0] == V55a}, {V6[0] == V66a}, {V7[0] == V77a},
{V8[0] == V88a}, {V9[0] == V99a}, {VK[0] == VKKa}, {VF[0] == VFFa}, {e1[0] == e11a}, {e2[0] == e22a}, {e3[0] == e33a}, {e4[0] == e44a},
{e5[0] == e55a}, {e6[0] == e66a}, {e7[0] == e77a}, {e8[0] == e88a}, {e9[0] == e99a}, {eK[0] == eKKa}, {eF[0] == eFFa}},
{delta1, delta2, delta3, Omega1, Omega2, Omega3, V1, V2, V3, V4, V5, VK, V6, V7, VF, V8, V9, e1, e2, e3, e4, e5, eK, e6, e7, eF, e8, e9},
{t, 0, deltat}
];
resultks = Part[PostFault, 1];
ddd1 = delta1 /. Part[resultks, 1]; d1 = ddd1[0]; ddd1 = ddd1[deltat];
ddd2 = delta2 /. Part[resultks, 2]; d2 = ddd2[0]; ddd2 = ddd2[deltat];
ddd3 = delta3 /. Part[resultks, 3]; d3 = ddd3[0]; ddd3 = ddd3[deltat];
Om1 = Omega1 /. Part[resultks, 4]; o1 = Om1[0]; oo1 = Om1[deltat];
Om2 = Omega2 /. Part[resultks, 5]; o2 = Om2[0]; oo2 = Om2[deltat];
Om3 = Omega3 /. Part[resultks, 6]; o3 = Om3[0]; oo3 = Om3[deltat];
V11 = V1 /. Part[resultks, 7]; u1 = V11[0]; uu1 = V11[deltat];
V22 = V2 /. Part[resultks, 8]; u2 = V22[0]; uu2 = V22[deltat];
V33 = V3 /. Part[resultks, 9]; u3 = V33[0]; uu3 = V33[deltat];
V44 = V4 /. Part[resultks, 10]; u4 = V44[0]; uu4 = V44[deltat];
V55 = V5 /. Part[resultks, 11]; u5 = V55[0]; uu5 = V55[deltat];
v51st = Table[V55[t], {t, 0, deltat, tkorak}];
VKK = VK /. Part[resultks, 12]; uK = VKK[0]; uuK = VKK[deltat];
V66 = V6 /. Part[resultks, 13]; u6 = V66[0]; uu6 = V66[deltat];
v61st = Table[V66[t], {t, 0, deltat, tkorak}];
V77 = V7 /. Part[resultks, 14]; u7 = V77[0]; uu7 = V77[deltat];
VFF = VF /. Part[resultks, 15]; uF = VFF[0]; uuF = VFF[deltat];
V88 = V8 /. Part[resultks, 16]; u8 = V88[0]; uu8 = V88[deltat];
v81st = Table[V88[t], {t, 0, deltat, tkorak}];
V99 = V9 /. Part[resultks, 17]; u9 = V99[0]; uu9 = V99[deltat];
e11 = e1 /. Part[resultks, 18]; t1 = e11[0]; tt1 = e11[deltat];
e22 = e2 /. Part[resultks, 19]; t2 = e22[0]; tt2 = e22[deltat];
e33 = e3 /. Part[resultks, 20]; t3 = e33[0]; tt3 = e33[deltat];
e44 = e4 /. Part[resultks, 21]; t4 = e44[0]; tt4 = e44[deltat];
e55 = e5 /. Part[resultks, 22]; t5 = e55[0]; tt5 = e55[deltat];
