STABILIZATOR ELEKTROMEHANIČKIH NJIHANJA SINKRONOG GENERATORA ZASNOVAN NA ENERGETSKIM FUNKCIJAMA

Jerković Štil, Vedrana

Doctoral thesis / Disertacija

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:969153

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

Image not found or type unknown

ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
SVEUČILIŠTA JOSIPA JURJA STROSSMAYERA
U OSIJEKU

Vedrana Jerković Štil

STABILIZATOR ELEKTROMEHANIČKIH NJIHANJA SINKRONOG GENERATORA ZASNOVAN NA ENERGETSKIM FUNKCIJAMA

DOKTORSKA DISERTACIJA

Osijek, 2014.

Doktorska disertacija izrađena je na zavodu za elektrostrojarstvo Elektrotehničkog fakulteta Sveučilišta J. J. Strossmayera u Osijeku.

Mentor: Doc. dr. sc. Muharem Mehmedović

Doktorska disertacija ima 149 stranica.

Disertacija br.: 41

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Izv. prof. dr. sc. Robert Cupec, Elektrotehnički fakultet Osijek, predsjednik
2. Doc. dr. sc. Muharem Mehmedović, Elektrotehnički fakultet Osijek, mentor
3. Doc. dr. sc. Damir Sumina, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, član
4. Prof. dr. sc. Lajos Jozsa, Elektrotehnički fakultet Osijek, član
5. Doc. dr. sc. Tomislav Rudec, Elektrotehnički fakultet Osijek, član

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Izv. prof. dr. sc. Robert Cupec, Elektrotehnički fakultet Osijek, predsjednik
2. Doc. dr. sc. Muharem Mehmedović, Elektrotehnički fakultet Osijek, mentor
3. Doc. dr. sc. Damir Sumina, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu, član
4. Prof. dr. sc. Lajos Jozsa, Elektrotehnički fakultet Osijek, član
5. Doc. dr. sc. Tomislav Rudec, Elektrotehnički fakultet Osijek, član

Datum obrane doktorske disertacije: 16. lipnja 2014. godine

SADRŽAJ

1. Uvod ... 1

2. Pregled dosadašnjih istraživanja u području sustava regulacije sinkronog generatora ... 4

2.1. Klasični regulacijski sustav uzbude ... 4

2.2. Uzbudni sustavi s nelinearnim regulatorima ... 5

3. Model sinkronog generatora s istaknutim polovima ... 8

3.1. Modeliranje generatora u (*d,q,0*) koordinatnom sustavu ... 13

3.2. Modeliranje generatora u sustavu relativnih jedinica ... 15

3.3. Model sinkronog generatora petog reda ... 18

3.4. Stacionarno stanje generatora u paralelnom radu na EES ... 19

3.5. Početna i prijelazna stanja sinkronog generatora ... 21

3.6. Model sinkronog generatora trećeg reda ... 23

3.7. Model sinkronog generatora drugog reda ... 24

3.8. Model generatora trećeg reda u prostoru stanja ... 24

4. Upravljanje zasnovano na pasivnosti ... 27

4.1. PCH sustavi ... 28

4.1.1. Euler-Langrangeoveove i Hamiltonove jednadžbe ... 29

4.1.2. Teorija PCH sustava ... 32

4.2. Upravljanje zasnovano na strukturi i prigušenju (IDA) ... 37

4.3. Sinteza IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja ... 41

4.3.1. Dodavanje djelovanja povratne veze u regulacijsku strukturu ... 47

5. Stabilnost sustava s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja ... 51

5.1. Stabilnost forsiranih PCH sustava s disipacijom ... 52

5.1.1. Određivanje proširenog hamiltonijana forsiranog PCH sustava s disipacijom ... 52

5.1.2. Određivanje stabilnosti sustava s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja ... 55

5.2. Stabilnost lineariziranog sustava s IDA stabilizatorom elektro-mehaničkih njihanja ... 59

5.2.1. Stabilnost lineariziranog nereguliranog sustava ... 60

5.2.2. Stabilnost reguliranog sustava ... 60

6. Ispitivanje kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja ... 64

6.1. Stabilnost modeliranog sustava s obzirom na izbor parametara IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja ... 68

6.2. Utjecaj promjene parametara IDA stabilizatora na kvalitetu rada generatora 68
6.3.1. Optimiziranje kvalitete regulacije promjenom parametra IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja 69
6.3.2. Utjecaj promjene parametra $\boldsymbol{\alpha}$ na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije 77
6.3.3. Utjecaj promjene parametra $\boldsymbol{k}$ na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije 80
6.3.4. Utjecaj promjene parametra $\boldsymbol{\beta}$ na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije 83
6.3. Slijeđenje referentne vrijednosti napona generatora 86
6.4. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora u širem frekvencijskom području 90
6.5. Usporedba kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja i klasičnog regulatora 98
6.5.1. Odziv sustava na skokovitu promjenu referentne vrijednosti napona generatora 100
6.5.2. Odziv sustava na promjenu mehaničke snage turbine 105
6.5.3. Odziv sustava u slučaju kratkog spoja na sabirnici generatora 108
6.6. Određivanje granice stabilnosti generatora bez i s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja 115
6.6.1. Proniyeva analiza odziva sustava 115
6.6.2. Određivanje granice stabilnosti generatora u pogonskom dijagramu 120
7. Zaključak 122
PRILOG I : Programski kodovi 125
P.I.1. Glavni program: SG_regulacija.m 125
P.I.2. Parametri generatora: generator83.m 126
P.I.3. Parametri i početna stanja generatora: par83kVA.m 127
P.I.4. Model generatora trećeg reda: mod3reda.m 127
P.I.5. Određivanje jakobijana reguliranog generatora, model sedmog i trećeg reda: jacobi7reda.m 128
LITERATURA 129
POPIS OZNAKA 135
POPIS SLIKA 139
POPIS TABLICA 142
SAŽETAK 144
ABSTRACT 145
ŽIVOTOPIS 146

1. Uvod

Sinkroni generatori su najrašireniji izvori električne energije u mrežama izmjenične struje te njihov rad izravno utječe na stabilnost i sigurnost cijelog elektroenergetskog sustava, tj. električne mreže. U novije vrijeme javlja se značajan porast potrošnje električne energije zbog čega je potrebno elektroenergetski sustav stalno nadograđivati. Kako bi se ostvarila najveća moguća proizvodnja energije, rad generatora često se odvija vrlo blizu granice stabilnosti. Nadalje, proizvođači električne energije međusobno se natječu na slobodnom tržištu električnom energijom, što može dovesti do neočekivanih prilika u električnoj mreži. Nagli i veliki poremećaji u električnoj mreži utječu na stabilnost generatora te mogu dovesti do njegovog oštećenja i ispada s električne mreže.

Stabilnost rada generatora, a time i cijelog elektroenergetskog sustava može se povećati kvalitetnom regulacijom uzbude sinkronog generatora. Klasični regulatori koji se postavljaju u uzbudni krug sinkronog generatora su linearni regulatori. Linearni regulacijski sustav uzbude sinkronog generatora je učinkovit u slučaju pojave manjih poremećaja pri kojima se radna točka generatora ne mijenja. U slučaju većih poremećaja u elektroenergetskom sustavu dolazi do ispada pojedinih generatora i potrošača, odnosno promjene topologije električne mreže. Pri tome se mijenjaju radne točke preostalih generatora, što znači da kvaliteta regulacije linearnih regulatora pada, jer regulirani sinkroni generator spojen na električnu mrežu predstavlja složeni nelinearni sustav. Kako bi se postigla kvalitetna regulacija neovisna o radnoj točki generatora te povećala dinamička stabilnost generatora, započeo je razvoj nelinearnih regulatora za implementaciju u regulacijski krug uzbude sinkronog generatora. U ovoj disertaciji predstavljen je razvoj novog nelinearnog regulatora uzbude sinkronog generatora naziva IDA stabilizator elektromehaničkih njihanja.

U drugom poglavlju disertacije dan je pregled dosadašnjih istraživanja u području regulacije rada sinkronog generatora. Regulatori koji se danas primjenjuju u uzbudnim krugovima sinkronih generatora su klasični linearni regulatori. Najvažniji je regulator armaturnog napona generatora koji se naziva automatski regulator napona (*engl.* Automatic Voltage Regulator – AVR). Najčešće se u praksi primjenjuje proporcionalno integralni (PI) regulator. Zbog postojanja elektromehaničkih njihanja koja nastaju zbog fizikalne prirode samog stroja spojenog na mrežu (sustav s više električnih i mehaničkih spremnika energije), često se dodaje stabilizator elektromehaničkih njihanja (*engl.* Power System Stabilizer –

PSS). Njegova je zadaća prigušiti elektromehanička njihanja unutar samog generatora, ali također i elektromehanička njihanja koja mogu imati široki spektar frekvencija i javljaju se u elektroenergetskom sustavu među grupama generatora. Uz automatski regulator napona i stabilizator elektromehaničkih njihanja u uzbudni krug generatora dodaju se jedinice za ograničenje i zaštitu te mjerni instrumenti.

Cilj daljnjeg razvoja regulacije uzbude sinkronog generatora je dobiti zadovoljavajuću kvalitetu regulacije neovisnu o radnoj točki generatora. U teoriji regulacije razvija se više metoda nelinearne regulacije koje se mogu podijeliti u nekoliko smjerova: adaptivno upravljanje, linearizacija po povratnoj vezi, Lyapunovljeve metode, upravljanje zasnovano na energetskim funkcijama sustava, umjetna inteligencija i klizni način upravljanja. Osim navedenih metoda, istražuju se i njihove kombinacije, npr. kombinacija linearnih regulatora i neizrazite logike te kombinacija upravljanja energetskim funkcijama sustava i linearnih PID regulatora. Praktična primjena nelinearne regulacije u uzbudnim sustavima sinkronih generatora do sada nije izvedena. Do sada razvijani i simulacijski ispitivani nelinearni regulatori imaju funkciju stabilizatora elektromehaničkih njihanja. Daljnji smjer razvoja je napraviti sintezu nelinearnog regulatora koji bi objedinio funkcionalnost automatskog regulatora napona i stabilizatora elektromehaničkih njihanja.

Kako bi se moglo pristupiti uspješnoj sintezi nelinearnog regulatora, potrebno je dobro poznavati proces kojim se upravlja, što je u ovom slučaju sinkroni generator spojen na električnu mrežu. Stoga treće poglavlje donosi detaljno analiziran nelinearni model sinkronog generatora s istaknutim polovima u (d, q) koordinatnom sustavu rotora. Polazni model generatora sedmog reda daje se u sustavu relativnih jedinica te se potom svodi na model trećeg reda. Kako bi se dobio oblik povoljan za sintezu nelinearnog regulatora, na kraju poglavlja model sinkronog generatora s istaknutim polovima daje se u prostoru stanja.

U četvrtom poglavlju detaljno se razrađuje teorija nelinearnog upravljanja zasnovanog na pasivnosti s naglaskom na upravljanje zasnovano na strukturi i prigušenju (*engl.* Interconnection and Damping Assigment – IDA). Nakon toga se predstavlja sinteza novog upravljačkog algoritma za regulaciju uzbude na temelju energetskih funkcija sinkronog generatora, nazvanog IDA stabilizator elektromehaničkih njihanja. Novi upravljački algoritam objedinjuje funkciju automatskog regulatora napona i stabilizatora elektromehaničkih njihanja.

Ispitivanje statičke stabilnosti generatora spojenog na električnu mrežu s implementiranim IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja predmet je petog poglavlja.

Stabilnost navedenog nelinearnog sustava ispituje se na dva načina. Prvo se ispituje stabilnost zatvorenog nelinearnog regulacijskog sustava pomoću Lyapunovljevih funkcija, a zatim se sustav linearizira te se stabilnost sustava ispituje u određenim radnim točkama na temelju svojstvenih vrijednosti sustava.

U šestom poglavlju opisuje se simulacijski model sinkronog generatora s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja spojenog na električnu mrežu i ispituje se njegova kvaliteta regulacije. Ispituje se slijeđenje referentne vrijednosti napona generatora i utjecaj promjene parametara IDA stabilizatora na kvalitetu regulacije rada generatora. Također se analizira kvaliteta regulacije IDA stabilizatora u širem frekvencijskom području karakterističnom za elektromehanička njihanja unutar elektroenergetskog sustava od 0,2 do 3 Hz. Na kraju se daje usporedba kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja i klasičnog linearnog regulacijskog sustava.

Sedmo poglavlje donosi zaključak disertacije.

2. Pregled dosadašnjih istraživanja u području sustava regulacije sinkronog generatora

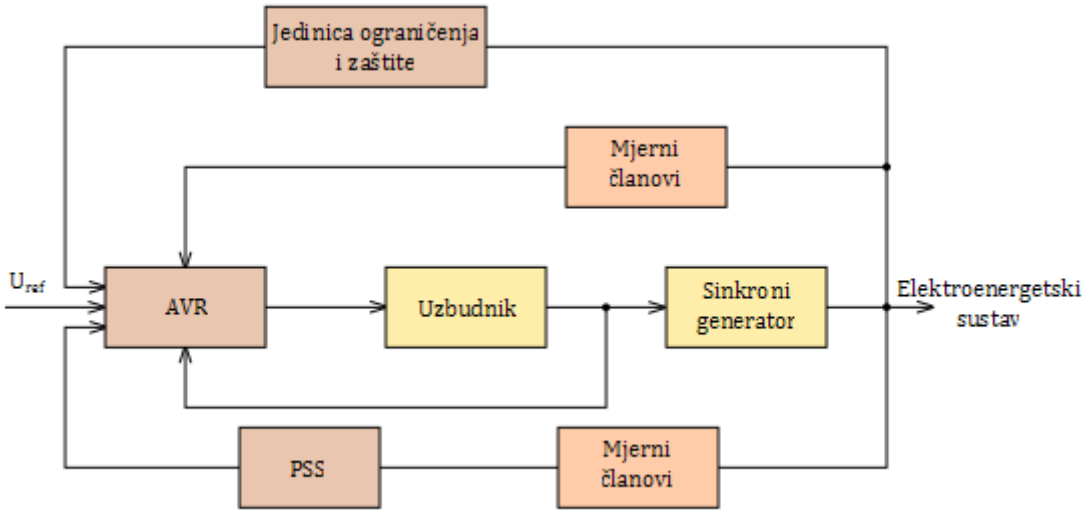
Sinkroni generator predstavlja izvor električne energije u elektroenergetskom sustavu. U njemu se mehanička energija dobivena od pogonskog stroja (turbina ili motor s unutarnjim sagorijevanjem) pretvara u električnu energiju na izlazu, tj. armaturi generatora. Ova pretvorba moguća je jedino ako postoji uzbuda sinkronog generatora. Dok radnu snagu generatora određuje prvenstveno ulazna mehanička snaga pogonskog stroja, uzbuda generatora određuje izlazni napon, odnosno jalovu snagu generatora. Prema tome se regulacija rada sinkronog generatora može podijeliti na dva odvojena regulacijska sustava:

- sustav upravljanja radnom snagom, čiji je zadatak regulacija brzine, frekvencije armaturnog napona i radne snage generatora;
- sustav upravljanja uzbudom, čiji je zadatak regulacija napona i jalove snage generatora spojenog na električnu mrežu.

2.1. Klasični regulacijski sustav uzbude

Potreba za sustavom regulacije sinkronog generatora pojavila se s izgradnjom prvih elektrana na izmjeničnu struju krajem devetnaestog stoljeća. Dok su u prošlim desetljećima regulatori bili izvedeni pomoću sklopova analogne elektronike, čiji je najvažniji element operacijsko pojačalo, moderni regulatori su digitalni i realiziraju se pomoću mikroprocesora i procesora za digitalnu obradu signala [1, 2, 3].

Sustavi regulacije uzbude obuhvaćaju automatski regulator napona generatora (AVR) i stabilizator elektromehaničkih njihanja (PSS). Uz regulatore se u uzbudni krug generatora dodaju jedinice za ograničenje i zaštitu te mjerni instrumenti pomoću kojih se ostvaruje povratna veza (Sl.2.1.). U praksi se primjenjuju standardizirani regulatori napona i elektromehaničkih njihanja dani u [4]. Primjer ispitivanja rada ovakvih sustava dan je u [5].



Slika 2. 1. Uzbudni regulacijski krug sinkronog generatora

2.2. Uzbudni sustavi s nelinearnim regulatorima

Zbog konstantnog porasta potrošnje električne energije generatori često rade na granici stabilnosti. Elektroenergetski sustav se stalno nadograđuje. Pojedini proizvođači električne energije međusobno se natječu na slobodnom tržištu energije. Sve to povećava učestalost pojave velikih poremećaja u elektroenergetskom sustavu koji rezultiraju ispadima pojedinih generatora i potrošača. Pri takvim prijelaznim pojavama dolazi do značajnog odstupanja od stacionarnog stanja generatora, ili čak do promjene radne točke preostalih generatora. Tada do izražaja dolazi nelinearna priroda sinkronog generatora spojenog na električnu mrežu i kvaliteta regulacije klasičnih regulatora više nije zadovoljavajuća. Ovakav slijed događaja može dovesti do ispada drugih generatora na mreži i do prekida opskrbe električnom energijom velikih geografskih područja. Zahtjevi na stabilnost se sve više postrožuju i javlja se potreba za razvojem novih nelinearnih algoritama upravljanja uzbudom sinkronih generatora.

Prema [6] do sada razvijene metode nelinearne regulacije koje se koriste u uzbudnim sustavima generatora mogu se podijeliti na:

- Adaptivno upravljanje – zasniva se na promjeni parametara regulatora s promjenom pogonskih uvjeta u sustavu;
- Linearizacija po povratnoj vezi – u određenim slučajevima se pomoću povratne veze može poništiti nelinearno ponašanje sustava, čime se sustav globalno linearizira te se u tim situacijama mogu koristiti klasični linearni regulatori;

- Umjetna inteligencija – učenje i razvoj prvobitnog programa na temelju različitih scenarija;
- Klizni način upravljanja – varijable stanja sustava se pri prijelazu iz jednog u drugo ravnotežno stanje gibaju točno određenom putanjom u prostoru stanja;
- Lyapunovljeve metode – zasnovane su na Lyapunovljevoj funkciji koja daje ocjenu stabilnosti sustava;
- Upravljanje zasnovano na pasivnosti – regulacija zasnovana na osnovnim zakonima o očuvanju energije, tj. energetskim funkcijama sustava.

Slična podjela dana je i u [7]. Osim navedenih metoda, istražuju se i njihove kombinacije, npr. kombinacija linearnih regulatora i neizrazite logike [8], ili kombinacija upravljanja energetskim funkcijama sustava i linearnih PID regulatora [9]. Primjeri primjene adaptivnog upravljanja u regulaciji sinkronog generatora prikazani su u [10, 11, 12, 13]. Iako u ovom načinu upravljanja regulator zadržava jednostavnu strukturu, potrebno je pratiti, tj. mjeriti i estimirati veliki broj stanja generatora. Linearizacija po povratnoj vezi omogućuje jednostavnu sintezu regulatora, jer oni ostaju linearni. Problemi u implementaciji ove metode javljaju se uslijed nepoznavanja svih nelinearnosti sustava, koje je zbog toga nemoguće poništiti. Zbog toga ovako dobiveni regulatori nisu robusni. Regulacija uzbude generatora linearizacijom po povratnoj vezi istražena je u radovima [14, 15, 16]. U novije vrijeme značajan je razvoj metoda umjetne inteligencije, npr. neuronskih mreža [17], neizrazite logike [18] te heurističkih algoritama [19, 20, 21]. Ovakvi algoritmi ne zahtijevaju poznavanje složenih matematičkih modela i parametara generatora. Nedostatak ovih metoda je da počivaju na iskustvenim spoznajama ili zahtijevaju učenje na temelju raznih scenarija. Ideja kliznog načina upravljanja je upravljati iznosima varijabli stanja [22, 23], međutim, ostalim varijablama nije moguće upravljati te one mogu značajno odstupati od dozvoljenih vrijednosti. Lyapunovljeve metode regulacije [24, 25, 26, 33] osiguravaju stabilnost odziva, ali za dobivanje željene kvalitete odziva ne postoji jednostavan algoritam te ju je vrlo teško postići.