t51st = Table[e55[t], {t, 0, deltat, tkorak}];
eKK = eK /. Part[resultks, 23]; tK = eKK[0]; ttK = eKK[deltat];
e66 = e6 /. Part[resultks, 24]; t6 = e66[0]; tt6 = e66[deltat];
t61st = Table[e66[t], {t, 0, deltat, tkorak}];
e77 = e7 /. Part[resultks, 25]; t7 = e77[0]; tt7 = e77[deltat];
eFF = eF /. Part[resultks, 26]; tF = eFF[0]; ttF = eFF[deltat];
e88 = e8 /. Part[resultks, 27]; t8 = e88[0]; tt8 = e88[deltat];
t81st = Table[e88[t], {t, 0, deltat, tkorak}];
e99 = e9 /. Part[resultks, 28]; t9 = e99[0];
tt9 = e99[deltat];

```

```
(* izračun EF PRE*)
(* COA PRE*)
Mt = m1 + m2 + m3;
ωcoi = (m1 c1 + m2 c2 + m3 c3) / Mt;
θcoi = (m1 d1 + m2 d2 + m3 d3) / Mt;
o1coi = o1 - ωcoi;
o2coi = o2 - ωcoi;
o3coi = o3 - ωcoi;
d1coi = d1 - θcoi;
d2coi = d2 - θcoi;
d3coi = d3 - θcoi;
Theta1 = t1 - θcoi; Theta2 = t2 - θcoi; Theta3 = t3 - θcoi; Theta4 = t4 - θcoi; Theta5 = t5 - θcoi; Theta6 = t6 - θcoi;
Theta7 = t7 - θcoi;
Theta8 = t8 - θcoi; Theta9 = t9 - θcoi; ThetaF = tF - θcoi; ThetaK = tK - θcoi;
(* LYAFUNOV PRE*)
Vk = 0.5 (m1 * o1coi2 + m2 * o2coi2 + m3 * o3coi2);
(*Vk=0.5 (o1coi2+o2coi2+o3coi2);*)
Vp11 = - (Pm1 * d1coi + Pm2 * d2coi + Pm3 * d3coi);
Vp12 = - 0.5 (YL5i u52 + YL6i u62 + YL8i u82);
Vp13 = - 0.5 (B11 u12 + B22 u22 + B33 u32 + B44upfc2 u42 + B55 u52 + B66 u62 + B77 u72 + B88upfc1 u82 + B99 u92 + BF uF2 + BK uK2);
Vp14 = - (xd1-1 u1 E1 Cos[Theta1 - d1coi] + xd2-1 u2 E2 Cos[Theta2 - d2coi] + xd3-1 u3 E3 Cos[Theta3 - d3coi]) +
  ( B1v4 u1 u4 Cos[Theta1 - Theta4] + B2v7 u7 u2 Cos[Theta7 - Theta2] +
    B3v9 u3 u9 Cos[Theta3 - Theta9] + B4v5 u4 u5 Cos[Theta4 - Theta5] + B4v6 uK u6 Cos[ThetaK - Theta6] +
    B5v7 u5 u7 Cos[Theta5 - Theta7] + B6v9 u6 u9 Cos[Theta6 - Theta9] + B7v8 u7 uF Cos[Theta7 - ThetaF] +
    B8v9 u8 u9 Cos[Theta8 - Theta9] + Bxts2 u4 uK Cos[Theta4 - ThetaK] + Bxts1 uF u8 Cos[ThetaF - Theta8] );
VpUPFC = Bxts1 Ut1 u8 Cos[beta1] - Bxts1 Ut1 uF Cos[Theta8 - ThetaF + beta1] + Bxts2 Ut2 u4 Cos[beta2] -
  Bxts2 Ut2 uK Cos[Theta4 - ThetaK + beta2] + u8 Iq1 + u4 Iq2;
VpPRE = - Vk + Vp11 + Vp12 + Vp13 + Vp14 - VpUPFC;
(* VpPRE=Vp11+Vp12+Vp13+Vp14-VpUPFC;*)
(* izračun EF POST*)
(* COA POST*)
Mt = m1 + m2 + m3;
ωcoi = (m1 oo1 + m2 oo2 + m3 oo3) / Mt;
θcoi = (m1 dd1 + m2 dd2 + m3 dd3) / Mt;
(*ωcoi=(o1+o2+o3)/3;
θcoi=(d1+d2+d3)/3;*)
Theta1 = tt1 - θcoi; Theta2 = tt2 - θcoi; Theta3 = tt3 - θcoi; Theta4 = tt4 - θcoi; Theta5 = tt5 - θcoi; Theta6 = tt6 - θcoi;
Theta7 = tt7 - θcoi;
Theta8 = tt8 - θcoi; Theta9 = tt9 - θcoi; Thetaamid = ttmid - θcoi;
oolcoi = ool - ωcoi;
oo2coi = oo2 - ωcoi;
oo3coi = oo3 - ωcoi;
dd1coi = dd1 - θcoi;
dd2coi = dd2 - θcoi;
dd3coi = dd3 - θcoi;
(* LYAFUNOV POST*)
Vk = 0.5 (m1 * oo1coi2 + m2 * oo2coi2 + m3 * oo3coi2);
(*Vk=0.5 (oo1coi2+oo2coi2+oo3coi2);*)
Vp11 = - (Pm1 * dd1coi + Pm2 * dd2coi + Pm3 * dd3coi);
Vp12 = - 0.5 (YL5i uu52 + YL6i uu62 + YL8i uu82);
Vp13 = - 0.5 (B11 uu12 + B22 uu22 + B33 uu32 + B44upfc2 uu42 + B55 uu52 + B66 uu62 + B77 uu72 + B88upfc1 uu82 + B99 uu92 + BF uuF2 + BK uuK2);
Vp14 = - (xd1-1 uu1 E1 Cos[Theta1 - dd1coi] + xd2-1 uu2 E2 Cos[Theta2 - dd2coi] + xd3-1 uu3 E3 Cos[Theta3 - dd3coi]) +
  ( B1v4 uu1 uu4 Cos[Theta1 - Theta4] + B2v7 uu7 uu2 Cos[Theta7 - Theta2] +
    B3v9 uu3 uu9 Cos[Theta3 - Theta9] + B4v5 uu4 uu5 Cos[Theta4 - Theta5] + B4v6 uuK uu6 Cos[ThetaK - Theta6] +
    B5v7 uu5 uu7 Cos[Theta5 - Theta7] + B6v9 uu6 uu9 Cos[Theta6 - Theta9] + B7v8 uu7 uuF Cos[Theta7 - ThetaF] +
    B8v9 uu8 uu9 Cos[Theta8 - Theta9] + Bxts2 uu4 uuK Cos[Theta4 - ThetaK] + Bxts1 uuF uu8 Cos[ThetaF - Theta8] );
VpUPFC = Bxts1 Ut1 uu8 Cos[beta1] - Bxts1 Ut1 uuF Cos[Theta8 - ThetaF + beta1] + Bxts2 Ut2 uu4 Cos[beta2] -
  Bxts2 Ut2 uuK Cos[Theta4 - ThetaK + beta2] + uu8 Iq1 + uu4 Iq2;
(* P integrirano *)
Vp15 = 0;
n = 0;
While[n < deltat / tkorak,
  Vp15 = Vp15 + (- YL5r Part[v51st, n + 1]2 * (Part[t51st, n + 2] - Part[t51st, n + 1]) +
    (- YL6r Part[v61st, n + 1]2 * (Part[t61st, n + 2] - Part[t61st, n + 1]) +
    (- YL8r Part[v81st, n + 1]2 * (Part[t81st, n + 2] - Part[t81st, n + 1]));
  n = n + 1];
VpPOST = - Vk + Vp11 + Vp12 + Vp13 + Vp14 + Vp15 - VpUPFC;