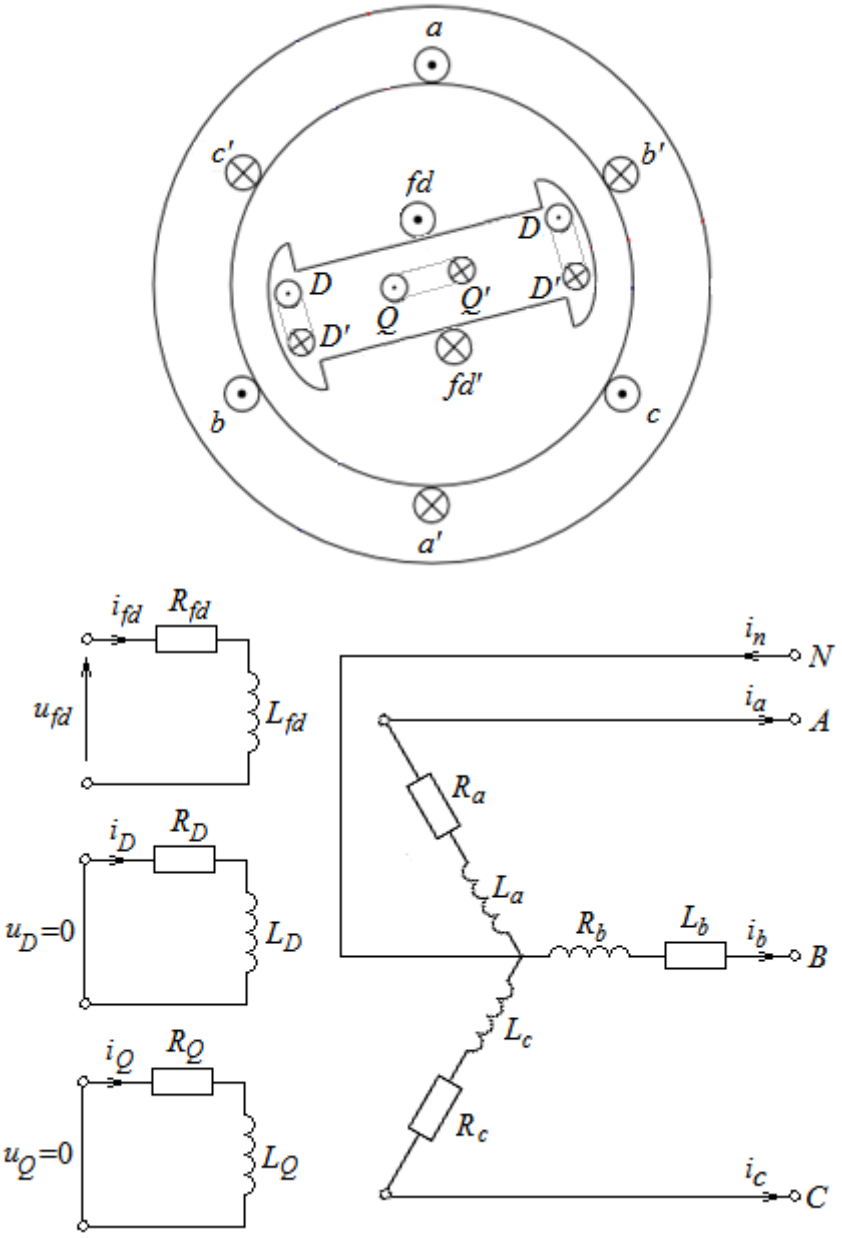
Upravljanje zasnovano na pasivnosti je praktično za sve fizikalne sustave jer počiva na osnovnim zakonima očuvanja energije. Za sintezu regulatora sustav se raspisuje u obliku portovima upravljanog Hamiltonovog sustava (*engl.* Port Controlled Hamiltonian – PCH), pri čemu ostaju očuvana fizikalna značenja – kinetička i potencijalna energija, strukturna povezanost, disipacija. Stabilnost ovako reguliranog sustava može se ispitati pomoću Lyapunovljevih funkcija. U sustav regulacije uzbude ova metoda je prvi puta uvedena 2001.

godine u [27]. U tom radu autori daju model generatora trećeg reda zapisanog u obliku PCH sustava, analiziraju točke stabilnosti generatora u prostoru stanja i dobivaju prvi upravljački zakon temeljen na ovoj metodi. Dobiveni upravljački zakon daje stabilizator elektromehaničkih njihanja, za koji je karakteristično da mu djelovanje iščezava u stacionarnom stanju. Isti autori 2003. godine daju prve simulacijske rezultate ovako dobivenog stabilizatora elektromehaničkih njihanja [28] koje uspoređuju s odzivima nereguliranog sustava i odzivima klasično reguliranog sustava. Zaključuju da je potrebno provesti dodatna istraživanja kako bi se optimalno postavili parametri regulatora. Također zaključuju da bi se sama metodologija dobivanja upravljačkog zakona trebala poboljšati. U narednim godinama navedena skupina autora istražuje kako promjene parametara stabilizatora utječu na odzive kuta opterećenja [29]. Nadalje, postavljaju pitanje mogućnosti implementacije i djelovanja povratne veze u regulacijski sustav. Uz navedene autore pojavljuje se još nekoliko istraživačkih timova u svijetu koji pokušavaju riješiti te probleme [30, 31, 32, 34]. Svi polaze od raspisa modela generatora u PCH obliku danog u prvom radu [27]. U [35] prikazan je pokušaj sinteze stabilizatora na temelju modela generatora petog reda. Rezultati ispitivanja ovih algoritama daju lošije regulacijske odzive od onih koje daju linearni regulatori, ili usporedba uopće nije dana.

Cilj ovog rada je napraviti sintezu regulatora temeljenog na energetskim funkcijama sustava polazeći od novog zapisa modela generatora trećeg reda u Hamiltonovom obliku. Zato je potrebno detaljno analizirati modeliranje sinkronoga generatora.

3. Model sinkronog generatora s istaknutim polovima

U ovom poglavlju detaljno je opisano modeliranje sinkronog generatora s istaknutim polovima. Modelirani generator prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Konstrukcija i namoti modeliranog sinkronog generatora

Na statoru generatora smješten je trofazni armaturni namot (*A, B, C*). Na rotoru generatora se, osim uzbudnog namota (*fd*) nalazi i prigušni namot. Po svojoj strukturi prigušni namot predstavlja nesimetričan kavez [36] te ga se može modelirati s dva međusobno okomita

namota (*D, Q*) čiji se parametri međusobno razlikuju. Prigušni namot je kratkospojen (kavezni) pa su odgovarajući naponi jednaki nuli.

Pri izradi modela potrebno je uvesti sljedeće pretpostavke [38, 39]:

(1) statorski namoti su sinusno distribuirani duž zračnog raspora i simetrični su (i_n=0A, R_a=R_b=R_c=R_S);

(2) statorski induktiviteti ne utječu na induktivitete rotora ovisno o položaju rotora;

(3) zanemaruje se magnetska histereza;

(4) zanemaruje se utjecaj magnetskog zasićenja;

(5) kapaciteti svih namota se mogu zanemariti;

(6) u početnim (subtranzijentnim) i prijelaznim (tranzijentnim) stanjima brzina rotora je blizu sinkrone.

Model sinkronog generatora temelji se na Kirchhoffovim zakonima za struje i napone te na Newtonovim zakonima gibanja:

$$u_a = -R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt}, \tag{3-1}$$

$$u_b = -R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \tag{3-2}$$

$$u_c = -R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt}, \tag{3-3}$$

$$u_{fd} = R_{fd} i_{fd} + \frac{d\psi_{fd}}{dt}, \tag{3-4}$$

$$0 = R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt}, \tag{3-5}$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt}, \tag{3-6}$$

$$i_a + i_b + i_c = i_n = 0, \tag{3-7}$$

$$M_t = M_u + M_{el} = J\frac{d\omega_m}{dt} + M_{el}\,. \tag{3-8}$$

U jednadžbi (3-8) M_t predstavlja moment turbine, M_u je moment ubrzanja, a M_{el} je električni moment generatora.

Jednadžbe (3-1) do (3-6) temelje se ne Kirchhoffovim zakonima napona, jednadžba (3-7) na Kirchhoffovom zakonu struje, a jednadžba (3-8) na Newtonovim zakonima gibanja. U naponskim jednadžbama javljaju se ulančeni magnetski tokovi (ψ_a, ψ_b, ψ_c, ψ_{fd},ψ_D, ψ_Q) koji se definiraju na sljedeći način:

$$\boldsymbol{\psi} = \begin{bmatrix}\boldsymbol{\psi}_\mathbf{S}\\ \boldsymbol{\psi}_\mathbf{R}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\psi_a\\ \psi_b\\ \psi_c\\ \psi_{fd}\\ \psi_D\\ \psi_Q\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_a & -L_{ab} & -L_{ac} & L_{afd} & L_{aD} & L_{aQ}\\ -L_{ba} & -L_b & -L_{bc} & L_{bfd} & L_{bD} & L_{bQ}\\ -L_{ca} & -L_{cb} & -L_c & L_{cfd} & L_{cD} & L_{cQ}\\ -L_{fda} & -L_{fdb} & -L_{fdc} & L_{fd} & L_{fdD} & 0\\ -L_{Da} & -L_{Db} & -L_{Dc} & L_{Dfd} & L_D & 0\\ -L_{Qa} & -L_{Qb} & -L_{Qc} & 0 & 0 & L_Q\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_a\\ i_b\\ i_c\\ i_{fd}\\ i_D\\ i_Q\end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix}-\mathbf{L}_{\mathbf{abc}} & \mathbf{L}_{\mathbf{abcR}}\\ -\mathbf{L}_{\mathbf{abcR}}^{\mathbf{T}} & \mathbf{L}_{\mathbf{R}}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{i}_\mathbf{S}\\ \mathbf{i}_\mathbf{R}\end{bmatrix} = \mathbf{L}\mathbf{i}\,. \tag{3-9}$$

Svojstva svakog električnog stroja bitno ovise o matrici induktiviteta **L** pa su njeni elementi u nastavku detaljno objašnjeni. Za rotor sinkronog stroja karakteristična je strukturna nesimetrija jer uzbudni namot djeluje samo u jednoj osi (*d*), a nesimetričan je i prigušni namot. Osim toga, zbog istaknutih polova, tj. promjenjivog zračnog raspora postoji i magnetska nesimetrija.

Za sinkroni generator funkcija magnetske vodljivosti ima oblik beskonačnog reda s parnim harmonicima [36]:

$$\lambda = \lambda_0 - \lambda_2\cos\left(2p\gamma_r\right) - \lambda_4\cos\left(4p\gamma_r\right) - \ldots, \tag{3-10}$$

gdje kut γ_r predstavlja prostornu koordinatu rotora. Pri modeliranju generatora dovoljno je uzeti prva dva člana danog reda:

$$\lambda = \lambda_0 - \lambda_2\cos\left(2p\gamma_r\right). \tag{3-11}$$

Magnetska indukcija duž oboda statora dobiva se množenjem protjecanja i magnetske vodljivosti:

$$B = \Theta\lambda\ . \tag{3-12}$$

Prema pretpostavci (1) protjecanja stroja su sinusne funkcije:

$$\Theta_a = \Theta_{as}\sin(p\gamma_s)\,, \tag{3-13}$$

$$\Theta_b = \Theta_{bs}\sin(p\gamma_s - \frac{2\pi}{3})\,, \tag{3-14}$$

$$\Theta_c = \Theta_{cs}\sin(p\gamma_s + \frac{2\pi}{3})\,, \tag{3-15}$$

gdje je γ_s prostorna koordinata statora i vrijedi:

$$p\gamma_r = p\gamma_s - \vartheta\,. \tag{3-16}$$

Magnetski tok dobiva se integracijom indukcije duž jednog polnog koraka, kako je prikazano za primjer faze *a*. Ako se u (3-12) uvrsti (3-13), dobiva se:

$$B_a = \Theta_a\lambda = \Theta_{as}\sin\left(p\gamma_s\right)\cdot\left[\lambda_0 - \lambda_2\cos\left(2p\gamma_r\right)\right] =$$

$$= \Theta_{as}\left[\lambda_0\sin\left(p\gamma_s\right) - \lambda_2\sin\left(p\gamma_s\right)\cos\left(2p\gamma_r\right)\right]. \tag{3-17}$$

Uvrštavanjem relacije (3-16) dobiva se:

$$B_a = \Theta_{as}\left[\lambda_0\sin\left(p\gamma_s\right) + \frac{1}{2}\lambda_2\sin\left(p\gamma_s - 2\vartheta\right)\right]. \tag{3-18}$$

Integracijom indukcije duž polnog koraka dobiva se magnetski tok jednog zavoja:

$$\Phi_a = \int_0^{\pi} B_a d\left(p\gamma_s\right) = \Theta_{as}\left[\lambda_0\int_0^{\pi}\sin\left(p\gamma_s\right)d\left(p\gamma_s\right) + \frac{1}{2}\lambda_2\int_0^{\pi}\sin\left(p\gamma_s - 2\vartheta\right)d\left(p\gamma_s\right)\right] =$$

$$= \Theta_{as}\left[2\lambda_0 + \lambda_2\cos(2\vartheta)\right]. \tag{3-19}$$

Prema [36] amplituda protjecanja Θ_{as} iznosi:

$$\Theta_{as} = \frac{2}{\pi}\frac{N_s k_{ws}}{p} i_a\,, \tag{3-20}$$

gdje je N_s ukupan broj zavoja namota statora, a k_{ws} faktor namota statora. Ulančeni magnetski tok faze *a* prema tome iznosi:

$$\psi_a = N_s k_{ws}\cdot\Phi_a = N_s k_{ws}\frac{2}{\pi}\frac{N_s k_{ws}}{p} i_a\left[2\lambda_0 + \lambda_2\cos(2\vartheta)\right] \tag{3-21}$$

pa je stoga induktivitet faze *a* :

$$L_{aa} = \frac{2}{\pi}\frac{N_s{}^2 k_{ws}{}^2}{p}\left[2\lambda_0 + \lambda_2 \cos(2\vartheta)\right]. \tag{3-22}$$

Uzimajući u obzir rasipanje magnetskog toka dobiva se konačni izraz za induktivitet faze *a*:

$$L_a = L_{aa} + L_\sigma = \frac{2}{\pi}\frac{N_s{}^2 k_{ws}{}^2}{p}\left[2\lambda_0 + \lambda_2 \cos\left(2\vartheta\right)\right] + L_\sigma =$$

$$= l_{0s} + l_{2s}\cos\left(2\vartheta\right) + L_\sigma . \tag{3-23}$$

Ostali elementi submatrice statorskih induktiviteta $\mathbf{L_{abc}}$ dobivaju se analognim postupkom. Konačno, submatrica statorskih induktiviteta generatora s istaknutim polovima iznosi [36]:

$$\mathbf{L_{abc}} = \begin{bmatrix} l_{0s}+L_\sigma & -\frac{1}{2}l_{0s} & -\frac{1}{2}l_{0s} \\ -\frac{1}{2}l_{0s} & l_{0s}+L_\sigma & -\frac{1}{2}l_{0s} \\ -\frac{1}{2}l_{0s} & -\frac{1}{2}l_{0s} & l_{0s}+L_\sigma \end{bmatrix} +$$

$$+l_{2s}\begin{bmatrix} \cos(2\vartheta) & \cos(2\vartheta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(2\vartheta+\frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\vartheta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(2\vartheta+\frac{2\pi}{3}) & \cos(2\vartheta) \\ \cos(2\vartheta+\frac{2\pi}{3}) & \cos(2\vartheta) & \cos(2\vartheta-\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}. \tag{3-24}$$

Submatrica međuinduktiviteta statora i rotora poprima oblik [37]:

$$\mathbf{L_{abcR}} = \begin{bmatrix} l_{ad}\cos(\vartheta) & l_{ad}\cos(\vartheta) & -l_{aq}\sin(\vartheta) \\ l_{ad}\cos(\vartheta-\frac{2\pi}{3}) & l_{ad}\cos(\vartheta-\frac{2\pi}{3}) & -l_{aq}\sin(\vartheta-\frac{2\pi}{3}) \\ l_{ad}\cos(\vartheta+\frac{2\pi}{3}) & l_{ad}\cos(\vartheta+\frac{2\pi}{3}) & -l_{aq}\sin(\vartheta+\frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}, \tag{3-25}$$

gdje su l_{ad} i l_{aq} međuinduktiviteti u *d*, odnosno *q* osi rotora. Submatrica rotorskih induktiviteta $\mathbf{L_R}$ ne ovisi o položaju rotora, tj. električnom kutu rotora (ϑ):

$$\mathbf{L_R} = \begin{bmatrix} l_{fd} & l_{ad} & 0 \\ l_{ad} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}. \tag{3-26}$$

3.1. Modeliranje generatora u (*d, q, 0*) koordinatnom sustavu

Varijable statora i rotora potrebno je izraziti u jedinstvenom koordinatnom sustavu koji je vezan za istaknute polove. Za slučaj sinkronog generatora to znači da se statorske varijable trebaju transformirati u rotorski koordinatni sustav. Kako su varijable statora (napon, struja, tok) trofazne veličine, potrebno ih je svesti na dvoosni zapis. Ovakvu transformaciju prvi je uveo R. H. Park krajem dvadesetih godina prošloga stoljeća pa se stoga ona naziva Parkova transformacija. Matrični oblik Parkove transformacije je prema [37] jednak:

$$\mathbf{T}_{\mathbf{sr}} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\delta) & \cos(\delta-\frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta+\frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\delta) & -\sin(\delta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\delta+\frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \tag{3-27}$$

Inverzna Parkova transformacija, prema tome, ima sljedeći oblik:

$$\mathbf{T}_{\mathbf{rs}} = \mathbf{T}_{\mathbf{sr}}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\delta) & -\sin(\delta) & 1 \\ \cos(\delta-\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\delta-\frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\delta+\frac{2\pi}{3}) & -\sin(\delta+\frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}. \tag{3-28}$$

Neka su statorske veličine napona, struja i tokova u rotorskom koordinatnom sustavu označene: $\mathbf{u}_{\mathbf{dq0}}^{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} u_d & u_q & u_0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{i}_{\mathbf{dq0}}^{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} i_d & i_q & i_0 \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{dq0}}^{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} \psi_d & \psi_q & \psi_0 \end{bmatrix}$. Tada vrijedi:

$$\mathbf{u}_{\mathbf{dq0}} = \mathbf{T}_{\mathbf{sr}}\mathbf{u}_{\mathbf{S}}\,, \tag{3-29}$$

$$\mathbf{i}_{\mathbf{dq0}} = \mathbf{T}_{\mathbf{sr}}\mathbf{i}_{\mathbf{S}}\,, \tag{3-30}$$

$$\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{dq0}} = \mathbf{T}_{\mathbf{sr}}\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{S}}\,. \tag{3-31}$$

Također, vrijedi obrat:

$$\mathbf{u}_{\mathbf{S}} = \mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\mathbf{u}_{\mathbf{dq0}}\,, \tag{3-32}$$

$$\mathbf{i}_{\mathbf{S}} = \mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\mathbf{i}_{\mathbf{dq0}}\,, \tag{3-33}$$

$$\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{S}} = \mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{dq0}}\,. \tag{3-34}$$

Transformacija statorskih varijabli u rotorski koordinatni sustav također utječe na matrice induktiviteta. Ako se u (3-9) uvrste jednakosti (3-33) i (3-34), dobivaju se sljedeće relacije:

$$\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{S}} = -\mathbf{L}_{\mathbf{abc}}\mathbf{i}_{\mathbf{S}} + \mathbf{L}_{\mathbf{abcR}}\mathbf{i}_{\mathbf{R}}$$

$$\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{dq0}} = -\mathbf{L}_{\mathbf{abc}}\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\mathbf{i}_{\mathbf{dq0}} + \mathbf{L}_{\mathbf{abcR}}\mathbf{i}_{\mathbf{R}}$$

$$\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{dq0}} = -\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}^{-1}\mathbf{L}_{\mathbf{abc}}\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\mathbf{i}_{\mathbf{dq0}} + \mathbf{T}_{\mathbf{rs}}^{-1}\mathbf{L}_{\mathbf{abcR}}\mathbf{i}_{\mathbf{R}} = \mathbf{L}_{\mathbf{S}}\mathbf{i}_{\mathbf{dq0}} + \mathbf{L}_{\mathbf{SR}}\mathbf{i}_{\mathbf{R}}\,. \tag{3-35}$$

Ovdje valja primijetiti da se rotorske veličine ne mijenjaju. Matrica statorskih induktiviteta u rotorskom koordinatnom sustavu postaje dijagonalna i neovisna o položaju rotora, tj. kutu ϑ:

$$\mathbf{L}_{\mathbf{S}} = \mathbf{T}_{\mathbf{rs}}^{-1}\mathbf{L}_{\mathbf{abc}}\mathbf{T}_{\mathbf{rs}} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}(l_{0s}+l_{2s})+L_{\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}(l_{0s}-l_{2s})+L_{\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & L_{\sigma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_d & 0 & 0 \\ 0 & l_q & 0 \\ 0 & 0 & l_0 \end{bmatrix}. \tag{3-36}$$

Matrica međuinduktiviteta statora i rotora u rotorskom koordinatnom sustavu također postaje neovisna o položaju rotora:

$$\mathbf{L}_{\mathbf{SR}} = \mathbf{T}_{\mathbf{rs}}^{-1}\mathbf{L}_{\mathbf{abcR}} = \begin{bmatrix} l_{ad} & l_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & l_{aq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{3-37}$$

Matica rotorskih induktiviteta $\mathbf{L_R}$ se ne mijenja pa i dalje vrijedi izraz (3-26).

Naponske jednadžbe sinkronog generatora s istaknutim polovima u rotorskom koordinatnom sustavu dobivaju se na sljedeći način:

$$\mathbf{u}_{\mathbf{S}} = -\mathbf{R}_{\mathbf{S}}\mathbf{i}_{\mathbf{S}} + \frac{\mathbf{d}\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{S}}}{\mathbf{dt}}$$

$$\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\mathbf{u}_{\mathbf{dq0}} = -\mathbf{R}_{\mathbf{S}}\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\mathbf{i}_{\mathbf{dq0}} + \frac{d}{dt}\left(\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{dq0}}\right)$$

$$\mathbf{u}_{\mathbf{dq0}} = -\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}^{-1}\mathbf{R}_{\mathbf{S}}\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\mathbf{i}_{\mathbf{dq0}} + \mathbf{T}_{\mathbf{rs}}^{-1}\frac{d\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}}{dt}\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{dq0}} + \mathbf{T}_{\mathbf{rs}}^{-1}\mathbf{T}_{\mathbf{rs}}\frac{d\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{dq0}}}{dt}$$

$$\boldsymbol{u}_{\boldsymbol{dq}0} = -\boldsymbol{R}_{\boldsymbol{S}}\boldsymbol{i}_{\boldsymbol{dq}0} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{\psi}_{\boldsymbol{dq}0} + \frac{d\boldsymbol{\psi}_{\boldsymbol{dq}0}}{dt}. \tag{3-38}$$

Dobivene vektorske naponske jednadžbe raspisane po komponentama napona glase:

$$u_d = -R_S i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q , \tag{3-39}$$

$$u_q = -R_S i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d , \tag{3-40}$$

$$u_0 = -R_S i_0 + \frac{d\psi_0}{dt} . \tag{3-41}$$

Rotorske naponske jednadžbe se ne mijenjaju te i dalje vrijede izrazi (3-4) do (3-6) s obzirom da su te jednadžbe već napisane u rotorskom koordinatnom sustavu.

U [37] izveden je izraz za elektromagnetski moment izražen pomoću komponenata struja i tokova u rotorskom koordinatnom sustavu:

$$M_{el} = \frac{3}{2}\left(\psi_d i_q - \psi_q i_d\right). \tag{3-42}$$

Za simetrične statorske namote i simetrične režime rada relacija (3-41) se izostavlja.

3.2. Modeliranje generatora u sustavu relativnih jedinica

U modeliranju sinkronih generatora postoji mogućnost odabira različitih baznih vrijednosti za tvorbu sustava relativnih jedinica. U literaturi [36, 37, 38, 39, 45] ponuđena su četiri različita sustava. Razlike se javljaju u izboru baznih veličina napona, struja, snaga frekvencija i vremena. U [37] izabran je sustav relativnih jedinica s baznom vrijednosti vremena 1s, što znači da se vremena odziva modela generatora u sustavu relativnih jedinica i dalje mjere u sekundama. Zbog te prednosti odabran je takav sustav relativnih jedinica. Bazne vrijednosti zadane su na sljedeći način:

$$U_{SB} = \sqrt{2}U_{an} , \tag{3-43}$$

$$I_{SB} = \sqrt{2}I_{an} , \tag{3-44}$$

$$\omega_B = \omega_s , \tag{3-45}$$

$$t_B = 1\ \text{s}. \tag{3-46}$$

Iz danih baznih vrijednosti izvode se ostale bazne vrijednosti:

$$S_B = \frac{3}{2} U_{SB} I_{SB}\,, \tag{3-47}$$

$$Z_B = \frac{U_{SB}}{I_{SB}}, \tag{3-48}$$

$$L_B = \frac{Z_B}{\omega_B}\,, \tag{3-49}$$

$$\psi_B = \frac{U_B}{\omega_B}\,, \tag{3-50}$$

$$M_B = p\frac{S_B}{\omega_B}. \tag{3-51}$$

Moguće je primijetiti da se izborom bazne frekvencije $\omega_B = \omega_s$ postiže jednakost brojčanih vrijednosti induktiviteta i odgovarajućih reaktancija u sustavu relativnih jedinica, jer je tada $\omega_s = 1$ rj. Generatorske veličine u relativnim jedinicama izvedene su u nastavku i označene simbolom *. Iz (3-39) slijedi:

$$u_d^* = \frac{u_d}{U_{SB}} = -\frac{r_s i_d}{U_{SB}} + \frac{1}{U_{SB}}\frac{d\psi_d}{dt} - \omega\frac{\psi_q}{U_{SB}} = -\frac{r_s}{Z_B}\frac{i_d}{I_{SB}} + \frac{1}{\omega_s dt} d\left(\frac{\psi_d}{\psi_B}\right) - \frac{\omega}{\omega_B}\frac{\psi_q}{\psi_B}$$

$$u_d^* = -r_s^* i_d^* + \frac{d\psi_d^*}{\omega_s dt} - \omega^*\psi_q^*, \tag{3-52}$$

Analogno vrijedi:

$$u_q^* = -r_s^* i_q^* + \frac{d\psi_q^*}{\omega_s dt} + \omega^*\psi_d^*, \tag{3-53}$$

$$u_{fd}^* = r_{fd}^* i_{fd}^* + \frac{d\psi_{fd}^*}{\omega_s dt}\,, \tag{3-54}$$

$$0 = r_D^* i_D^* + \frac{d\psi_D^*}{\omega_s dt}\,, \tag{3-55}$$

$$0 = r_Q^* i_Q^* + \frac{d\psi_Q^*}{\omega_s dt}\,. \tag{3-56}$$

Kut rotora u sustavu relativnih jedinica glasi:

$$\frac{d\vartheta}{dt}=\omega\rightarrow\frac{d\vartheta}{\omega_B dt}=\frac{\omega}{\omega_B}\rightarrow\frac{d\vartheta}{\omega_B dt}=\omega^*. \tag{3-57}$$

U slučaju malih promjena brzina vrtnje u okolišu sinkrone često se, umjesto jednakosti za kut rotora ϑ, piše jednadžba za kut opterećenja generatora δ:

$$\frac{d\delta}{dt}=\omega-\omega_s, \tag{3-58}$$

što zapisano u sustavu relativnih jedinica poprima oblik:

$$\frac{d\delta}{\omega_s dt}=\omega^*-1. \tag{3-59}$$

Elektromagnetski moment u sustavu relativnih jedinica gubi faktor $\frac{3}{2}$:

$$\frac{M_{el}}{M_B}=\frac{\frac{3}{2}\left(\psi_d i_q-\psi_q i_d\right)}{M_B}=\frac{\omega_b}{pS_b}\cdot\frac{3}{2}\left(\psi_d i_q-\psi_q i_d\right)=\frac{\omega_b}{p\frac{3}{2}U_B I_B}\cdot\frac{3}{2}\left(\psi_d i_q-\psi_q i_d\right)=\frac{\left(\psi_d i_q-\psi_q i_d\right)}{p\psi_B I_B},$$

$$M_{el}^*=\psi_d^* i_q^*-\psi_q^* i_d^*, \tag{3-60}$$

Iz jednadžbe momenta (3-8) potrebno je izlučiti vremensku derivaciju brzine:

$$\frac{d\omega_m}{dt}=\frac{M_t-M_{el}}{J}\ , \tag{3-61}$$

i dobivenu relaciju zapisati u sustavu relativnih jedinica:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\omega}{p}\right)=\frac{M_t-M_{el}}{J}\rightarrow\frac{\omega_s}{p}\frac{d}{dt}\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)=\frac{M_B}{J}\frac{M_t-M_{el}}{M_B}$$

$$\frac{d\omega^*}{dt}=\frac{pM_B}{J\omega_s}\left(M_t^*-M_{el}^*\right)=\frac{M_t^*-M_{el}^*}{2H}, \tag{3-62}$$

gdje je H konstanta tromosti i iznosi:

$$H=\frac{1}{2}\frac{J\omega_s}{pM_B}=\frac{1}{2}\frac{J\omega_s}{p^2\frac{S_B}{\omega_B}}=\frac{1}{2}\frac{J\omega_s}{p^2\frac{S_B}{\omega_s}}=\frac{1}{2}\frac{J\omega_{ms}^2}{S_B}\ \text{[s]}. \tag{3-63}$$

ω_{ms} je mehanička sinkrona brzina jednaka sinkronoj kutnoj brzini podijeljenoj s brojem pari polova generatora. U nastavku rada razmatra se generator u sustavu relativnih jedinica te se zbog jednostavnijeg zapisa izostavlja oznaka *.

Jednadžbe tokova u (*d*,*q*,*0*) koordinatnom sustavu glase:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\psi}_{dq0} \\ \boldsymbol{\psi}_{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\boldsymbol{L}_{s} & \boldsymbol{L}_{SR} \\ \boldsymbol{L}_{SR}^{T} & \boldsymbol{L}_{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{i}_{dq0} \\ \boldsymbol{i}_{r} \end{bmatrix}. \tag{3-64}$$

Diferencijalne jednadžbe (3-52), (3-53), (3-54), (3-55), (3-56), (3-59), (3-62) i (3-64) čine matematički model sinkronog generatora sedmog reda u (*d, q, 0*) koordinatnom sustavu.

3.3. Model sinkronog generatora petog reda

Model sinkronog generatora petog reda predstavlja pojednostavljenje modela sedmog reda u smislu zanemarenja utjecaja promjene brzine vrtnje generatora na napon generatora ($\omega \approx$ 1rj.). To znači da se zanemaruje dinamika statorskih tokova ($\frac{d\psi_d}{dt} = 0$, $\frac{d\psi_q}{dt} = 0$) i statorske naponske jednadžbe postaju algebarske. Dok se model sedmog reda koristi za analizu dinamike generatora, model petog reda je dovoljan za analizu prijelazne stabilnosti višestrojnog sustava. Jednadžbe tokova glase:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_{fd} \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_d & 0 & l_{ad} & l_{ad} & 0 \\ 0 & l_q & 0 & 0 & l_{aq} \\ -l_{ad} & 0 & l_{fd} & 0 & 0 \\ -l_{ad} & 0 & 0 & l_D & 0 \\ 0 & -l_{aq} & 0 & 0 & l_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{fd} \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}. \tag{3-65}$$

Naponi statora opisuju se nelinearnim algebarskim jednadžbama:

$$u_d = -\omega\psi_q - r_s i_d \,, \tag{3-66}$$

$$u_d = \omega\psi_d - r_s i_q \,, \tag{3-67}$$

koje u matričnom obliku [37] glase:

$$\mathbf{u_s} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \omega \mathbf{P}\boldsymbol{\psi}_{\mathbf{dq}} - \mathbf{R_s}\mathbf{i_{dq}} \,. \tag{3-68}$$

Varijable stanja ovog modela su: $\mathbf{x^T} = \begin{bmatrix} \psi_{fd} & \psi_D & \psi_Q & \omega & \delta \end{bmatrix}$. Shodno tome bit će preoblikovane rotorske naponske jednadžbe u oblik povoljan za simulaciju na računalu s vremenskom derivacijom tokova na lijevoj strani diferencijalnih jednadžbi:

$$\frac{d\psi_{fd}}{\omega_s dt} = u_{fd} - R_{fd} i_{fd} \ , \tag{3-69}$$

$$\frac{d\psi_{D}}{\omega_s dt} = -R_{D} i_{fd} \ , \tag{3-70}$$

$$\frac{d\psi_{Q}}{\omega_s dt} = -R_{Q} i_{Q} \ , \tag{3-71}$$

Jednadžba koja opisuje promjenu kutne brzine rotora o momentima koji djeluju na generator je nelinearna diferencijalna jednadžba koja uvrštavanjem jednakosti (3-60) u izraz (3-62) poprima oblik:

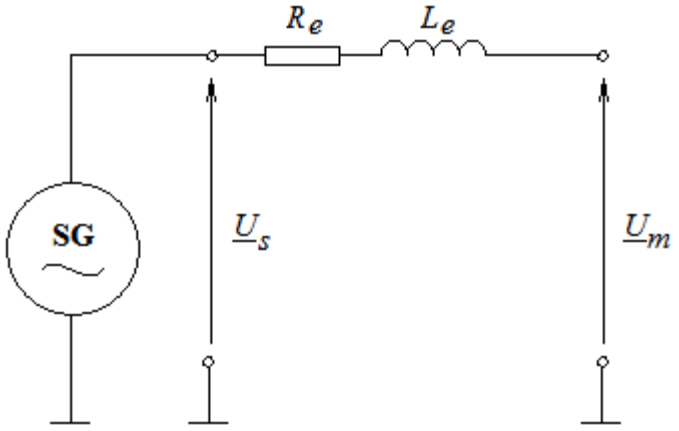
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_t - (\psi_d i_q - \psi_q i_d)}{2H}. \tag{3-72}$$

Da bi model generatora bio potpun, potrebno je još dodati diferencijalnu jednadžbu koja opisuje promjenu kuta opterećenja u vremenu:

$$\frac{d\delta}{\omega_s dt} = \omega - 1 = \Delta\omega. \tag{3-73}$$

3.4. Stacionarno stanje generatora u paralelnom radu na EES

Kako bi bilo moguće točno odrediti stacionarno stanje sinkronog generatora paralelno spojenog u elektroenergetski sustav, potrebno je uzeti u obzir serijsku impedanciju (ekvivalentni otpor R_e i induktivitet L_e) između generatora i mreže te mrežni napon. Nadomjesna shema na slici 3.2. prigodna je za analizu naponskih prilika u fazorskom zapisu.



Slika 3.2. Sinkroni generator spojen u elektroenergetski sustav

Prema slici 3.2. vidljivo je da napon generatora spojenog na mrežu u stacionarnom stanju iznosi:

$$\underline{U_s} = (R_e + jX_e)\underline{I_{dq}} + \underline{U_m}\ , \tag{3-74}$$

pri čemu je $\underline{U_m}$ vektor napona mreže i iznosi:

$$\underline{U_m} = u_{md} + ju_{mq}\ , \tag{3-75}$$

a njegove komponente se mogu zapisati u sljedećem obliku:

$$u_{md} = U_{m0}\sin\delta, \tag{3-76}$$

$$u_{mq} = U_{m0}\cos\delta. \tag{3-77}$$

Iz (3-74), (3-75) se dobiva:

$$u_d = u_{md} + R_e i_d - \omega l_e i_q\ , \tag{3-78}$$

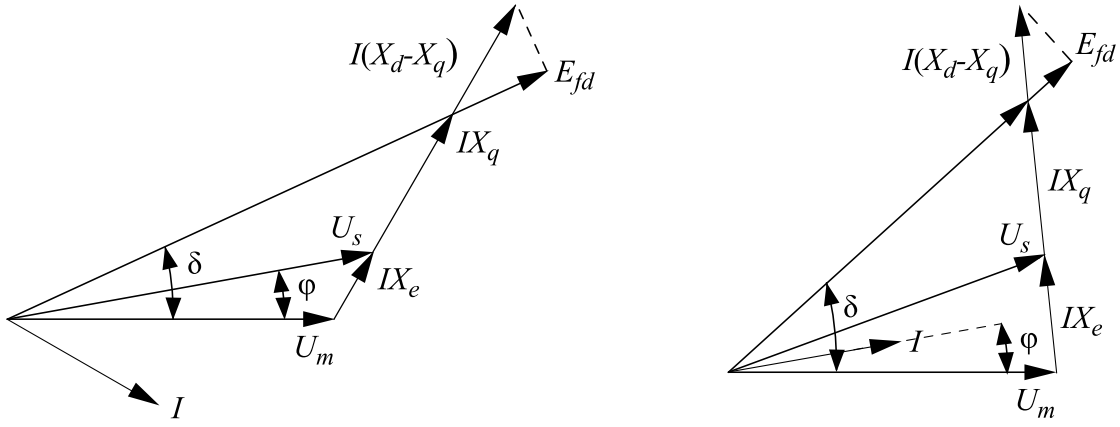
$$u_q = u_{mq} + R_e i_q + \omega l_e i_d\ , \tag{3-79}$$

što je dalje pogodno zapisati u matričnom obliku [37]:

$$\mathbf{u_s} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{md} \\ u_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_e & 0 \\ 0 & R_e \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} l_e \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \mathbf{u_m} + (\mathbf{R_e} + \omega \mathbf{P} l_e)\mathbf{i_{dq}}\ , \tag{3-80}$$

gdje matrica **P** predstavlja matricu rotacije u realnom zapisu kompleksnih veličina.

Odnos napona generatora i mrežnog napona ovisi i o režimu rada generatora, kako je to prikazano na slici 3.3.



a) induktivni režim rada b) kapacitivni režim rada

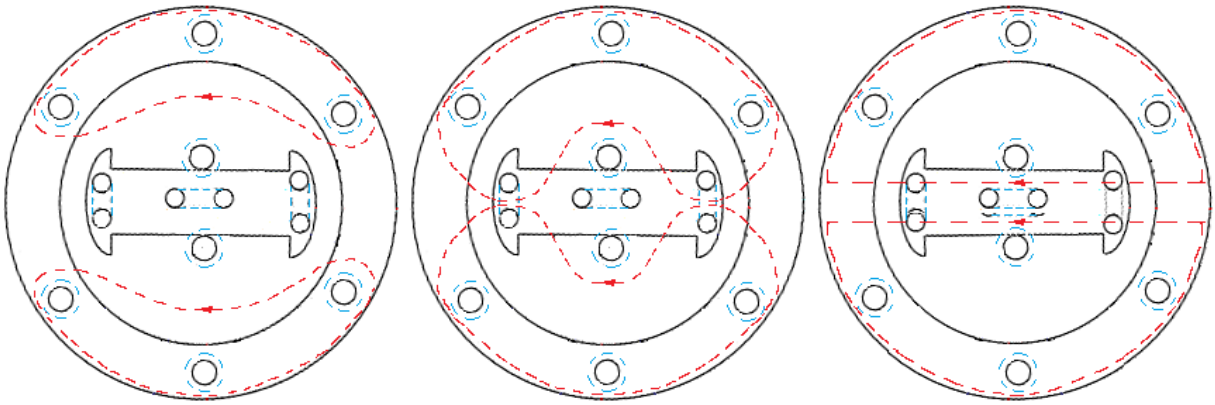
Slika 3.3. Fazorski dijagrami sinkronog generatora spojenog u elektroenergetski sustav

3.5. Početna i prijelazna stanja sinkronog generatora

Neposredno nakon pojave naglog poremećaja struje koje se induciraju u rotorskim krugovima suprotstavljaju se armaturnom toku koji tada ne prolazi kroz rotor. To stanje se naziva početno ili subtranzijentno stanje i prikazano je na slici 3.4. a) .