(* VpPOST=Vp11+Vp12+Vp13+Vp14+Vp15-VpUPFC;*)
razlikaVt = VpPOST - VpPRE;
AppendTo[razlikaVt360, razlikaVt];
beta2 = beta2 + deltabeta];
AppendTo[razlikaVt360360, razlikaVt360];
beta1 = beta1 + deltabeta];
```



```

pozicija1 = First[First[Position[razlikaVt360360, Max[razlikaVt360360]]]];
pozicija2 = Last[First[Position[razlikaVt360360, Max[razlikaVt360360]]]];
(* blokiram casovno*)
If[tkoncnii < 0.5, betalopt = zbeta1 + (pozicija1 - 1) * deltabeta];
If[tkoncnii < 0.5, beta2opt = zbeta2 + (pozicija2 - 1) * deltabeta];
(* konec iskanja opt *)
beta1 = betalopt;
beta2 = beta2opt;
Print[betalopt*180 / Pi]; Print[beta2opt*180 / Pi];
AppendTo[betaloptlst, betalopt]; AppendTo[beta2optlst, beta2opt];
(* nadaljni LF *)
LF4 = FindRoot[{- Blv4 V1 V4 Sin[e1 - e4] - Bxd1 V1 E1 Sin[e1 - Last[delta1POST]] == 0,
- B11 V1^2 + Blv4 V1 V4 Cos[e1 - e4] + Bxd1 V1 E1 Cos[e1 - Last[delta1POST]] == 0, - B2v7 V2 V7 Sin[e2 - e7] - Bxd2 V2 E2 Sin[e2 - Last[delta2POST]] == 0,
- B22 V2^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e2 - e7] + Bxd2 V2 E2 Cos[e2 - Last[delta2POST]] == 0, - B3v9 V3 V9 Sin[e3 - e9] - Bxd3 V3 E3 Sin[e3 - Last[delta3POST]] == 0,
- B33 V3^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e3 - e9] + Bxd3 V3 E3 Cos[e3 - Last[delta3POST]] == 0,
- Blv4 V1 V4 Sin[e4 - e1] - B4v5 V4 V5 Sin[e4 - e5] - Bxts2 V4 VK Sin[e4 - eK] - Bxts2 VK Ut2 Sin[e4 - eK + beta2] == 0,
- B44upfc2 V4^2 - Bxts2 V4 Ut2 Cos[beta2] - V4 Iq2 + Blv4 V1 V4 Cos[e4 - e1] + B4v5 V4 V5 Cos[e4 - e5] + Bxts2 V4 VK Cos[e4 - eK] == 0,
- B4v5 V4 V5 Sin[e5 - e4] - B5v7 V7 V5 Sin[e5 - e7] - YL5r * V5^2 == 0, - B55 V5^2 + B4v5 V4 V5 Cos[e5 - e4] + B5v7 V7 V5 Cos[e5 - e7] - YL5i * V5^2 == 0,
- B4v6 VK V6 Sin[eK - e6] - Bxts2 VK V4 Sin[eK - e4] + Bxts2 VK Ut2 Sin[e4 - eK + beta2] == 0,
- BK VK^2 + B4v6 VK V6 Cos[eK - e6] + Bxts2 VK Ut2 Cos[e4 - eK + beta2] + Bxts2 V4 VK Cos[eK - e4] == 0,
- B4v6 VK V6 Sin[e6 - eK] - B6v9 V6 V9 Sin[e6 - e9] - YL6r * V6^2 == 0, - B66 V6^2 + B4v6 VK V6 Cos[e6 - eK] + B6v9 V6 V9 Cos[e6 - e9] - YL6i * V6^2 == 0,