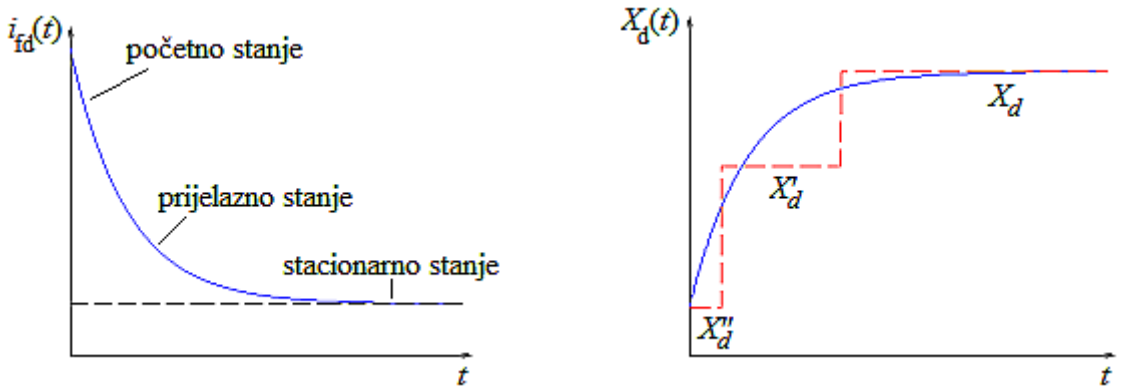
Struje koje su se javile u rotoru neposredno nakon poremećaja s vremenom opadaju zbog disipacije energije na rotorskim otporima [38]. Zbog toga statorski tok počinje ulaziti dublje u rotor. Vrijeme u kojem se statorski tok zatvara samo kroz polne papuče, slika 3.4. b), definira prijelazno ili tranzijentno stanje generatora.

Nakon završetka prijelazne pojave uslijed poremećaja nastupa stacionarno stanje, slika 3.4. c) u kojem se statorski tok zatvara kroz cijeli rotor.



a) b) c)

Slika 3.4. Statorski tokovi u: a) početnom, b) prijelaznom, c) stacionarnom stanju



a) b)

Slika 3.5. Struja rotora (a) i direktna reaktancija statora (b) pri poremećaju

Prikladno je analizirati dinamiku generatora u sva tri navedena stanja zasebno. To se postiže promjenom nadomjesne sheme generatorskih reaktancija. U [36] je prikazano da za uzdužnu os vrijedi:

$$X_d = \omega l_d \ , \tag{3-81}$$

$$X_d^{'} = \omega(l_\sigma + \frac{l_{ad}}{l_{fd}} l_{\sigma f}) = \omega l_d^{'} \ , \tag{3-82}$$

$$X_d^{''} = \omega\left[l_\sigma + \left(\frac{1}{l_{\sigma f}} + \frac{1}{l_{\sigma D}} + \frac{1}{l_{ad}} \right) \right] = \omega l_d^{''} \ , \tag{3-83}$$

gdje su l_σ, $l_{\sigma f}$ *i* $l_{\sigma D}$ rasipni induktiviteti definirani na sljedeći način:

$$l_\sigma = l_d - l_{ad} \ , \tag{3-84}$$

$$l_{\sigma f} = l_{fd} - l_{ad} \ , \tag{3-85}$$

$$l_{\sigma D} = l_D - l_{ad} \ . \tag{3-86}$$

U poprečnoj osi javljaju se sljedeće reaktancije:

$$X_q = \omega l_q \ , \tag{3-87}$$

$$X_q^{''} = \omega\left(l_\sigma + \frac{l_{aq}}{l_Q} l_{\sigma Q} \right) = \omega l_q^{''} , \tag{3-88}$$

gdje je $L_{\sigma Q}$ rasipni induktivitet dan izrazom:

$$l_{\sigma Q} = \frac{l_q - l_\sigma}{l_{aq}} l_Q - l_{aq} \ . \tag{3-89}$$

Nadalje je potrebno definirati vremenske konstante koje određuju trajanja početnog i prijelaznog stanja. Prema [36] može se pokazati da vrijedi:

$$T_{d0}^{'} = \frac{l_{fd}}{R_{fd}} \ , \tag{3-90}$$

$$T_{d0}^{''} = \frac{l_{\sigma d} + \frac{l_{ad}}{l_{fd}} l_{\sigma f}}{R_D} \ , \tag{3-91}$$

$$T_d^{'} = \frac{l_{\sigma f} + \frac{l_{ad}}{l_d} l_\sigma}{R_{fd}} \ , \tag{3-92}$$

$$T_d^{''} = \frac{l_{\sigma D} + l_{\sigma f} + l_{ad} + l_\sigma}{R_D} \ , \tag{3-93}$$

$$T_{q0}^{''} = \frac{l_Q}{R_Q} \ , \tag{3-94}$$

$$T_q^{''} = \frac{l_Q - \frac{l_{aq}^2}{l_q}}{R_D} \ . \tag{3-95}$$

T_{d0}' i T_{d0}'' predstavljaju prijelaznu i početnu vremensku konstantu za uzdužnu os uz otvorenu armaturu generatora. T_d' i T_d'' predstavljaju prijelaznu i početnu vremensku konstantu uz kratkospojenu armaturu za uzdužnu os. T_{q0}'' i T_q'' su početne vremenske konstante u poprečnoj osi uz otvoren, odnosno kratkospojen armaturni namot. Sve vremenske konstante dane su u sekundama.

3.6. Model sinkronog generatora trećeg reda

Smatraju li se pojave u prigušnim konturama mnogo bržim od onih vezanih za uzbudnu konturu [37], tada se zanemaruju diferencijalne jednadžbe (3-70) i (3-71) i dobiva se model sinkronog generatora trećeg reda. Ovaj model se koristi za sintezu regulatora uzbude sinkronog generatora. Izostavljanjem izraza (3-70) i (3-71) vidljivo je da više nije potrebno proučavati tokove ψ_D i ψ_Q. Tokovi u modelu trećeg reda u matričnom obliku dani su na sljedeći način:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_d & 0 & l_{ad} \\ 0 & l_q & 0 \\ -l_{ad} & 0 & l_{fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\mathbf{L_{dq}} & \mathbf{L_{ad}} \\ -\mathbf{L_{ad}^T} & l_{fd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i_{dq}} \\ i_{fd} \end{bmatrix}. \tag{3-96}$$

Algebarske jednadžbe za napone statora (3-66), (3-67) ostaju nepromijenjene, kao i diferencijalne jednadžbe za uzbudni tok (3-69), mehaničku kutnu brzinu (3-72) i kut opterećenja generatora (3-73).

Diferencijalna jednadžba za uzbudni tok (3-69) se u literaturi [37, 38, 39] transformira u jednadžbu koja opisuje promjenu tranzijentne elektromotorne sile e_q'. Tranzijentna elektromotorna sila proporcionalna je uzbudnom toku:

$$e_q^{'} = \frac{l_{ad}}{l_{fd}} \psi_{fd}\,, \tag{3-97}$$

što, uz uvođenje veličina iz prethodnog poglavlja, konačno daje sljedeću diferencijalnu jednadžbu:

$$\frac{de_q^{'}}{dt} = \frac{e_{fd} - e_q^{'} + \left(l_d - l_d^{'}\right) i_d}{T_{d0}^{'}}, \tag{3-98}$$

gdje je e_{fd} supstitucija napona uzbude i iznosi $e_{fd} = \frac{l_{ad}}{R_{fd}} u_{fd}$. Varijable stanja modela sinkronog generatora trećeg reda su: $\mathbf{x^T} = [\psi_{fd} \quad \omega \quad \delta]$.

3.7. Model sinkronog generatora drugog reda

Ukoliko se analiziraju pojave znatno dužeg trajanja od vremenske konstante T_{d0}', odnosno T_d', uzbudni tok ψ_{fd} se može smatrati konstantnim. Na taj način sve jednadžbe vezane za električne pojave u stroju postaju algebarske pa se može zaključiti da ovaj model opisuje samo dinamiku gibanja rotora generatora. Za napon uzbude vrijedi:

$$u_{fd} = r_{fd} i_d. \tag{3-99}$$

Konačno, model sinkronog generatora drugog reda čine jednadžbe (3-96), (3-66), (3-67), (3-99), (3-72) i (3-73), a njegove varijable stanja su: $\mathbf{x^T} = [\omega \quad \delta]$.

3.8. Model generatora trećeg reda u prostoru stanja

Fizikalno gledano, stanje dinamičkog sustava određeno je energetskim sadržajem energetskih spremnika koji postoje u sustavu [40]. Modeli sustava u prostoru stanja jedini daju potpunu informaciju o dinamičkom ponašanju sustava [41]. Ove prednosti zapisa modela sustava u prostoru stanja čine ga pogodnim za sintezu regulatora zasnovanog na energetskim funkcijama sustava.

Prije izvoda modela sinkronog generatora s istaknutim polovima trećeg reda u prostoru stanja potrebno je uvesti nekoliko pojednostavljenja:

(1) pad napona na djelatnom otporu statora se može zanemariti: $r_s \approx 0$;

(2) pad napona na djelatnom otporu ekvivalentne mreže se može zanemariti: $r_e \approx 0$;

(3) kako se smatra da je brzina rotora približno jednaka sinkronoj, u sustavu relativnih jedinica brojčane vrijednosti induktiviteta i induktivnih reaktancija su jednake.

Uz navedena pojednostavljenja, uvrštavanjem jednadžbi koje opisuju tokove generatora (3-96) u naponske jednadžbe (3-66) i (3-67) dobivaju se sljedeći izrazi za struje statora:

$$i_d = \frac{1}{X_d^{'} + X_e} e_q^{'} - \frac{U_{m0}}{X_d^{'} + X_e} \cos\delta\,, \tag{3-100}$$

$$i_q = \frac{U_{m0}}{X_e + X_q} \sin\delta\,. \tag{3-101}$$

Izraz (3-100) koji opisuje uzdužnu komponentu struje statora potrebno je uvrstiti u diferencijalnu jednadžbu koja opisuje promjenu tranzijentne elektromotorne sile (3-98):

$$\frac{de_q^{'}}{dt} = \frac{e_{fd}}{T_{d0}^{'}} - \frac{1}{T_{d0}^{'}} \frac{X_d + X_e}{X_d^{'} + X_e} e_q^{'} + \frac{U_{m0}}{T_{d0}^{'}} \frac{X_d - X_d^{'}}{X_d^{'} + X_e} \cos\delta\,. \tag{3-102}$$

Izraze za struje statora (3-100) i (3-101) također valja uvrstiti u diferencijalnu jednadžbu koja opisuje promjenu kutne brzine rotora (3-72):

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M_t}{2H} - \frac{1}{2H} \frac{U_{m0}}{X_d^{'} + X_e} e_q^{'} \sin\delta + \frac{1}{4H} \frac{U_{m0}^2}{X_q + X_e} \frac{X_q - X_d^{'}}{X_d^{'} + X_e} \sin(2\delta)\,. \tag{3-103}$$

Zbog jednostavnosti i preglednosti zapisa modela uvode se sljedeće supstitucije:

$$b_0 = \omega_s, \tag{3-104}$$

$$b_1 = \frac{1}{2H} \frac{U_{m0}}{X_d^{'} + X_e}\,, \tag{3-105}$$

$$b_2 = \frac{1}{4H} \frac{U_{m0}^2}{X_q + X_e} \frac{X_q - X_d^{'}}{X_d^{'} + X_e}\,, \tag{3-106}$$

$$b_3 = \frac{U_{m0}}{T_{d0}^{'}} \frac{X_d - X_d^{'}}{X_d^{'} + X_e}\,, \tag{3-107}$$

$$b_4 = \frac{1}{T_{d0}^{'}} \frac{X_d + X_e}{X_d^{'} + X_e}\,, \tag{3-108}$$

$$u = \frac{e_{fd}}{T_{d0}^{'}}\,, \tag{3-109}$$

$$M = \frac{M_t}{2H}. \tag{3-110}$$

Varijable stanja modela sinkronog generatora trećeg reda pogodno je sad zapisati na sljedeći način:

$$\mathbf{x}^{\mathrm{T}} = \left[\delta \quad \Delta\omega \quad e_q^{'}\right] = \left[x_1 \quad x_2 \quad x_3\right]. \tag{3-111}$$

Konačno, model sinkronog generatora s istaknutim polovima trećeg reda u prostoru stanja poprima sljedeći oblik:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 x_2 \\ M - b_1 x_3 \sin x_1 + b_2 \sin\left(2x_1\right) \\ b_3 \cos x_1 - b_4 x_3 + u \end{bmatrix}. \tag{3-112}$$

Iako izrazi (3-102) i (3-103) pokazuju da u dinamici uvijek postoji tzv. dinamička izraženost, bez obzira je li riječ o turbogeneratoru ili hidrogeneratoru, do sada se u literaturi ta činjenica uzima u obzir samo za identifikaciju i estimaciju parametara [42, 43, 44]. Sinteza nelinearnog regulacijskog sustava u uzbudnom krugu do sada se uvijek provodila samo za model turbogeneratora, kod kojega se takav član zanemaruje.

4. Upravljanje zasnovano na pasivnosti

Pasivnost je osnovno svojstvo mnogih fizikalnih sustava koje se može definirati pojmovima disipacije i transformacije energije [70]. Sustav je pasivan ako se, uz ulazni signal konačne energije, na izlazu pojavljuje signal ograničene energije. Zbog toga se svojstvo pasivosti veže uz pojam stabilnosti u smislu ulaz-izlaz. Ovdje valja istaknuti razliku s obzirom na Lyapunovljevu stabilnost, koja se definira u odnosu na unutarnju stabilnost sustava, tj. koliko je stanje sustava udaljeno od ravnotežne točke. Upravljanje zasnovano na pasivnosti (*engl.* Passivity Based Control – PBC) može se podijeliti na L_gV regulaciju te na upravljanje zasnovano na strukturi i prigušenju (IDA).

L_gV regulacija polazi od Lyapunovljeve funkcije. Neka je $V(x(t))$ pozitivno definitna energetska funkcija, $V(x) > 0$. Ako je $\dot{V}(x(t), t) < 0$, onda energija sustava opada s vremenom, stanje sustava teži ka nuli, sustav je asimptotski stabilan [41]. $V(x)$ se tada naziva Lyapunovljeva funkcija. L_gV regulator proizlazi iz upravljačkog zakona [29]:

$$u = -k\left(L_gV(x)\right)^T, k > 0, \tag{4-1}$$

gdje je L_gV Lieva derivacija Lyapunovljeve funkcije $V(x)$ duž vektorskog polja $g(x)$:

$$L_gV = \frac{\partial V}{\partial x} g(x). \tag{4-2}$$

Vektorsko polje $g(x)$ definirano je na sljedeći način:

$$g(x) = \frac{d}{dt} x. \tag{4-3}$$

Značajno svojstvo L_gV regulatora je da ne mijenja položaj ravnotežne točke jer vrijedi:

$$\left.\frac{\partial V(x)}{\partial x}\right|_{x=x_0} = 0. \tag{4-4}$$

zatvoreni regulacijski sustav opisan je na sljedeći način [59]:

$$\dot{x} = f(x) - kg(x)\left(L_gV(x)\right)^T \tag{4-5}$$

L_gV regulator povećava estimirano područje atrakcije stabilne ravnotežne točke, kako je to pokazano u [59]. Međutim, u slučaju konzervativnih odziva ne mora nužno značiti da je stvarno područje atrakcije povećano [29]. Drugi nedostatak ovog upravljanja je da u stabilnoj ravnotežnoj točki, prema izrazu (4-2) upravljački signal iščezava. To znači da se L_gV regulator može primjenjivati kao stabilizator elektromehaničkih njihanja, ali ne i kao automatski

regulator napona, koji na izlazu mora davati konstantan upravljački signal u stacionarnom stanju.

Upravljanje zasnovano na strukturi i prigušenju polazi od modela sustava zapisanog u PCH obliku, koji će biti objašnjen u potpoglavlju 4.1. Detaljan opis ovog načina upravljanja dan je u potpoglavlju 4.2.

4.1. PCH sustavi

Poznato je da nelinearni sustavi mogu imati vrlo kompleksno dinamičko ponašanje [48]. Zbog toga su se svi pokušaji razvijanja jedinstvene metode sinteze nelinearnih regulatora pokazali neuspješnim. Kako bi se ipak moglo pristupiti sintezi nelinearnih regulatora bez forsirane promjene strukture sustava, kao što je to slučaj s metodama linearizacije po povratnoj vezi i kliznog načina upravljanja, polazi se od zakona koji moraju vrijediti za stvarne nelinearne sustave. To su zakoni očuvanja energije.

Svi stvarni elektromehanički sustavi mogu se modelirati Euler-Lagrangeovim jednadžbama izvedenim na temelju zakona o očuvanju energije [47]. Ovakav model sustava zadržava fizikalnu interpretaciju sustava i relativno je jednostavno odrediti utjecaj upravljačkog signala na sustav te stabilnost sustava. Euler-Lagrangeov zapis sustava često je zgodno transformirati u Hamiltonov zapis, što će biti prikazano u sljedećem potpoglavlju. Prije izvoda Euler-Lagrangeovog i Hamiltonovog modela sustava potrebno je definirati pojam pasivnosti i disipativnosti sustava, kako je to pokazano u [65]. Ako za sustav:

$$\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)), \mathbf{y} = h(\mathbf{x}(t)) \tag{4-6}$$

postoji nenegativna realna funkcija $V(\mathbf{x})$ (energetska funkcija) takva da vrijedi $V(0)=0$ te ako je zadovoljena nejednakost

$$\int_0^t \mathbf{u}^{\mathrm{T}}(\tau)\mathbf{y}(\tau)d\tau \geq V(\mathbf{x}(t)) - V(\mathbf{x}(0)) \geq 0\,, \tag{4-7}$$

za svaki trenutak t, tada je promatrani sustav pasivan. Ako je integral u formuli (4-7) strogo veći od nule, tada je sustav disipativan. Ukoliko je integral u (4-7) jednak nuli, sustav je bez gubitaka, tj. konzervativan.