- B7v8 VF V7 Sin[eF - e7] - Bxts2 VF V8 Sin[eF - e8] + Bxts1 VF Ut1 Sin[e8 - eF + beta1] == 0,
- BF VF^2 + B7v8 VF V7 Cos[eF - e7] + Bxts1 VF Ut1 Cos[e8 - eF + beta1] + Bxts2 V8 VF Cos[eF - e8] == 0,
- B2v7 V2 V7 Sin[e7 - e2] - B5v7 V5 V7 Sin[e7 - e5] - B7v8 V7 VF Sin[e7 - eF] == 0,
- B77 V7^2 + B2v7 V2 V7 Cos[e7 - e2] + B5v7 V5 V7 Cos[e7 - e5] + B7v8 V7 VF Cos[e7 - eF] == 0,
- Bxts1 VF V8 Sin[e8 - eF] - Bxts1 VF Ut1 Sin[e8 - eF + beta1] - B8v9 V8 V9 Sin[e8 - e9] - YL8r * V8^2 == 0,
- B88upfc1 V8^2 - Bxts1 V8 Ut1 Cos[beta1] - V8 Iq1 + Bxts1 V8 VF Cos[e8 - eF] + B8v9 V8 V9 Cos[e8 - e9] - YL8i * V8^2 == 0,
- B3v9 V3 V9 Sin[e9 - e3] - B6v9 V6 V9 Sin[e9 - e6] - B8v9 V8 V9 Sin[e9 - e8] == 0,
- B99 V9^2 + B3v9 V3 V9 Cos[e9 - e3] + B6v9 V6 V9 Cos[e9 - e6] + B8v9 V8 V9 Cos[e9 - e8] == 0}, {V1, V11a}, {V2, V22a}, {V3, V33a},
{V4, V44a}, {V5, V55a}, {VK, VKKa}, {V6, V66a}, {V7, V77a}, {VF, VFFa}, {V8, V88a}, {V9, V99a}, {e1, e11a}, {e2, e22a},
{e3, e33a}, {e4, e44a}, {e5, e55a}, {eK, eKKa}, {e6, e66a}, {e7, e77a}, {e8, e88a}, {e9, e99a}];
V11a = V1 /. Part[LF4, 1]; V22a = V2 /. Part[LF4, 2]; V33a = V3 /. Part[LF4, 3]; V44a = V4 /. Part[LF4, 4]; V55a = V5 /. Part[LF4, 5];
VKKa = VK /. Part[LF4, 6]; V66a = V6 /. Part[LF4, 7]; V77a = V7 /. Part[LF4, 8]; VFFa = VF /. Part[LF4, 9]; V88a = V8 /. Part[LF4, 10];
V99a = V9 /. Part[LF4, 11]; e11a = e1 /. Part[LF4, 12]; e22a = e2 /. Part[LF4, 13]; e33a = e3 /. Part[LF4, 14]; e44a = e4 /. Part[LF4, 15];
e55a = e5 /. Part[LF4, 16]; eKKa = eK /. Part[LF4, 17]; e66a = e6 /. Part[LF4, 18]; e77a = e7 /. Part[LF4, 19]; e88a = e8 /. Part[LF4, 20];
e99a = e9 /. Part[LF4, 22];
PostFault = NDSolve[{{Omega1'[t] * m1 - Pm1 + E1 * V1[t] / xdl * Sin[delta1[t] - e1[t]] == 0, Omega1[0] == Last[omega1POST]},
{Omega2'[t] * m2 - Pm2 + E2 * V2[t] / xdl * Sin[delta2[t] - e2[t]] == 0, Omega2[0] == Last[omega2POST]},
{Omega3'[t] * m3 - Pm3 + E3 * V3[t] / xdl * Sin[delta3[t] - e3[t]] == 0, Omega3[0] == Last[omega3POST]},
{Omega1[t] == delta1'[t], delta1[0] == Last[delta1POST]}, {Omega2[t] == delta2'[t], delta2[0] == Last[delta2POST]},