4.1.1. Euler-Langrangeoveove i Hamiltonove jednadžbe

Ako se pojam gibanja sasvim poopći, tada je moguće struju ili magnetski tok također smatrati koordinatom gibanja, jednako kao i prostorne koordinate, kut, brzinu ili ubrzanje [37]. Na taj način se definira **q**, vektor generaliziranih koordinata sustava koje potpuno opisuju konfiguraciju sustava u bilo kojem trenutku [51]. Lagrangeova funkcija sustava $\mathcal{L}$ jednaka je razlici kinetičke i potencijalne energije sustava:

$$\mathrm{L}\left(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}\right)=T\left(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}}\right)-U(\mathbf{q}), \tag{4-8}$$

Gibanje fizikalnog sustava odvija se trajektorijama gdje integral Lagrangeove funkcije ima minimum [48, 37]:

$$\min_{\mathbf{q}}\int_{t_1}^{t_2}\mathrm{L}\left(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}},t\right)dt \tag{4-9}$$

Iz (4-9) slijedi da se fizikalni sustav može izraziti pomoću Lagrangeove funkcije na sljedeći način:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial \mathrm{L}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial\dot{\mathbf{q}}}\right]-\frac{\partial \mathrm{L}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial\mathbf{q}}=0 \tag{4-10}$$

Jednadžba (4-10) predstavlja Euler-Lagrangeove jednadžbe koje vrijede za konzervativne sustave, tj. sustave čija je energija konstantna. Proširi li se izraz (4-10) vektorom vanjskih poopćenih sila $\mathbf{Q}$, dobiva se:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial T(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial\dot{\mathbf{q}}}\right]-\frac{\partial T(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial\mathbf{q}}=\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial U(\mathbf{q})}{\partial\dot{\mathbf{q}}}\right]-\frac{\partial U(\mathbf{q})}{\partial\mathbf{q}}=\mathbf{Q}, \tag{4-11}$$

Sile koje opisuju disipacijsko djelovanje $\mathbf{F_d}$, npr. trenje, ne mogu se izraziti iz potencijala [48, 61] pa je njima potrebno proširiti izraz (4-11):

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial \mathrm{L}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial\dot{\mathbf{q}}}\right]-\frac{\partial \mathrm{L}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial\mathbf{q}}=\mathbf{Q}+\mathbf{F_d}. \tag{4-12}$$

Komponente vektora $\mathbf{F_d}$ su disipativne sile koje su proporcionalne poopćenim brzinama $\dot{\mathbf{q}}$ [62]. Za sustav s *n* stupnjeva slobode gibanja vrijedi:

$$f_i=-\sum_{j=1}^{n}c_{ij}\dot{q}_j, \tag{4-13}$$

gdje $c_{ij} > 0$ predstavljaju koeficijente prigušenja i disipativne su prirode. Rayleigheva disipacijska funkcija definirana je na sljedeći način [62]:

$$\mathrm{R} = \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} c_{ij}\dot{q}_i\dot{q}_j \,. \tag{4-14}$$

Iz definicije Rayleigheve funkcije vidljivo je da je njena parcijalna derivacija po *i*-toj poopćenoj brzini jednaka negativnoj disipativnoj sili f_i:

$$\frac{\partial \mathrm{R}}{\partial \dot{q}_i} = \sum_{j=1}^{n} c_{ij}\dot{q}_j = -f_i \tag{4-15}$$

Uvrštavanjem izraza (4-15) u (4-12) dobivaju se Euler-Lagrangeove jednadžbe s disipacijom:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial \mathrm{L}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}}\right] - \frac{\partial \mathrm{L}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{Q} - \frac{\partial \mathrm{R}(\dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} \,. \tag{4-16}$$

Označi li se vektor vanjskih sila koje djeluju na sustav s **u**, iz (4-16) konačno slijedi:

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial \mathrm{L}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial \dot{\mathbf{q}}}\right] - \frac{\partial \mathrm{L}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} + \frac{\partial \mathrm{R}(\dot{\mathbf{q}})}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{u} \,. \tag{4-17}$$

Sustavi koji se mogu opisati Euler-Lagrangeovim jednadžbama nazivaju se Euler-Lagrangeovi sustavi. Zbog svojih prednosti Euler-Lagrangeov zapis sustava postao je osnova upravljanja zasnovanog na energetskim funkcijama, kako je to objašnjeno u [46]. Iz izraza (4-17) je vidljivo da upravljački signal **u** zadržava jasnu fizikalnu interpretaciju i predstavlja vezu sustava i regulatora. Stabilnost sustava se može promatrati u smislu energetske ravnoteže između regulatora i sustava. Ukoliko se ulazi i izlazi sustava odaberu tako da njihov produkt predstavlja funkciju snage, Euler-Lagrangeov model postaje pasivan, što ga čini robusnim u odnosu na nemodeliranu dinamiku sustava.

Fizički sustav s *n* stupnjeva slobode gibanja opisan je, dakle, s *n* Lagrangeovih diferencijalnih jednadžbi drugog reda [49]. Transformacijom tih jednadžbi u 2*n* diferencijalnih jednadžbi prvog reda dobivaju se Hamiltonove diferencijalne jednadžbe. Za transformaciju sustava iz Euler-Lagrangeovog u Hamiltonov zapis potrebno je uvesti vektor poopćenih impulsa **p** koji se definiraju na sljedeći način:

$$p_i = \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial \dot{q}_i} \,. \tag{4-18}$$

Uvrštavanjem jednakosti (4-18) u (4-10) dobiva se izraz za vremensku derivaciju poopćenih impulsa:

$$\dot{p}_i = \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial q_i}. \tag{4-19}$$

Totalna derivacija Lagrangeove funkcije glasi:

$$d\mathrm{L}\left(\dot{q},q,t\right) = \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial q_i} dq_i + \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial \dot{q}_i} d\dot{q}_i + \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial t} dt = \dot{p}_i dq_i + p_i d\dot{q}_i + \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial t} dt\,. \tag{4-20}$$

Pomoću Legenderove transformacije suprotnog predznaka, umjesto Lagrangeove funkcije $\mathcal{L}(\dot{q},q,t)$ uvodi se nova funkcija $\mathcal{H}(p,q,t)$ [50]:

$$\mathrm{H}\left(p,q,t\right) = \dot{q}_i p_i - \mathrm{L}\left(\dot{q},q,t\right), \tag{4-21}$$

Dobivena funkcija se naziva Hamiltonijan. Totalna derivacija Hamiltonijana je:

$$d\mathrm{H}(q_i, p_i, t) = p_i d\dot{q}_i + \dot{q}_i dp_i - d\mathrm{L}\left(\dot{q},q,t\right) = p_i d\dot{q}_i + \dot{q}_i dp_i - \dot{p}_i dq_i - p_i d\dot{q}_i - \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial t} dt =$$

$$= -\dot{p}_i dq_i + \dot{q}_i dp_i - \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial t} dt = \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial q_i} dq_i + \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial p_i} dp_i + \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial t} dt \tag{4-22}$$

Iz totalne derivacije Hamiltonijana vidljivo je novih $2n$ diferencijalnih jednadžbi prvog reda koje predstavljaju Hamiltonove kanonske jednadžbe sustava na koji ne djelu vanjske sile [52]:

$$\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial q_i} = -\dot{p}_i\,,\ \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial p_i} = \dot{q}_i\,. \tag{4-23}$$

Također je vidljivo da je vremenska derivacija Hamiltonove funkcije analogna vremenskoj derivaciji Lagrangeove funkcije. Hamiltonova funkcija koja nije eksplicitno ovisna o vremenu odgovara funkciji totalne energije sustava.

Uz pretpostavku postojanja vanjskih sila koje djeluju na sustav **u**, izraz za vremensku derivaciju generaliziranih impulsa (4-19) potrebno je proširiti na sljedeći način:

$$\dot{p}_i = \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial q_i} + u_i\,, \tag{4-24}$$

pa Hamiltonove jednadžbe poprimaju sljedeći oblik:

$$\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial q_i} = -\dot{p}_i + u_i\,,\ \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial p_i} = \dot{q}_i\,. \tag{4-25}$$

Doda li se i Rayleigheva disipacijska funkcija, vremenska derivacija poopćenih impulsa iznosi:

$$\dot{p}_i = \frac{\partial \mathrm{L}}{\partial q_i} + u_i - \frac{\partial \mathrm{R}}{\partial \dot{q}_i}, \tag{4-26}$$

a Hamiltonove jednadžbe se konačno zapisuju na sljedeći način:

$$\dot{p}_i = -\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial q_i} - \frac{\partial \mathrm{R}}{\partial \dot{q}_i} + u_i, \; \dot{q}_i = \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial p_i}. \tag{4-27}$$

Dobivene jednadžbe pogodno je zapisati u matričnom obliku. Kako bi se to ostvarilo, vektor generaliziranih koordinata i vektor generaliziranih impulsa zapisuju se zajedno kao vektor stanja [53]:

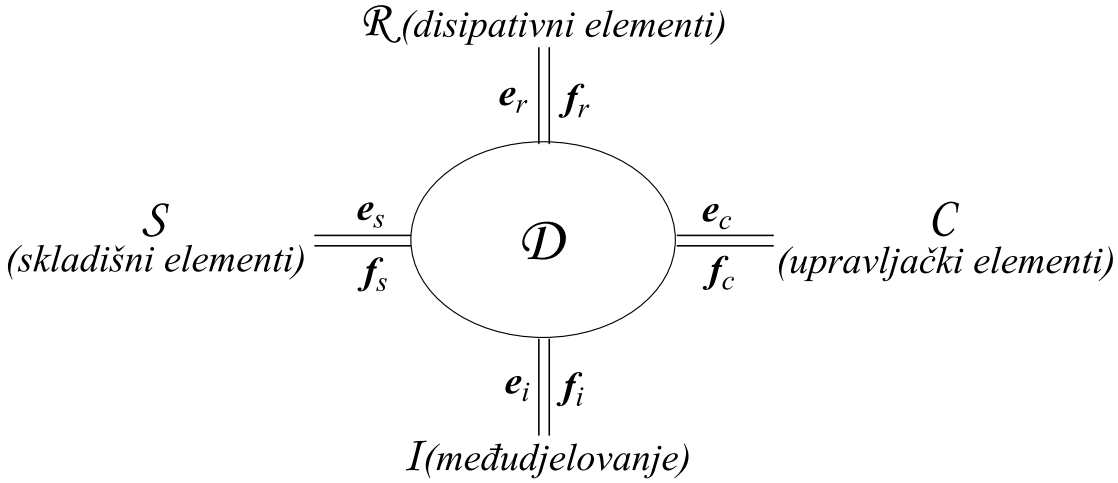
$$\mathbf{x} = (\mathbf{q}, \mathbf{p}) \; . \tag{4-28}$$

Hamiltonove jednadžbe u matričnom obliku prema tome glase:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\mathbf{p}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{q}} \\ \dfrac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{p}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ \mathbf{I} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{\partial \mathrm{R}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{u} \end{bmatrix}. \tag{4-29}$$

4.1.2. Teorija PCH sustava

Dok je za upravljanje mehaničkim sustavima dovoljno oblikovati potencijalnu energiju, za složenije sustave je također potrebno upravljati kinetičkom energijom, pri čemu nije moguće zadržati Euler-Lagrangeov zapis sustava [46]. Kako bi se upravljanje zasnovano na energetskim funkcijama moglo primjenjivati na širi opseg fizikalnih sustava, devedesetih godina prošlog stoljeća Arjan van der Schaft i Bernhard Maschke uvode pojam portovima upravljanih Hamiltonivih (PCH) sustava [46, 48, 63]. Oni fizikalni sustav interpretiraju kao međusobno povezane podsustave među kojima dolazi do pretvorbe energije. Podsustave dijele na otporne (disipativne), skladišne i upravljačke elemente (izvore) te međudjelovanje [64], a njihovu međusobnu povezanost daju u obliku Diracove strukture, kako je prikazano na slici 4.1.



Slika 4.1. Diracova struktura fizikalnog sustava [66]

Autori uvode poopćene parove varijabli čiji umnožak daje snagu, tj. promjenu energije u vremenu. Varijable nazivaju napor (*engl.* effort) $e \in \mathcal{E}$ i tok (*engl.* flow) $f \in \mathcal{F}$, koje imaju svoju fizikalnu interpretaciju. Pri tome su $\mathcal{E}$ i $\mathcal{F}$ vektorski prostori, takvi da je prostor $\mathcal{E}$ dualni prostor vektorskog prostora $\mathcal{F}$. Na primjer, za električne fizikalne sustave napon predstavlja varijablu napora, a struja varijablu toka. Za magnetske sustave situacija je obrnuta te struja predstavlja napor, a magnetski tok je tok. U mehaničkim sustavima za slučaj translacijskih gibanja napor predstavlja sila, a tok brzina. Za rotacijska gibanja napor je moment, a tok je kutna brzina. Ovdje valja primijetiti da napori odgovaraju ulaznim varijablama, a tokovi izlaznim varijablama fizikalnih sustava te takav izbor varijabli osigurava izgradnju pasivnog modela sustava. Neka postoji bilinearna forma [76]:

$$\left(\boldsymbol{f}_1,\boldsymbol{e}_1\right),\left(\boldsymbol{f}_2,\boldsymbol{e}_2\right)_{\mathrm{F}\times\mathrm{E}} := \boldsymbol{e}_1^T\boldsymbol{f}_2 + \boldsymbol{e}_2^T\boldsymbol{f}_1 \tag{4-30}$$

Tada je Diracova struktura definirana kao potprostor:

$$\mathrm{D} \subset \mathrm{F}\times\mathrm{E}, \tag{4-31}$$

takav da vrijedi:

$$\mathrm{D} = \mathrm{D}^{\perp}, \tag{4-32}$$

gdje $\perp$ označava ortogonalni komplement s obzirom na bilinearnu formu $\ll , \gg$.

Izraz (4-32) ukazuje na sljedeća svojstva Diracove strukture [66]:

$$e^T f = 0, \forall (f,e) \in \mathrm{D}, \tag{4-33}$$

$$dim\mathrm{D} = dim\mathrm{F}\ . \tag{4-34}$$

Ako se izraz (4-33) usporedi s definicijom pasivnosti sustava (4-7), vidljivo je da Diracova struktura osigurava pasivnost modela sustava. Kako je objašnjeno u [66], za svako antisimetično preslikavanje $J:\mathrm{E}\to\mathrm{F}$, slika funkcije $\left\{(f,e)\in \mathrm{F}\times\mathrm{E}\,\middle|\, f=Je\right\}$ je Diracova struktura.

Izraz za energiju pojedinog elementa E_* na slici 4.1. moguće je napisati u sljedećem obliku:

$$E_* = \int_{t_0}^{t} e(\tau) f(\tau) d\tau = \int_{x(0)}^{x(t)} e(x) dx . \tag{4-35}$$

U (4-35) napravljena je supstitucija varijabli i definirana je varijabla *x* za koju vrijedi:

$$dx = f dt \Rightarrow f = \frac{dx}{dt} = \dot{x} . \tag{4-36}$$

Sada valja raspisati zakon o očuvanju energije sustava prikazanog na slici 4.1, uz pretpostavku da je sustav konzervativan i ne postoji upravljački element:

$$e_s^T f_s + e_i^T f_i = 0 . \tag{4-37}$$

Vremenska derivacija uskladištene energije sustava prema tome iznosi:

$$\dot{E}(\mathbf{x}) = -e_s^T f_s = e_i^T f_i , \tag{4-38}$$

gdje je **x** vektor varijabli stanja *k*-dimenzionalnog skladišnog elementa. Integriranjem izraza (4-38) dobiva se ukupna uskladištena energija:

$$E\left[\mathbf{x}(t)\right] - E\left[\mathbf{x}(0)\right] = \int_{t_0}^{t} e_i^T(\tau) f_i(\tau) d\tau . \tag{4-39}$$

Ako se funkcija skladištenja energije zapiše u obliku hamiltonijana $E(\mathbf{x}) = \mathrm{H}(\mathbf{x})$, iz jednakosti (4-35) i (4-38) slijedi:

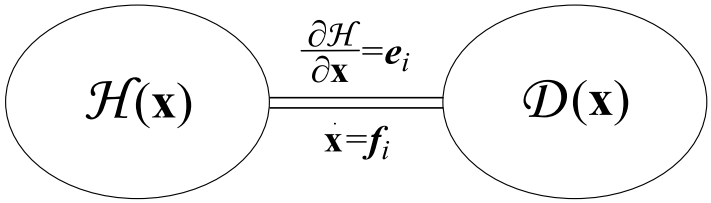
$$\dot{x}_j = f_i ,\; e_j = \frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial x_j} ,\quad j = 1...k , \tag{4-40}$$

$$\frac{d\mathrm{H}}{dt} = \sum_{j=1}^{k} f_{ij} e_{ij} . \tag{4-41}$$

gdje je *k* broj elemenata u vektoru **x**. Uvrštavanjem izraza (4-40) u antisimetrično preslikavanje $\boldsymbol{f} = \mathbf{J}\boldsymbol{e}$ koje ima Diracovu strukturu dobiva se:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}. \tag{4-42}$$

Izraz (4-42) opisuje konzervativan sustav bez upravljačkih ulaza prikazan na slici 4.2. Strukturna matrica **J** definira međudjelovanje pojedinih varijabli stanja. Kako bi dobiveni sustav bio pasivan, matrica **J** mora biti antisimetrična.



Slika 4.2. Konzervativni sustav bez upravljačkih ulaza.

Dodavanjem upravljačkih ulaza **u** koji djeluju na pojedina stanja sustava izraz (4-42) se proširuje:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}, \tag{4-43}$$

gdje **g**(**x**) predstavlja ulazni vektor. Izraz (4-43) predstavlja pasivni konzervativni PCH. Uvjet pasivnosti sustava (4-7) u notaciji Hamiltonovog sustava glasi [52]:

$$\dot{\mathrm{H}} \le \mathbf{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{u}, \tag{4-44}$$

čime je zadan i oblik izlaza sustava **y**. Za konzervativne sustave izraz (4-44) jednak je:

$$\dot{\mathrm{H}} = \mathbf{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{u}. \tag{4-45}$$

Prema tome vrijedi:

$$\mathbf{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{u} = \dot{\mathrm{H}} = \frac{\partial \mathrm{H}^{T}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathrm{H}^{T}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{J}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial \mathrm{H}^{T}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}, \tag{4-46}$$

Da bi izraz (4-46) bio valjan za svaki vektor **u**, mora vrijediti:

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}^{\mathbf{T}}(\mathbf{x})\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}. \tag{4-47}$$

Na kraju je potrebno modelirati disipativni član. Snaga disipativnog člana je uvijek pozitivna, jer bi u suprotnom bilo moguće da disipativni član proizvodi energiju. Sukladno s Rayleighevom funkcijom, modelira se linearna disipacija [46]:

$$\mathbf{u}_{\mathbf{r}} = -\mathbf{S}\mathbf{y}_{\mathbf{r}},\ \mathbf{S} \ge 0, \tag{4-48}$$

koja se dodaje u izraz (4-42):

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} + \mathbf{g}_{\mathbf{r}}(\mathbf{x})\mathbf{u}_{\mathbf{r}}\,, \tag{4-49}$$

gdje $\mathbf{g}_{\mathbf{r}}$ predstavlja ulazni disipacijski vektor. Oblik disipacijskog izlaza $\mathbf{y}_{\mathbf{r}}$ određuje se prema definiciji pasivnosti analogno izrazu (4-47):

$$\mathbf{y}_{\mathbf{r}} = \mathbf{g}_{\mathbf{r}}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x})\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\,. \tag{4-50}$$

Uvrštavanje izraza (4-50) u (4-49) daje sljedeću jednakost:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} - \mathbf{g}_{\mathbf{r}}(\mathbf{x})\mathbf{S}\mathbf{y}_{\mathbf{r}} = \mathbf{J}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} - \mathbf{g}_{\mathbf{r}}(\mathbf{x})\mathbf{S}\mathbf{g}_{\mathbf{r}}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x})\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} =$$

$$= \mathbf{J}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} - \mathbf{R}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \left[\mathbf{J} - \mathbf{R}\right]\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}\,, \tag{4-51}$$

Pri čemu je disipacijska matrica **R** jednaka:

$$\mathbf{R} = \mathbf{g}_{\mathbf{r}}(\mathbf{x})\mathbf{S}\mathbf{g}_{\mathbf{r}}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x})\,. \tag{4-52}$$

Konačno su izvedeni svi izrazi potrebni za definiranje PCH sustava:

$$\dot{\mathbf{x}} = \left[\mathbf{J} - \mathbf{R}\right]\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}\,, \tag{4-53}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x})\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\,. \tag{4-54}$$

Matrica $\mathbf{J}$ se naziva strukturna Poissonova matrica koja, po definiciji pasivnosti, mora biti antisimetrična ($\mathbf{J}(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x})$). Matrica $\mathbf{R}$ je Rayleigheva disipacijska matrica definirana izrazom (4-52). Kako je matrica $\mathbf{S}$ pozitivno semidefinitna, iz izraza (4-52) je očito da matrica $\mathbf{R}$ mora biti simetrična pozitivno semidefinitna ($\mathbf{R}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x}) \geq 0$). Poissonova strukturna matrica $\mathbf{J}$ se često može izravno fizikalno interpretirati te je stoga iz nje jednostavno vidjeti dinamička svojstva sustava. Usporedbom izraza (4-53) i (4-29) moguće je primijetiti da su klasični Hamiltonovi sustavi specijalni oblik PCH sustava.