{Omega3[t] == delta3'[t], delta3[0] == Last[delta3POST]},
{- Blv4 V1[t] V4[t] Sin[e1[t] - e4[t]] - Bxd1 V1[t] E1 Sin[e1[t] - delta1[t]] == 0,
- B11 V1[t]^2 + Blv4 V1[t] V4[t] Cos[e1[t] - e4[t]] + Bxd1 V1[t] E1 Cos[e1[t] - delta1[t]] == 0,
- B2v7 V2[t] V7[t] Sin[e2[t] - e7[t]] - Bxd2 V2[t] E2 Sin[e2[t] - delta2[t]] == 0,
- B22 V2[t]^2 + B2v7 V2[t] V7[t] Cos[e2[t] - e7[t]] + Bxd2 V2[t] E2 Cos[e2[t] - delta2[t]] == 0,
- B3v9 V3[t] V9[t] Sin[e3[t] - e9[t]] - Bxd3 V3[t] E3 Sin[e3[t] - delta3[t]] == 0,
- B33 V3[t]^2 + B3v9 V3[t] V9[t] Cos[e3[t] - e9[t]] + Bxd3 V3[t] E3 Cos[e3[t] - delta3[t]] == 0,
- Blv4 V1[t] V4[t] Sin[e4[t] - e1[t]] - B4v5 V4[t] V5[t] Sin[e4[t] - e5[t]] - Bxts2 V4[t] VK[t] Sin[e4[t] - eK[t]] -
Bxts2 VK[t] Ut2 Sin[e4[t] - eK[t] + beta2] == 0,
- B44upfc2 V4[t]^2 + Blv4 V1[t] V4[t] Cos[e4[t] - e1[t]] + B4v5 V4[t] V5[t] Cos[e4[t] - e5[t]] + Bxts2 V4[t] VK[t] Cos[e4[t] - eK[t]] -
Bxts2 V4[t] Ut2 Cos[beta2] - V4[t] Iq2 == 0,
- B4v5 V4[t] V5[t] Sin[e5[t] - e4[t]] - B5v7 V7[t] V5[t] Sin[e5[t] - e7[t]] - YL5r * V5[t]^2 == 0,
- B55 V5[t]^2 + B4v5 V4[t] V5[t] Cos[e5[t] - e4[t]] + B5v7 V7[t] V5[t] Cos[e5[t] - e7[t]] - YL5i * V5[t]^2 == 0,
- B4v6 VK[t] V6[t] Sin[eK[t] - e6[t]] - Bxts2 VK[t] V4[t] Sin[eK[t] - e4[t]] + Bxts2 VK[t] Ut2 Sin[e4[t] - eK[t] + beta2] == 0,
- BK VK[t]^2 + B4v6 VK[t] V6[t] Cos[eK[t] - e6[t]] + Bxts2 VK[t] Ut2 Cos[e4[t] - eK[t] + beta2] + Bxts2 V4[t] VK[t] Cos[eK[t] - e4[t]] == 0,
- B4v6 VK[t] V6[t] Sin[e6[t] - eK[t]] - B6v9 V6[t] V9[t] Sin[e6[t] - e9[t]] - YL6r * V6[t]^2 == 0,
- B66 V6[t]^2 + B4v6 VK[t] V6[t] Cos[e6[t] - eK[t]] + B6v9 V6[t] V9[t] Cos[e6[t] - e9[t]] - YL6i * V6[t]^2 == 0,
- B7v8 VF[t] V7[t] Sin[eF[t] - e7[t]] - Bxts2 VF[t] V8[t] Sin[eF[t] - e8[t]] + Bxts1 VF[t] Ut1 Sin[e8[t] - eF[t] + beta1] == 0,
- BF VF[t]^2 + B7v8 VF[t] V7[t] Cos[eF[t] - e7[t]] + Bxts1 VF[t] Ut1 Cos[e8[t] - eF[t] + beta1] + Bxts2 V8[t] VF[t] Cos[eF[t] - e8[t]] == 0,
- B2v7 V2[t] V7[t] Sin[e7[t] - e2[t]] - B5v7 V5[t] V7[t] Sin[e7[t] - e5[t]] - B7v8 V7[t] VF[t] Sin[e7[t] - eF[t]] == 0,
- B77 V7[t]^2 + B2v7 V2[t] V7[t] Cos[e7[t] - e2[t]] + B5v7 V5[t] V7[t] Cos[e7[t] - e5[t]] + B7v8 V7[t] VF[t] Cos[e7[t] - eF[t]] == 0,
- Bxts1 VF[t] V8[t] Sin[e8[t] - eF[t]] - Bxts1 VF[t] Ut1 Sin[e8[t] - eF[t] + beta1] - B8v9 V8[t] V9[t] Sin[e8[t] - e9[t]] - YL8r * V8[t]^2 == 0,
- B88upfc1 V8[t]^2 - Bxts1 V8[t] Ut1 Cos[beta1] - V8[t] Iq1 + Bxts1 V8[t] VF[t] Cos[e8[t] - eF[t]] + B8v9 V8[t] V9[t] Cos[e8[t] - e9[t]] -
YL8i * V8[t]^2 == 0,
- B3v9 V3[t] V9[t] Sin[e9[t] - e3[t]] - B6v9 V6[t] V9[t] Sin[e9[t] - e6[t]] - B8v9 V8[t] V9[t] Sin[e9[t] - e8[t]] == 0,
- B99 V9[t]^2 + B3v9 V3[t] V9[t] Cos[e9[t] - e3[t]] + B6v9 V6[t] V9[t] Cos[e9[t] - e6[t]] + B8v9 V8[t] V9[t] Cos[e9[t] - e8[t]] == 0},
{{V1[0] == V11a}, {V2[0] == V22a}, {V3[0] == V33a}, {V4[0] == V44a}, {V5[0] == V55a}, {V6[0] == V66a}, {V7[0] == V77a},
{V8[0] == V88a}, {V9[0] == V99a}, {VK[0] == VKKa}, {VF[0] == VFFa}, {e1[0] == e11a}, {e2[0] == e22a}, {e3[0] == e33a}, {e4[0] == e44a},
{e5[0] == e55a}, {e6[0] == e66a}, {e7[0] == e77a}, {e8[0] == e88a}, {e9[0] == e99a}, {eK[0] == eKKa}, {eF[0] == eFFa}},
{delta1, delta2, delta3, Omega1, Omega2, Omega3, V1, V2, V3, V4, V5, VK, V6, V7, VF, V8, V9, e1, e2, e3, e4, e5, eK, e6, e7, eF, e8, e9},
{t, 0, deltat}];

```

```

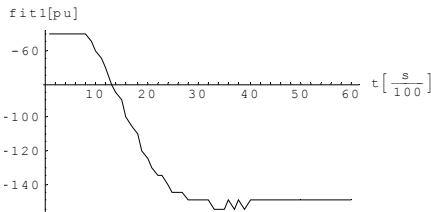
resultks = Part[PostFault, 1];
ddd1 = delta1 /. Part[resultks, 1]; dd1 = ddd1[deltat]; AppendTo[delta1POST, dd1];
ddd2 = delta2 /. Part[resultks, 2]; dd2 = ddd2[deltat]; AppendTo[delta2POST, dd2];
ddd3 = delta3 /. Part[resultks, 3]; dd3 = ddd3[deltat]; AppendTo[delta3POST, dd3];
Om1 = Omega1 /. Part[resultks, 4]; oo1 = Om1[deltat]; AppendTo[omega1POST, oo1];
Om2 = Omega2 /. Part[resultks, 5]; oo2 = Om2[deltat]; AppendTo[omega2POST, oo2];
Om3 = Omega3 /. Part[resultks, 6]; oo3 = Om3[deltat]; AppendTo[omega3POST, oo3];
Mt = m1 + m2 + m3;
omega_coi = (m1 oo1 + m2 oo2 + m3 oo3) / Mt;
theta_coi = (m1 dd1 + m2 dd2 + m3 dd3) / Mt;
oo1coi = oo1 - omega_coi; AppendTo[omega1POSTcoi, oo1coi];
oo2coi = oo2 - omega_coi; AppendTo[omega2POSTcoi, oo2coi];
oo3coi = oo3 - omega_coi; AppendTo[omega3POSTcoi, oo3coi];