S obzirom da je hamiltonijan odabran za funkciju uskladištenja energije sustava, o energetskoj ravnoteži PCH sustava može se raspravljati na temelju njegove vremenske derivacije, uz uvrštavanje izraza (4-53):

$$\dot{\mathrm{H}} = \frac{\partial \mathrm{H}^T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\dot{\mathbf{x}} = \frac{\partial \mathrm{H}^T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{J}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial \mathrm{H}^T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{R}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial \mathrm{H}^T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u}$$

$$= -\frac{\partial \mathrm{H}^T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{R}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{u} \ . \tag{4-55}$$

Izluči li se član $\mathbf{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{u}$:

$$\mathbf{y}^{\mathrm{T}}\mathbf{u} = \dot{\mathrm{H}} + \frac{\partial \mathrm{H}^T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{R}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}, \tag{4-56}$$

te dobiveni izraz integrira:

$$\int_0^t \mathbf{y}^{\mathrm{T}}(\tau)\mathbf{u}(\tau)\mathrm{d}\tau = \int_0^t \dot{\mathrm{H}}(\tau)\mathrm{d}\tau + \int_0^t \frac{\partial \mathrm{H}^T(\mathbf{x}(\tau))}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{R}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x}(\tau))}{\partial \mathbf{x}}\mathrm{d}\tau =$$

$$\mathrm{H}(x(t)) - \mathrm{H}(x(0)) + \int_0^t \frac{\partial \mathrm{H}^T(\mathbf{x}(\tau))}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{R}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x}(\tau))}{\partial \mathbf{x}}\mathrm{d}\tau\,, \tag{4-57}$$

na lijevoj strani znaka jednakosti je izraz za energiju koja je dovedena u sustav, izraz $\mathcal{H}(x(t)) - \mathcal{H}(x(0))$ odgovara uskladištenoj energiji, a zadnji član predstavlja disipiranu energiju sustava. Na ovaj način je potvrđeno da uskladištena energija sustava ne može biti veća od energije dovedene u sustav te da je PCH sustav strukturno pasivan, a hamiltonijan H predstavlja Lyapunovljevu funkciju susatva.

4.2. Upravljanje zasnovano na strukturi i prigušenju (IDA)

Teorija metode upravljanja zasnovanog na strukturi i prigušenju zasniva se na PCH modelu sustava. U prošlom potpoglavlju je objašnjeno kako PCH sustav zadržava fizikalnu interpretaciju sustava te je, zbog svojstva strukturne pasivnosti, ovakav model robusan na nemodeliranu dinamiku. Zbog navedenih prednosti PCH sustava cilj je ostvariti takvu regulaciju da zatvoreni regulacijski krug također bude PCH sustav. Doda li se PCH modelu sustava (4-53), (4-54) regulator koji također ima PCH oblik s varijablama stanja **z**:

$$\dot{\mathbf{z}} = \left[\mathbf{J}_{\mathbf{c}} - \mathbf{R}_{\mathbf{c}}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_c(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} + \mathbf{g}_{\mathbf{c}}(\mathbf{z})\mathbf{u}_{\mathbf{c}}, \tag{4-58}$$

$$\mathbf{y}_{\mathbf{c}} = \mathbf{g}_{\mathbf{c}}^{\mathbf{T}}(\mathbf{z})\frac{\partial \mathrm{H}_c(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}, \tag{4-59}$$

tako da se postigne regulacijska struktura prikazana na slici 4.3, gdje je:

$$\mathbf{u} = -\mathbf{y_c} + \mathbf{v}\,,\ \mathbf{u_c} = \mathbf{y}\,, \tag{4-60}$$

za zatvoreni regulacijski krug će vrijediti:

$$\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{x}}\\ \dot{\mathbf{z}}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\mathbf{J}-\mathbf{R} & 0\\ 0 & \mathbf{J_c}-\mathbf{R_c}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\\ \dfrac{\partial \mathrm{H}_c(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{g(x)u}\\ \mathbf{g_c^T(z)u_c}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{g(x)v}\\ 0\end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix}\mathbf{J}-\mathbf{R} & 0\\ 0 & \mathbf{J_c}-\mathbf{R_c}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\\ \dfrac{\partial \mathrm{H}_c(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}-\mathbf{g(x)g_c^T(z)}\dfrac{\partial \mathrm{H}_c(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}\\ \mathbf{g_c(z)g^T(x)}\dfrac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{g(x)v}\\ 0\end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix}\mathbf{J}-\mathbf{R} & 0\\ 0 & \mathbf{J_c}-\mathbf{R_c}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\\ \dfrac{\partial \mathrm{H}_c(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0 & -\mathbf{g(x)g_c^T(z)}\\ \mathbf{g_c(z)g^T(x)} & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\\ \dfrac{\partial \mathrm{H}_c(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{g(x)v}\\ 0\end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix}\mathbf{J}-\mathbf{R} & -\mathbf{g(x)g_c^T(z)}\\ \mathbf{g_c(z)g^T(x)} & \mathbf{J_c}-\mathbf{R_c}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\\ \dfrac{\partial \mathrm{H}_c(\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{g(x)v}\\ 0\end{bmatrix} \tag{4-61}$$

U izraz (4-61) uvodi se hamiltonijan zatvorenog regulacijskog kruga:

$$\mathrm{H}_d(\mathbf{x},\mathbf{z}) = \mathrm{H}(\mathbf{x}) + \mathrm{H}_c(\mathbf{z})\,, \tag{4-62}$$

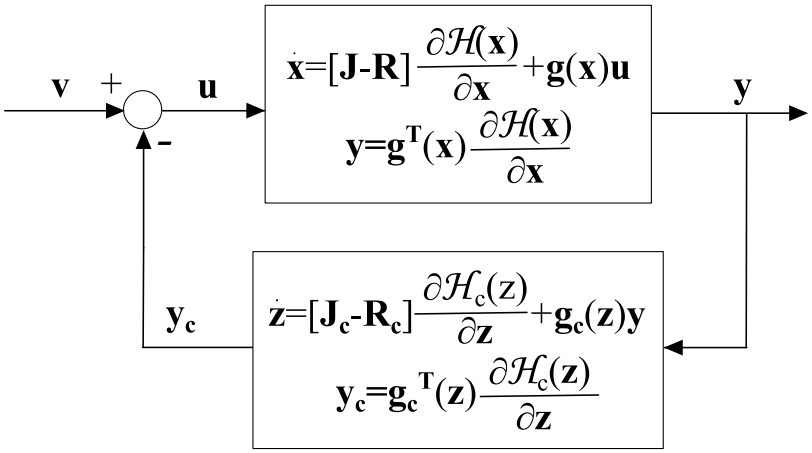
čime je dokazano da je zatvoreni regulacijski krug također PCH sustav:

$$\begin{bmatrix}\dot{\mathbf{x}}\\ \dot{\mathbf{z}}\end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix}\mathbf{J} & -\mathbf{g(x)g_c^T(z)}\\ \mathbf{g_c(z)g^T(x)} & \mathbf{J_c}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\mathbf{R} & 0\\ 0 & \mathbf{R_c}\end{bmatrix}\right)\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x},\mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}}\\ \dfrac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x},\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{g(x)}\\ 0\end{bmatrix}\mathbf{u_r} =$$

$$= \left[\mathbf{J_d} - \mathbf{R_d}\right]\begin{bmatrix}\dfrac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x},\mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}}\\ \dfrac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x},\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\mathbf{g(x)}\\ 0\end{bmatrix}\mathbf{u_r}\,, \tag{4-63}$$

gdje je $\mathbf{J_d}$ željena strukturna matrica zatvorenog regulacijskog kruga, koja mora biti antisimetrična. $\mathbf{R_d}$ je željena disipacijska matrica zatvorenog regulacijskog kruga, koja mora

biti pozitivno definitna i simetrična. Željeni hamiltonijan zatvorenog regulacijskog kruga $\mathcal{H}_d$ treba imati minimum u željenoj ravnotežnoj točki $\mathbf{x} = \mathbf{x}_*$.



Slika 4.3. PCH regulacijska struktura s IDA regulatorom

Prema [54] postoje tri metode pomoću kojih je moguće ostvariti željeni oblik zatvorenog regulacijskog kruga:

(1) Neparametrizirana IDA – unaprijed se zadaju željena strukturna matrica i matrica prigušenja te se rješava parcijalna diferencijalna jednadžba za zatvoreni regulacijski krug prema (4-63). Od svih mogućih rješenja se odabire ono koje ima minimum u željenom ravnotežnom stanju.

(2) Algebarska IDA – unaprijed se zadaje hamiltonijan zatvorenog regulacijskog kruga te se traže elementi strukturne matrice i matrice prigušenja prema (4-63). Postupak sinteze algebarskog IDA regulatora dan je u [46].

(3) Parametrizirana IDA – zadaje se klasa hamiltonijana zatvorenog regulacijskog kruga, čime je određen novi skup parcijalnih diferencijalnih jednadžbi, kao i određena ograničenja u strukturnoj matrici i matrici prigušenja.

U [57] autori navode još jednu metodu isprepletene algebarsko-parametrizirane IDA metode, prema kojoj se parcijalne diferencijalne jednadžbe rješavaju u odabranom potprostoru stanja gdje je njihov proračun najjednostavniji, a tada se određuju željena strukturna matrica i matrica prigušenja.

Prednosti i nedostatci pojedinih metoda sinteze IDA regulatora raspravljeni su u [56]. Algebarska IDA je metoda u kojoj je zakon upravljanja poznat tijekom postupka sinteze, ali se dobivaju manje robusni regulatori, jer je ova metoda analogna linearizaciji po povratnoj

vezi. Isprepletena algebarsko-parametrizirana IDA metoda olakšava sintezu regulatora, ali se u modelu pojavljuju dodatne varijable stanja.

U ovoj disertaciji bit će korištena metoda neparametrizirana IDA (1). Prednost te metode sastoji se u tome da se za zatvoreni regulacijski krug unaprijed zadaje međusobna povezanost pojedinih varijabli stanja (u matrici $\mathbf{J_d}$), kao i stupanj prigušenja pojedine varijable stanja (u matrici $\mathbf{R_d}$). Ovom metodom moguće je postići sintezu originalnih regulatora povoljnih regulacijskih svojstava, ali je rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi teško.

Ukoliko regulator djeluje na varijable stanja sustava, može se pisati:

$$\mathbf{x} = \left[\mathbf{J} + \mathbf{J_c} - \mathbf{R} - \mathbf{R_c}\right]\frac{\mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \begin{bmatrix}\mathbf{g(x)} \\ 0\end{bmatrix}\mathbf{u_r} = \left[\mathbf{J_d} - \mathbf{R_d}\right]\frac{\mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \begin{bmatrix}\mathbf{g(x)} \\ 0\end{bmatrix}\mathbf{u_r}. \tag{4-64}$$

vrijede sljedeće jednakosti [55]:

$$\mathbf{J_c} = \mathbf{J_d} - \mathbf{J}, \tag{4-65}$$

$$\mathbf{R_c} = \mathbf{R_d} - \mathbf{R}, \tag{4-66}$$

$$\mathrm{H}_c = \mathrm{H}_d - \mathrm{H}. \tag{4-67}$$

Ako se uvjet za sintezu regulatora postavi na sljedeći način:

$$\left[\mathbf{J} - \mathbf{R}\right]\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g(x)u} = \left[\mathbf{J_d} - \mathbf{R_d}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}, \tag{4-68}$$

uvrštavanjem jednakosti (4-65) do (4-67) se dobiva:

$$\left[\mathbf{J} - \mathbf{R}\right]\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{gu} = \left[\mathbf{J} + \mathbf{J_c} - \mathbf{R} - \mathbf{R_c}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial \mathbf{x}} = \left[\mathbf{J} - \mathbf{R}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{J_c} - \mathbf{R_c}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial \mathbf{x}} =$$

$$= \left[\mathbf{J} - \mathbf{R}\right]\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{J} - \mathbf{R}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{J_c} - \mathbf{R_c}\right]\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{J_c} - \mathbf{R_c}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial \mathbf{x}} =$$

$$= \left[\mathbf{J} - \mathbf{R}\right]\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{J_d} - \mathbf{R_d}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{J_c} - \mathbf{R_c}\right]\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}}. \tag{4-69}$$

Iz izraza (4-69) dobiva se sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje je potrebno riješiti metodom neparametrizirana IDA:

$$\left[\mathbf{J_d} - \mathbf{R_d}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{J_c} - \mathbf{R_c}\right]\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}} - \mathbf{gu} = 0. \tag{4-70}$$

Na temelju dobivenog izraza (4-70) moguće je odrediti upravljački algoritam **u** eksplicitno:

$$\mathbf{u} = \left(\mathbf{g}^{\mathrm{T}}\mathbf{g}\right)^{-1}\mathbf{g}^{\mathrm{T}}\left(\left[\mathbf{J}_{\mathbf{d}} - \mathbf{R}_{\mathbf{d}}\right]\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial \mathbf{x}} + \left[\mathbf{J}_{\mathbf{c}} - \mathbf{R}_{\mathbf{c}}\right]\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}}\right). \tag{4-71}$$

Za Hamiltonove sustave energetska ravnoteža je ključni faktor stabilnosti, a gradijent hamiltonijana $\partial \mathrm{H} / \partial x$ predstavlja predznak promjene ukupne energije [60, 58]. Prema tome, da bi dobiveni upravljački zakon stabilizirao generator u željenoj radnoj točki, potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete [55]:

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial \mathbf{x}}\right|_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_*} = 0\,, \tag{4-72}$$

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d^2}{\partial \mathbf{x}^2}\right|_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_*} > 0\,. \tag{4-73}$$

4.3. Sinteza IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja

U ovom podpoglavlju bit će objašnjeno na koji način je provedena sinteza IDA regulatora u ulozi stabilizatora elektromehaničkih njihanja. Prvo je potrebno model sinkronog generatora s istaknutim polovima trećeg reda dan izrazom (3-112):

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 x_2 \\ M - b_1 x_3 \sin x_1 + b_2 \sin\left(2x_1\right) \\ b_3 \cos x_1 - b_4 x_3 + u \end{bmatrix}. \tag{4-74}$$

napisati u obliku PCH sustava (4-53):

$$\begin{bmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\dfrac{b_3}{b_1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix}\partial_{x_1}\mathrm{H}\\ \partial_{x_2}\mathrm{H}\\ \partial_{x_3}\mathrm{H}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}u\,. \tag{4-75}$$

Da bi dobiveni izraz bio ekvivalentan modelu generatora opisanom u (4-74), hamiltonijan sustava H mora glasiti:

$$\mathrm{H} = \frac{1}{2}b_0 x_2^2 - M x_1 - b_1 x_3 \cos x_1 + \frac{1}{2}b_2 \cos\left(2x_1\right) + \frac{b_1 b_4}{2b_3}x_3^2\,, \tag{4-76}$$

a njegove parcijalne derivacije tada iznose:

$$\partial_{x_1}\mathrm{H} = \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial x_1} = -M + b_1 x_3 \sin x_1 - b_2 \sin\left(2x_1\right), \tag{4-77}$$

$$\partial_{x_2} \mathrm{H} = \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial x_2} = b_0 x_2 , \tag{4-78}$$

$$\partial_{x_3} \mathrm{H} = \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial x_3} = -b_1 \cos x_1 + \frac{b_1 b_4}{b_3} x_3 . \tag{4-79}$$

Poznato je da matrica **J** mora biti antisimetrična, a matrica **R** simetrična i nenegativno definitna pa se iz (4-26), rastavljanjem matrice koja množi vektor parcijalnih derivacija Hamiltonijana, dobiva:

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \tag{4-80}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{b_3}{b_1} \end{bmatrix}. \tag{4-81}$$

Prema metodi neparametrizirana IDA sljedeći korak je zadavanje željene strukturne matrice $\mathbf{J_d}$ i željene matrice prigušenja $\mathbf{R_d}$:

$$\mathbf{J_d} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -\alpha \\ 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix}, \tag{4-82}$$

$$\mathbf{R_d} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k \end{bmatrix}, \tag{4-83}$$

U željenu strukturnu matricu dodan je parametar α, koji povezuje dvije varijable stanja, promjenu kutne brzine generatora x_2 i tranzijentnu elektromotornu silu x_3. U željenu matricu prigušenja dodan je parametar k koji određuje prigušenje tranzijentne elektromotorne sile.

Nakon što je definiran model generatora u PCH obliku i zadano ponašanje zatvorenog regulacijskog kruga pomoću željene strukturne matrice i željene matrice prigušenja, potrebno je pronaći zakon upravljanja koji će takvo ponašanje zatvorenog regulacijskog kruga ostvariti. Strukturnu matricu i matricu prigušenja regulatora moguće je odrediti prema izrazima (4-65) do (4-68):

$$\mathbf{J_c} = \mathbf{J_d} - \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha \\ 0 & \alpha & 0 \end{bmatrix}, \tag{4-84}$$

$$\mathbf{R_c} = \mathbf{R_d} - \mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k - \frac{b_3}{b_1} \end{bmatrix}. \tag{4-85}$$

Kako bi matrica prigušenja regulatora $\mathbf{R_c}$ bila pozitivno semidefinitna, parametar k mora zadovoljiti sljedeći uvjet:

$$k \geq \frac{b_3}{b_1}. \tag{4-86}$$

Dobivene matrice sada se uvrštavaju u izraz (4-75):

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -\alpha \\ 0 & \alpha & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial_{x_1} \mathrm{H}_c \\ \partial_{x_2} \mathrm{H}_c \\ \partial_{x_3} \mathrm{H}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha \\ 0 & \alpha & -\left(k - \frac{b_3}{b_1}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \partial_{x_1} \mathrm{H} \\ \partial_{x_2} \mathrm{H} \\ \partial_{x_3} \mathrm{H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u. \tag{4-87}$$

Rješavanjem parcijalnih diferencijalnih jednadžbi (4-87) dobiva se upravljački algoritam:

$$u = \left(kb_1 - b_3\right) \cos x_1 + \alpha b_0 x_2 + b_4 x_3. \tag{4-88}$$

Pri tome parcijalne derivacije hamiltonijana regulatora $\mathcal{H}_c$ iznose:

$$\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial x_1} = \alpha b_1 \cos x_1, \tag{4-89}$$

$$\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial x_2} = 0, \tag{4-90}$$

$$\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial x_3} = -\frac{b_1 b_4}{b_3} x_3. \tag{4-91}$$

Hamiltonijan regulatora dobiva se iz njegovih parcijalnih derivacija:

$$\mathrm{H}_c = \alpha b_1 \sin x_1 - \frac{b_1 b_4}{2 b_3} x_3^2. \tag{4-92}$$

Hamiltonijan zatvorenog regulacijskog kruga $\mathcal{H}_d$ jednak je zbroju Hamiltonijana modela generatora i hamiltonijana regulatora:

$$\mathrm{H}_d = \mathrm{H} + \mathrm{H}_c = \frac{1}{2} b_0 x_2^2 + \frac{1}{2} b_2 \cos\left(2x_1\right) - M x_1 - b_1 \left(x_3 \cos x_1 - \alpha \sin x_1\right). \quad (4\text{-}93)$$

Nužan uvjet stabilizacije reguliranog sustava u željenoj radnoj točki je izjednačavanje svih parcijalnih derivacija hamiltonijana zatvorenog regulacijskog kruga po varijablama stanja u toj točki s nulom (4-72). Dovoljan uvjet stabilizacije sustava u željenoj radnoj točki koji proizlazi iz definicije Lyapunovljeve stabilnosti glasi: Hessova matrica hamiltonijana zatvorenog regulacijskog kruga u željenoj radnoj točki mora biti pozitivno definitna (4-73). Raspisivanjem izraza (4-72) dobivaju se sljedeće parcijalne derivacije:

$$\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_1} = b_1 \left(x_3 \sin x_1 + \alpha \cos x_1\right) - b_2 \sin\left(2x_1\right) - M\,, \quad (4\text{-}94)$$

$$\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_2} = b_0 x_2\,, \quad (4\text{-}95)$$

$$\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_3} = -b_1 \cos x_1\,. \quad (4\text{-}96)$$

U radnoj točki $\mathbf{x}_*$ dobivene parcijalne derivacije glase:

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_1}\right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = b_1 \left(x_{3*} \sin x_{1*} + \alpha \cos x_{1*}\right) - b_2 \sin\left(2x_{1*}\right) - M_*\,, \quad (4\text{-}97)$$

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_2}\right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = b_0 x_{2*}\,, \quad (4\text{-}98)$$

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_3}\right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = -b_1 \cos x_{1*}. \quad (4\text{-}99)$$

Izraz (4-94) moguće je izjednačiti s nulom samo uvjetovanjem odabira parametra α. Prema tome bi α bio strukturni parametar nepromjenjiv u regulacijskom krugu uzbude sinkronog generatora.

Izraz (4-98) je uvijek jednak nuli, jer u stacionarnom stanju ne postoji promjena kutne brzine rotora, već je ona jednaka sinkronoj kutnoj brzini generatora. Izraz (4-99) bio bi jednak nuli jedino za kut opterećenja generatora δ=90°, što ne daje prihvatljivu regulacijsku

karakteristiku. Da bi se pomoću dobivenog regulatora moglo postići stacionarno stanje jednako željenoj radnoj točki, potrebno je proširiti izraz (4-99):

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_3}\right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = -b_1 \cos x_{1^*} + b_1 \cos x_{1^*}. \tag{4-100}$$

Takvo proširenje utječe na hamiltonijan zatvorenog regulacijskog kruga te se on proširuje:

$$\mathrm{H}_d = \frac{1}{2} b_0 x_2^2 + \frac{1}{2} b_2 \cos(2x_1) - M x_1 - b_1 (x_3 \cos x_1 - \alpha \sin x_1) + b_1 x_3 \cos x_{1^*}. \tag{4-101}$$

Promjena strukture hamiltonijana zatvorenog regulacijskog kruga povlači promjenu strukture hamiltonijana regulatora:

$$\mathrm{H}_c = \alpha b_1 \sin x_1 + b_1 x_3 \cos x_{1^*} - \frac{b_1 b_4}{2 b_3} x_3^2. \tag{4-102}$$

Njegove parcijalne derivacije se, dakle, također mijenjaju. Očito je da će se promijeniti (4-91):

$$\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial x_3} = -\frac{b_1 b_4}{b_3} x_3 + b_1 \cos x_{1^*}. \tag{4-103}$$

Da bi izraz (4-87) ostao valjan, potrebno uvesti dodatni član i u (4-89):

$$\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial x_1} = \alpha b_1 (\cos x_1 - \cos x_{1^*}). \tag{4-104}$$

Promjena parcijalne derivacije (4-103) dovodi do promjene izraza upravljačkog algoritma (4-88) te on sada glasi:

$$u = b_4 x_3 + \alpha b_0 x_2 + (k b_1 - b_3) \cos x_1 - k b_1 \cos x_{1^*}. \tag{4-105}$$

Moguće je primijetiti da će jednadžba (4-104) dalje utjecati na hamiltonijan regulatora:

$$\mathrm{H}_c = \alpha b_1 (\sin x_1 - x_1 \cos x_{1^*}) + b_1 x_3 \cos x_{1^*} - \frac{b_1 b_4}{2 b_3} x_3^2. \tag{4-106}$$

što utječe na Hamiltonijan zatvorenog regulacijskog sustava:

$$\mathrm{H}_d = \frac{1}{2} b_0 x_2^2 + \frac{1}{2} b_2 \cos(2x_1) - M x_1 - b_1 (x_3 \cos x_1 - \alpha \sin x_1) + b_1 x_3 \cos x_{1^*} -$$

$$- \alpha b_1 x_1 \cos x_{1^*}. \tag{4-107}$$

Izraz (4-97) se također mijenja:

$$\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_1} = b_1\left(x_3 \sin x_1 + \alpha \cos x_1\right) - b_2 \sin\left(2x_1\right) - M - \alpha b_1 \cos x_{1^*}. \tag{4-108}$$

Uvrsti li se u (4-108) drugi redak izraza (3-112) dobiva se sljedeće:

$$\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_1} = \alpha b_1\left(\cos x_1 - \cos x_{1^*}\right) - \dot{x}_2, \tag{4-109}$$

Odnosno, u ravnotežnoj točki:

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_1}\right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = \alpha b_1\left(\cos x_{1^*} - \cos x_{1^*}\right) - \dot{x}_{2^*} = 0. \tag{4-110}$$

Važno je primijetiti da se sada gube uvjeti zadavanja parametra α i on postaje neovisan parametar. Time je dokazano da je sinteza IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja valjana i zadovoljen je nužan uvjet stabilizacije sustava u željenoj radnoj točki (4-73).

Dalje bi bilo potrebno ispitati dovoljan uvjet stabilizacije sustava u željenoj radnoj točki (4-74). Taj uvjet je moguće ostvariti samo ako upravljački signal u stacionarnom stanju iščezava. Ukoliko upravljački signal postoji i u stacionarnom stanju, to znači da se sustav nalazi u forsiranoj ravnotežnoj točki te hamiltonijan sustava u toj točki ne mora imati svoj minimum. Iz izraza (4-105) moguće je odrediti iznos upravljačkog signala u stacionarnom stanju:

$$u_* = b_4 x_{3^*} + \alpha b_0 x_{2^*} + \left(k b_1 - b_3\right)\cos x_{1^*} - k b_{1^*} \cos x_{1^*} = b_4 x_{3^*} - b_3 \cos x_{1^*}. \tag{4-111}$$

Upravljački signal dobivenog stabilizatora elektromehaničkih njihanja u stacionarnom stanju različit je od nule, što znači da je sustav forsiran. Ova činjenica čini analizu stabilnosti sustava s implementiranim regulacijskim algoritmom kompleksnijom te će ona stoga biti detaljno obrađena u podpoglavlju 5.1. Međutim, otvara se mogućnost dodavanja nove funkcije stabilizatoru elektomehaničkih njihanja, a to je regulacija izlaznog napona generatora, što će biti objašnjeno u sljedećem podpoglavlju.

4.3.1. Dodavanje djelovanja povratne veze u regulacijsku strukturu

Problem implementacije povratne veze u upravljački zakon dobiven IDA metodom upravljanja do sada nije riješen [29]. S druge strane, nedostatak upravljanja zasnovanog na energetskim funkcijama je činjenica da ravnotežno stanje sustava mora biti poznato, tj. odgovarati minimumu zadane energetske funkcije. Zbog toga energetska funkcija ovisi i o ravnotežnom stanju. Ravnotežno stanje se estimira na temelju modela sustava koji često ne obuhvaća cijelu dinamiku stvarnog sustava. Osim toga, pojedini parametri se s promjenom radne točke mijenjaju, što se također ne uzima u obzir.

Nadalje, bez povratne veze, tj. signala regulacijske pogreške, vrlo je teško postići slijeđenje referentne veličine, u ovom slučaju reference napona generatora, koji nije jedna od varijabli stanja PCH sustava. Ovi problemi mogu se riješiti uvođenjem signala regulacijske pogreške:

$$e = u_{gref} - u_g \,, \tag{4-112}$$

gdje je u_{gref} referentni napon generatora, a u_{g} napon na stezaljkama generatora, što je dokazano u nastavku.

Pretpostavka: dobiveni upravljački zakon ima funkciju stabilizacije napona generatora na referentnoj vrijednosti, što povlači da regulacijska pogreška u dobivenom stacionarnom stanju treba težiti nuli.

Dokaz: Kako bi dokazali da dobiveni upravljački zakon konkretno djeluje i na stabilizaciju napona generatora, potrebno je izvesti ovisnost napona generatora o varijablama stanja generatora, jer se regulator dizajnira tako da one u stacionarnom stanju dosežu željenu vrijednost.

Iz izraza (3-78), (3-79), (3-100), (3-101) te uz izvođenje izraza za struju uzbude:

$$i_{fd} = \frac{e_q^{'}}{l_{ad}} + \frac{l_{ad}}{l_{fd}} i_d \,, \tag{4-113}$$

moguće iz modela generatora već predočenog u točkama (3.4)-(3.8) odrediti komponente napona armature:

$$u_d = U_{m0}\left(1 - \frac{X_e}{X_e + X_q}\right)\sin\delta - \frac{R_e U_{m0}}{X_d^{'} + X_e}\cos\delta + \frac{R_e}{X_d^{'} + X_e} e_q^{'}, \tag{4-114}$$

$$u_q = \frac{R_e U_{m0}}{X_e + X_q}\sin\delta + U_{m0}\left(1 - \frac{X_e}{X_e + X_d^{'}}\right)\cos\delta + \frac{X_e}{X_e + X_d^{'}}e_q^{'}. \tag{4-115}$$

Dakle, napon generatora je u potpunosti određen stanjima generatora:

$$u_d = U_{m0}\frac{X_q}{X_e + X_q}\sin\delta - \frac{R_e U_{m0}}{X_d^{'} + X_e}\cos\delta + \frac{R_e}{X_d^{'} + X_e}e_q^{'} = c_1 \sin x_1 - c_2 \cos x_1 + c_3 x_3, \tag{4-116}$$

$$u_q = \frac{R_e U_{m0}}{X_e + X_q}\sin\delta + U_{m0}\frac{X_d^{'}}{X_e + X_d^{'}}\cos\delta + \frac{X_e}{X_e + X_d^{'}}e_q^{'} = c_4 \sin x_1 + c_5 \cos x_1 + c_6 x_3. \tag{4-117}$$

Vidljivo je da su konstante $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ određene konstrukcijskim parametrima generatora i nadomjesnom impedancijom mreže pozitivni realni brojevi. Napon generatora je jednak:

$$u_g = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} =$$

$$= \sqrt{\left(c_1 \sin x_1 - c_2 \cos x_1 + c_3 x_3\right)^2 + \left(c_4 \sin x_1 + c_5 \cos x_1 - c_6 x_3\right)^2}, \tag{4-118}$$

U stacionarnom stanju reguliranog sustava vrijedi:

$$u_g = \sqrt{\left(c_1 \sin x_{1*} - c_2 \cos x_{1*} - c_3 x_{3*}\right)^2 + \left(c_4 \sin x_{1*} + c_5 \cos x_{1*} - c_6 x_{3*}\right)^2} =$$

$$= u_{gref}, \tag{4-119}$$

i regulacijska pogreška je tad jednaka nuli:

$$e_* = 0. \tag{4-120}$$

IDA stabilizator elektromehaničkih njihanja dakle djeluje povoljno i na stabilizaciju napona generatora na željenoj vrijednosti. Međutim, stabilizacija napona u željenoj radnoj točki ovisi o tome koliko su točno proračunata stanja generatora u željenoj točki te nadomjesna impedancija mreže. U slučaju velikih poremećaja u elektroenergetskom sustavu dolazi do promjena u topologiji mreže, što mijenja iznos nadomjesne impedancije X_e. Kako bi se osigurala robusnost regulacije napona generatora s obzirom na promjenu parametra, upravljački zakon određen izrazom (4-105) valja proširiti članom koji sadrži signal regulacijske pogreške. Uz signal regulacijske pogreške bit će dodano pojačanje β (analogno linearnom P regulatoru napona po regulacijskom odstupanju, tj. pogrešci):

$$u = b_4 x_3 + \alpha b_0 x_2 + \left(k b_1 - b_3\right)\cos x_1 - k b_1 \cos x_{1*} + \beta e. \tag{4-121}$$

S obzirom da se djelovanje povratne veze pribraja dobivenom upravljačkom zakonu, ostaje i dalje vrijediti pasivnost modeliranog sustava, jer je sustav i dalje PCH oblika, sada analogan onom dobivenom u izrazu (4-63), gdje postoji i vanjski ulaz u sustav $\mathbf{u_r}$.

Pretpostavka. Uvođenje člana sa signalom regulacijske pogreške u upravljački zakon IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja u skladu je s metodom upravljanja zasnovanog na strukturi i prigušenju.

Dokaz. Promjena upravljačkog zakona djeluje na polaznu jednadžbu sinteze regulatora (4-87) tako da se mijenjaju parcijalne derivacije hamiltonijana regulatora (4-103) i (4-104):

$$\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial x_1} = \alpha b_1(\cos x_1 - \cos x_{1*}) + \alpha \frac{\beta}{k} e\,, \tag{4-122}$$

$$\frac{\partial \mathrm{H}_c}{\partial x_3} = -\frac{b_1 b_4}{b_3} x_3 + b_1 \cos x_{1*} - \frac{\beta}{k} e\,. \tag{4-123}$$

Pri tome se smatra da je signal regulacijske pogreške mjerena veličina te se njegova ovisnost o varijablama stanja zanemaruje. Hamiltonijan regulatora sada poprima sljedeći oblik:

$$\mathrm{H}_c = \alpha b_1(\sin x_1 - x_1 \cos x_{1*}) + b_1 x_3 \cos x_{1*} - \frac{b_1 b_4}{2 b_3} x_3^2 + \frac{\beta}{k} e(\alpha x_1 - x_3)\,. \tag{4-124}$$

Novi član u hamiltonijanu regulatora pojavljuje se i u hamiltonijanu zatvorenog regulacijskog kruga:

$$\mathrm{H}_d = \frac{1}{2} b_0 x_2^2 + \frac{1}{2} b_2 \cos(2x_1) - M x_1 - b_1\left(x_3 \cos x_1 - \alpha \sin x_1\right) + b_1 x_3 \cos x_{1*} -$$

$$-\alpha b_1 x_1 \cos x_{1*} + \frac{\beta}{k} e(\alpha x_1 - x_3). \tag{4-125}$$

Parametar k prema (4-86) mora biti pozitivan realni broj, što osigurava da hamiltonijani regulatora i zatvorenog kruga ne mogu težiti u beskonačnost. Derivacije hamiltonijana zatvorenog regulacijskog kruga u željenoj radnoj točki su sada:

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_1}\right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = \alpha b_1\left(\cos x_{1*} - \cos x_{1*}\right) - \dot{x}_{2*} + \alpha \frac{\beta}{k} e_* = 0\,, \tag{4-126}$$

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_2}\right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = b_0 x_{2*} = 0\,, \tag{4-127}$$

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_d}{\partial x_3}\right|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}^*} = -(b_1 \cos x_{1^*} - b_1 \cos x_{1^*}) - \frac{\beta}{k} e_* = 0\,. \tag{4-128}$$

Time je zadovoljen uvjet (4-73) i dokazano da regulacijska pogreška djeluje na dinamiku sustava s regulatorom zasnovanim na strukturi i prigušenju, ali ne mijenja stacionarno stanje $\mathbf{x}_*$.

5. Stabilnost sustava s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja

Pojam stabilnosti u ovom radu potrebno je promatrati s dva gledišta, teorije regulacije i teorije elektroenergetskih sustava. Prvo će biti dana analiza stabilnosti sustava prema teoriji regulacije, jer nema smisla govoriti o kvaliteti prijelaznog procesa, a niti o stacionarnom ponašanju sustava, ako sustav nije stabilan [41]. Ako je sustav stabilan, onda se mogu postaviti dodatni zahtjevi na kvalitetu prijelaznog i stacionarnog režima rada, što je predmet teorije stabilnosti elektroenergetskog sustava. Dakle, prvo je potrebno odrediti kako IDA stabilizator elektromehaničkih njihanja, čija je sinteza napravljena u prošlom poglavlju, djeluje na stabilnost modeliranog sustava sinkronog generatora s istaknutim polovima spojenog na električnu mrežu. Analiza stabilnosti nelinearnog regulacijskog sustava može biti provedena po Lyapunovu [37, 41], kako je to prikazano u podpoglavlju 5.1 ili se nelinearni sustav može linearizirati i zatim analizirati njegova stabilnost što je učinjeno u podpoglavlju 5.2. Kako je to zaključeno u [37], za linearni sustav stabilnost je svojstvo sustava, a za nelinearni sustav stabilnost je svojstvo konkretnog ravnotežnog stanja. Dakle, u oba slučaja, po Lyapunovu ili linearizacijom sustava, stabilnost se analizira u pojedinim radnim točkama.

Nakon što se dokaže stabilnost sustava s gledišta teorije regulacije, stabilnost generatora s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja unutar elektroenergetskog sustava bit će ispitana iz simulacijskih rezultata u šestom poglavlju. Pojam statičke i dinamičke stabilnosti elektroenergetskog sustava se u [39] definira kao svojstvo elektroenergetskog sustava koje mu omogućuje zadržavanje u ravnotežnoj radnoj točki u normalnim radnim uvjetima te povratak u prihvatljivo ravnotežno stanje nakon što je sustav bio izvrgnut poremećaju. U elektroenergetskom sustavu također se mora osigurati što postojanija razina napona neovisna o trenutnoj potrošnji.

Dakle, moguće je govoriti o statičkoj i prijelaznoj stabilnosti. Dok statička stabilnost analizira ponašanje sustava u stacionarnom stanju te pri malim i sporim poremećajima, prijelazna stabilnost elektroenergetskog sustava analizira ponašanje sustava pri velikim poremećajima. Veliki poremećaji dovode do velikih promjena relativnih kutova rotora generatora, a ponekad i do velikih promjena njihovih međusobnih brzina te nelinearna priroda sustava dolazi do izražaja. Prijelazna stabilnost ovisi o početnoj radnoj točki te amplitudi i trajanju poremećaja. Često pri velikim poremećajima dolazi do promjena u sustavu te se

konačno ravnotežno stanje razlikuje od početnog. U bivšem Sovjetskom Savezu uveden je pojam rezultirajuće stabilnosti koja opisuje sposobnost sustava (ili generatora) da nastavi sinkroni rad nakon određenog trajanja asinkronog režima (sposobnost resinkronizacije). U [38] također se posebno razmatra stabilnost reguliranog i nereguliranog sustava.

Uzimajući u obzir gornja razmatranja, u [38] je dana podjela stabilnosti elektroenergetskog sustava prema CIGRE izvještaju br.325 prikazana u tablici 5.1.

Tablica 5.1. Podjela stabilnosti elektroenergetskog sustava [38]

Kutna stabilnost	Kutna stabilnost s obzirom na male poremećaje
	Prijelazna kutna stabilnost
Frekvencijska stabilnost	
Naponska stabilnost	Naponska stabilnost s obzirom na male poremećaje
	Naponska stabilnost s obzirom na velike poremećaje

5.1. Stabilnost forsiranih PCH sustava s disipacijom

Važan korak u analizi stabilnosti forsiranih PCH sustava objavljen je u [67], gdje je objašnjen način proširivanja hamiltonijana zatvorenog regulacijskog sustava u svrhu generiranja Lyapunovljevih funkcija za forsirano ravnotežno stanje.