dd1coi = dd1 - theta_coi; AppendTo[delta1POSTcoi, dd1coi];
dd2coi = dd2 - theta_coi; AppendTo[delta2POSTcoi, dd2coi];
dd3coi = dd3 - theta_coi; AppendTo[delta3POSTcoi, dd3coi];
tkoncni = tkoncni + deltat];

ListPlot[betaopt1st*180 / Pi, PlotJoined -> True, PlotRange -> All, AxesLabel -> {t[1/100 s], fit1[pu]}]
ListPlot[beta2opt1st*180 / Pi, PlotJoined -> True, PlotRange -> All, AxesLabel -> {t[1/100 s], fit2[pu]}]
ListPlot[delta1POSTcoi, PlotJoined -> True, PlotRange -> All, AxesLabel -> {t[1/100 s], kot_rotorja1[pu]}]
ListPlot[delta2POSTcoi, PlotJoined -> True, PlotRange -> All, AxesLabel -> {t[1/100 s], kot_rotorja2[pu]}]
ListPlot[delta3POSTcoi, PlotJoined -> True, PlotRange -> All, AxesLabel -> {t[1/100 s], kot_rotorja3[pu]}]
ListPlot[omega1POSTcoi, PlotJoined -> True, PlotRange -> All, AxesLabel -> {t[1/100 s], hitrost_rotorja1[pu]}]
ListPlot[omega2POSTcoi, PlotJoined -> True, PlotRange -> All, AxesLabel -> {t[1/100 s], hitrost_rotorja2[pu]}]
ListPlot[omega3POSTcoi, PlotJoined -> True, PlotRange -> All, AxesLabel -> {t[1/100 s], hitrost_rotorja3[pu]}]

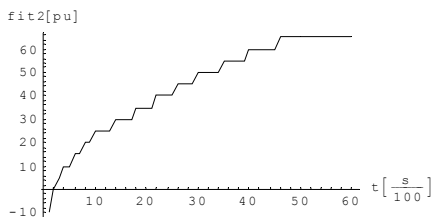
```

{V4 -> 1.03186, V5 -> 1.01058, V6 -> 1.02774, V7 -> 1.02207, V8 -> 1.01784, V9 -> 1.03076,
theta -> -0.0379696, theta5 -> -0.0713503, theta6 -> -0.0651912, theta7 -> 0.0661864, theta8 -> 0.0126394, theta9 -> 0.0357603}

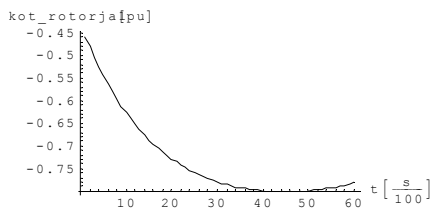
{V1 -> 1.04, V2 -> 1.025, V3 -> 1.025, V4 -> 1.03186, V5 -> 1.01058, V6 -> 1.02774, V7 -> 1.02207, V8 -> 1.01784, V9 -> 1.03076, theta1 -> 1.47014 x 10^-17,
theta2 -> 0.162316, theta3 -> 0.0820305, theta4 -> -0.0379696, theta5 -> -0.0713503, theta6 -> -0.0651912, theta7 -> 0.0661864, theta8 -> 0.0126394, theta9 -> 0.0357603}



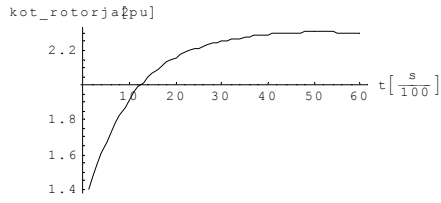
- Graphics -



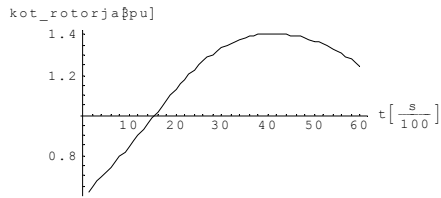
- Graphics -



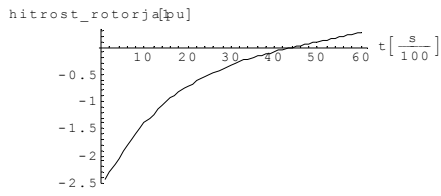
- Graphics -



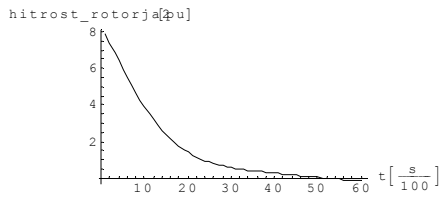
- Graphics -



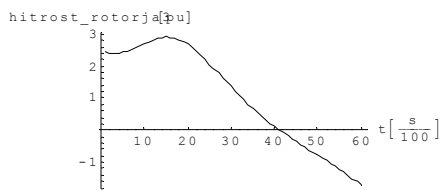
- Graphics -



- Graphics -



- Graphics -



- Graphics -