5.1.1. Određivanje proširenog hamiltonijana forsiranog PCH sustava s disipacijom

Neka se forsirano ravnotežno stanje označeno s $\bar{\mathbf{x}}$ postiže kada je upravljački signal $\bar{\mathbf{u}}$ konstantan i različit od nule. Prema definiciji PCH sustava (4-53) tada vrijedi:

$$\left[\mathbf{J}(\bar{\mathbf{x}})-\mathbf{R}(\bar{\mathbf{x}})\right]\frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}}(\bar{\mathbf{x}})+\mathbf{g}(\bar{\mathbf{x}})\bar{\mathbf{u}}=0\,. \tag{5-1}$$

U općem slučaju ravnotežno stanje $\bar{\mathbf{x}}$ ne mora odgovarati minumumu hamiltonijana. Izraz (4-55) koji opisuje tok energije sustava poprima sljedeći oblik:

$$\dot{\mathrm{H}}=-\frac{\partial \mathrm{H}^{T}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{R}\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}+\frac{\partial \mathrm{H}^{T}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}\mathbf{g}(\mathbf{x})\bar{\mathbf{u}}\,. \tag{5-2}$$

Iz izraza (5-2) je vidljivo da vremenska derivacija hamiltonijana može biti i pozitivna vrijednost te se ne može smatrati da je hamiltonijan Lyapunovljeva funkcija. Također,

moguće je zaključiti da funkcija kandidat za Ljapunovljevu funkciju treba biti sljedećeg oblika:

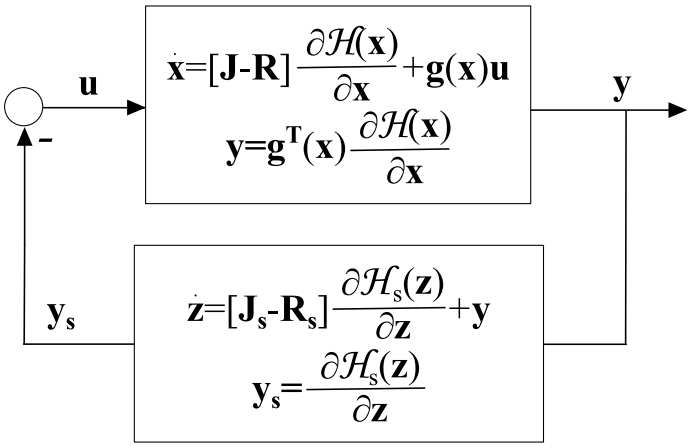
$$\mathrm{H}(\mathbf{x}(t)) - \bar{\mathbf{u}}^{\mathrm{T}} \int_0^t \mathbf{y}(\tau) d\tau \,. \tag{5-3}$$

Izraz (5-3) predstavlja kaskadu PCH sustava sljedećeg oblika:

$$\dot{\mathbf{x}} = \left[\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\bar{\mathbf{x}})\right] \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}(\mathbf{x})\bar{\mathbf{u}}\,, \tag{5-4}$$

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{g}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x}) \frac{\partial \mathrm{H}}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x})\,, \tag{5-5}$$

koja je prikazana na slici 5.1.



Slika 5.1. Proširena struktura forsiranog PCH sustava

Kao što je prikazano u poglavlju 4, kaskada dva PCH sustava je također PCH sustav čiji je oblik dan u (4-63). Primjeni li se to svojstvo na sustav (5-4), (5-5) dobiva se:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{z}} \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \mathbf{J}(\mathbf{x}) & -\mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{g}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x}) & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\mathbf{x}) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \frac{\mathrm{H}_a(\mathbf{x},\mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}} \\ \frac{\mathrm{H}_a(\mathbf{x},\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \end{bmatrix}. \tag{5-6}$$

$\mathcal{H}_a(\mathbf{x},\mathbf{z}) = \mathcal{H}(\mathbf{x}) + \mathcal{H}_s(\mathbf{z})$ je pomoćna energetska funkcija, gdje je:

$$\mathrm{H}_s(\mathbf{z}) = -\bar{\mathbf{u}}^{\mathrm{T}}\mathbf{z}\,. \tag{5-7}$$

Uz pretpostavku da je matrica $\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})$ inverzibilna, izlučivanjem člana $\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}}$ iz izraza (5-1) uvodi se nova matrica se $\mathbf{K}(\mathbf{x})$:

$$\frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = -\left[\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]^{-1} \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} = \mathbf{K}(\mathbf{x})\mathbf{u}\,, \tag{5-8}$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = -\left[\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]\mathbf{K}(\mathbf{x})\,. \tag{5-9}$$

Uvrštavanjem izraza (5-9) u (5-6) dobiva se:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{z}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x}) & \left[\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]\mathbf{K}(\mathbf{x}) \\ \left(\left[\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(\mathbf{x})\right]\mathbf{K}(\mathbf{x})\right)^{\mathrm{T}} & \mathbf{J}_{\mathrm{s}} - \mathbf{R}_{\mathrm{s}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{\mathrm{H}_a(\mathbf{x},\mathbf{z})}{\partial \mathbf{x}} \\ \dfrac{\mathrm{H}_a(\mathbf{x},\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} \end{bmatrix}. \tag{5-10}$$

Strukturna matrica $\mathbf{J}_{\mathrm{s}}$ se odabire tako da bude antisimetrična, a disipacijska matrica $\mathbf{R}_{\mathbf{s}}$ tako da bude simetrična i pozitivno semidefinitna, čime se osigurava da je sustav (5-10) PCH sustav, a $\mathcal{H}_a$ Lyapunovljeva funkcija. Autori u [67] izabiru matrice $\mathbf{J}_{\mathrm{s}}$ i $\mathbf{R}_{\mathbf{s}}$ na sljedeći način:

$$\mathbf{J}_{\mathrm{s}} = \mathbf{K}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x})\mathbf{J}(\mathbf{x})\mathbf{K}(\mathbf{x})\,, \tag{5-11}$$

$$\mathbf{R}_{\mathrm{s}} = \mathbf{K}^{\mathrm{T}}(\mathbf{x})\mathbf{R}(\mathbf{x})\mathbf{K}(\mathbf{x})\,, \tag{5-12}$$

pri čemu su uvjeti za strukturnu i disipacijsku matricu PCH sustava očito ispunjeni. Nadalje, u [67] je dokazano da ako postoje glatke funkcije C_j takve da vrijedi:

$$K_{ij} = \frac{\partial C_j(\mathbf{x})}{\partial x_i},\ i \in n, j \in m\,, \tag{5-13}$$

gdje je n red polaznog PCH sustava, a m red ulaznog i izlaznog vektora, onda su funkcije $z_j - C_j(\mathbf{x})$ konstantne duž trajektorija proširenog PCH sustava (5-10):

$$z_j = C_j(\mathbf{x}) + c_j\,,\ j \in m\,, \tag{5-14}$$

Valja naglasiti da se dinamika varijabli stanja $\mathbf{x}$ ovim postupkom ne mijenja, već se ona ugrađuje u djelovanje proširenog PCH sustava. Ovime je dokazano da se stabilnost forsiranih PCH sustava može odrediti Lyapunovljevim postupkom ako se takav sustav proširi u novi PCH sustav čija energetska funkcija ima minimu-m u forsiranom ravnotežnom stanju $\bar{\mathbf{x}}$.

Slijedi postupak određivanja stabilnosti forsiranih PCH sustava prema [67]. Za sustav dan izrazom (5-1) treba odrediti matricu $\mathbf{K}(\mathbf{x})$ tako da vrijedi:

$$\frac{\partial K_{ij}}{\partial x_k} = \frac{\partial K_{ij}}{\partial x_i},\ i,k \in n, j \in m\,, \tag{5-15}$$

Tada postoje lokalno glatke funkcije $C_j(\mathbf{x})$ koje zadovoljavaju uvjet (5-13), a dinamika sustava se može prikazati na sljedeći način:

$$\dot{\mathbf{x}} = \left[\mathbf{J}(\mathbf{x}) - \mathbf{R}(x)\right] \frac{\partial \mathrm{H}_a}{\partial \mathbf{x}}(\mathbf{x}), \tag{5-16}$$

gdje energetska funkcija $\mathcal{H}_a$ oblika:

$$\mathrm{H}_a(\mathbf{x}) = \mathrm{H}(\mathbf{x}) - \sum_{j=1}^{m} \bar{u}_j (C_j(\mathbf{x}) + c_j) \tag{5-17}$$

ima ekstremum u forsiranom ravnotežnom stanju $\bar{\mathbf{x}}$. S obzirom da vrijedi:

$$\dot{\mathrm{H}}_a = -\frac{\partial \mathrm{H}^T(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{R}(\mathbf{x}) \frac{\partial \mathrm{H}(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \leq 0, \tag{5-18}$$

funkcija $\mathcal{H}_a$ ima minimum u $\bar{\mathbf{x}}$.

5.1.2. Određivanje stabilnosti sustava s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja

U podpoglavlju 5.1. dokazano je da se stabilnost forsiranih PCH sustava može odrediti Lyapunovljevim postupkom ako se takav sustav proširi u novi PCH sustav čija energetska funkcija ima minimum u forsiranom ravnotežnom stanju $\bar{\mathbf{x}}$. Opisani postupak sada se primjenjuje na sustav s implementiranim IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja izvedenim u prošlom poglavlju.

Iz izraza (4-75) moguće je odrediti ulaznu matricu sustava i izlazni vektor sustava prema definiciji (4-54):

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \tag{5-19}$$

$$y = \mathbf{g}^{\mathrm{T}} \frac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial x_3} = -(b_1 \cos x_1 - b_1 \cos x_{1*}) - \frac{\beta}{k} e, \tag{5-20}$$

Izrazom (5-20) osigurana je strukturna pasivnost sustava. Forsirani upravljački signal je prema (4-111) jednak:

$$\bar{\mathbf{u}} = b_4 \bar{x}_3 - b_3 \cos \bar{x}_1. \tag{5-21}$$

Sada se uvodi pomoćna varijabla $z = y$ te se konstruira vektor $\mathbf{K}(\mathbf{x})$. Iz (5-8), (4-82) i (4-83) slijedi:

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}) = -\left[\mathbf{J_d}(\mathbf{x}) - \mathbf{R_d}(\mathbf{x})\right]^{-1}\mathbf{g}(\mathbf{x}) = -\begin{bmatrix} -\frac{\alpha^2}{k} & -1 & \frac{\alpha}{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ \frac{\alpha}{k} & 0 & -\frac{1}{k} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{k} \\ 0 \\ -\frac{1}{k} \end{bmatrix}. \tag{5-22}$$

Prema (5-13) moguće je konstruirati funkciju $C(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{K}(\mathbf{x}) = \frac{\partial C(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} \Rightarrow \frac{\partial C(\mathbf{x})}{\partial x_1} = \frac{\alpha}{k},\ \frac{\partial C(\mathbf{x})}{\partial x_2} = 0,\ \frac{\partial C(\mathbf{x})}{\partial x_3} = -\frac{1}{k}\ , \tag{5-23}$$

$$C(\mathbf{x}) = \frac{\alpha}{k}x_1 - \frac{1}{k}x_3\,. \tag{5-24}$$

Vidljivo je da je $C(\mathbf{x})$ glatka funkcija. Ta činjenica se može provjeriti i iz uvjeta (5-15):

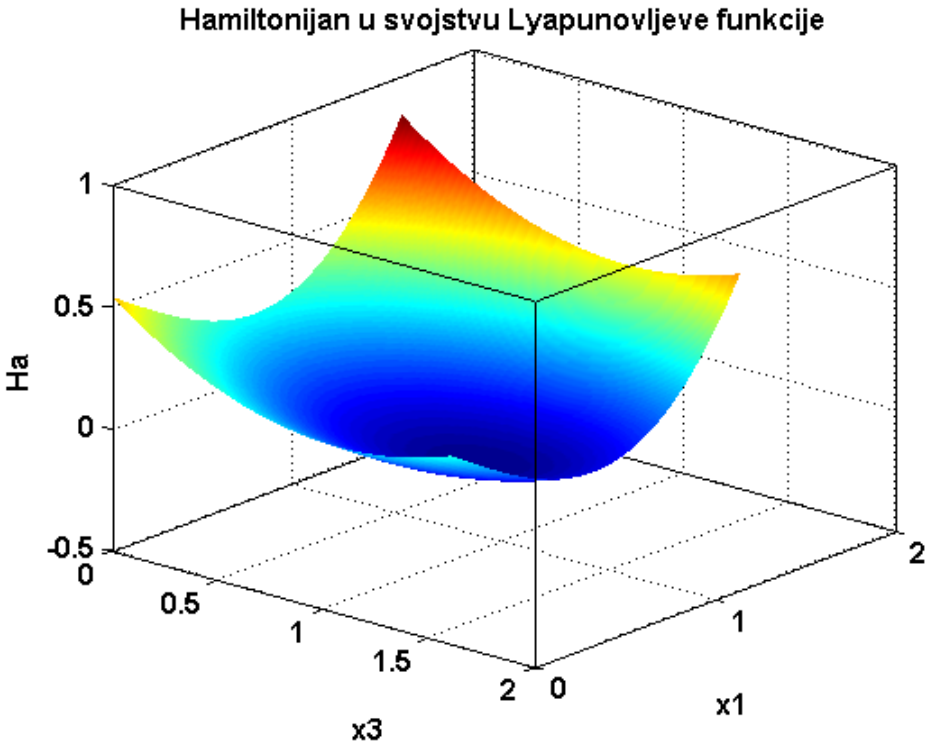
$$\frac{\partial K_2}{\partial x_1} = 0 = \frac{\partial K_2}{\partial x_1},\ \frac{\partial K_3}{\partial x_1} = 0 = \frac{\partial K_1}{\partial x_3},\ \frac{\partial K_3}{\partial x_2} = 0 = \frac{\partial K_2}{\partial x_3}\,. \tag{5-25}$$

Iz (5-17) sad se konstruira prošireni hamiltonijan koji odgovara Lyapunovljevoj funkciji sustava:

$$\mathrm{H}_a(\mathbf{x}) = \mathrm{H}_d(\mathbf{x}) - \sum_{j=1}^{3}\overline{u}_j(C_j(\mathbf{x}) + c_j) = \frac{1}{2}b_0x_2^2 + \frac{1}{2}b_2\cos(2x_1) - Mx_1 -$$

$$-b_1\left(x_3\cos x_1 - \alpha\sin x_1\right) + b_1x_3\cos x_{1*} - \alpha b_1x_1\cos x_{1*} + \frac{\beta}{k}e(\alpha x_1 - x_3) +$$

$$b_3\cos\overline{x}_1\left(\frac{\alpha}{k}x_1 + c_1\right) + b_4\overline{x}_3\left(\frac{1}{k}x_3 - c_3\right). \tag{5-26}$$



Slika 5.2. Prošireni hamiltonijan u svojstvu Lyapunovljeve funkcije

Ovime je dokazano da je sustav sinkronog generatora s istaknutim polovima spojen na električnu mrežu reguliran IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja za odgovarajuće parametre α i k asimptotski stabilan. Na slici 5.2. dan je grafički prikaz ovisnosti proširenog hamiltonijana $\mathcal{H}_a$ o varijablama stanja x_1 i x_3. Vidljivo je da hamiltonijan proširenog sustava ima svoj minimum koji odgovara forsiranoj ravnotežnoj točki $\bar{\mathbf{x}} = [\bar{x}_1\ 0\ \bar{x}_3]$.

Parcijalne derivacije proširene Hamiltonove funkcije glase:

$$\frac{\partial \mathrm{H}_a}{\partial x_1} = -b_2 \sin(2x_1) - M + b_1 x_3 \sin x_1 + \alpha b_1 (\cos x_1 - \cos x_{1*}) + \frac{\beta}{k}\alpha e +$$

$$+\frac{\alpha}{k} b_3 \cos x_1 - \frac{\alpha}{k} b_3 x_1 \sin x_1 - c_1 b_3 \sin x_1 , \tag{5-27}$$

$$\frac{\partial \mathrm{H}_a}{\partial x_2} = b_0 x_2 , \tag{5-28}$$

$$\frac{\partial \mathrm{H}_a}{\partial x_3} = -b_1 \left(\cos x_1 - \cos x_{1*}\right) - \frac{\beta}{k} e + \frac{2b_4}{k} x_3 - c_3 b_4 . \tag{5-29}$$

U stacionarnom stanju jednake su nuli, ako su konstante c_1 i c_3 sljedećeg oblika:

$$c_1 = \frac{\alpha}{k}\left(\operatorname{ctg} x_{1*} - x_{1*}\right), \tag{5-30}$$

$$c_3 = \frac{2x_{3*}}{k}\ . \tag{5-31}$$

Sada je još potrebno ispitati dovoljan uvjet stabilnosti regulatora u stacionarnoj radnoj točki (4-74), odnosno osigurati da je hesijan Hamiltonijana zatvorenog regulacijskog kruga u željenoj radnoj točki pozitivno definitan. Hesijan hamiltonijana proširenog regulacijskog kruga je sljedećeg oblika:

$$\frac{\partial \mathrm{H}_a^2}{\partial \mathbf{x}^2} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1}\left(\partial_{x_1}\mathrm{H}_a\right) & \frac{\partial}{\partial x_2}\left(\partial_{x_1}\mathrm{H}_a\right) & \frac{\partial}{\partial x_3}\left(\partial_{x_1}\mathrm{H}_a\right) \\ \frac{\partial}{\partial x_1}\left(\partial_{x_2}\mathrm{H}_a\right) & \frac{\partial}{\partial x_2}\left(\partial_{x_2}\mathrm{H}_a\right) & \frac{\partial}{\partial x_3}\left(\partial_{x_2}\mathrm{H}_a\right) \\ \frac{\partial}{\partial x_1}\left(\partial_{x_3}\mathrm{H}_a\right) & \frac{\partial}{\partial x_2}\left(\partial_{x_3}\mathrm{H}_a\right) & \frac{\partial}{\partial x_3}\left(\partial_{x_3}\mathrm{H}_a\right) \end{bmatrix}. \tag{5-32}$$

Za zatvoreni regulacijski krug s dobivenim IDA regulatorom Hessova matrica glasi:

$$\left.\frac{\partial \mathrm{H}_a^2}{\partial \mathbf{x}^2}\right|_{\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_*} = \begin{bmatrix} \partial_{11}\mathrm{H}_a & 0 & b_1 \sin x_{1*} \\ 0 & b_0 & 0 \\ b_1 \sin x_{1*} & 0 & 2\frac{b_4}{k} \end{bmatrix}, \tag{5-33}$$

gdje je prvi element matrice $\partial_{11}\mathcal{H}_a$ jednak:

$$\partial_{11}\mathrm{H}_a = -2b_2 \cos\left(2x_{1*}\right) + b_1 x_{3*} \cos x_{1*} - \alpha b_1 \sin x_{1*} - \frac{2\alpha}{k} b_3 \sin x_{1*} -$$

$$-\frac{\alpha}{k} b_3 \cos x_{1*} - c_1 b_3 \cos x_{1*} \tag{5-34}$$

Dobiveni hesijan je pozitivno definitan uz uvjet na parametar α koji se dobiva uvrštavanjem izraza (5-30) u (5-34):

$$\alpha < k \sin x_1 \frac{b_1 x_{3*} \cos x_{1*} - 2b_2 \cos(2x_{1*})}{b_3 + (kb_1 + b_3)\sin^2 x_{1*}}. \tag{5-35}$$

U uvjet (4-86) sada je pogodno uvesti pomoćni parametar k' takav da vrijedi $k = k'\frac{b_3}{b_1}$. Sada uvjet (4-86) poprima sljedeći oblik:

$$k' \geq 1. \tag{5-38}$$

Prema tome se izraz (5-35) može zapisati u sljedećem obliku:

$$\alpha < \frac{k'}{b_1}\sin x_1 \frac{b_1 x_{3*}\cos x_{1*} - 2b_2\cos(2x_{1*})}{1+(k'+1)\sin^2 x_{1*}}. \tag{5-39}$$

Dobivena nejednakost koja predstavlja uvjet na parametar α dalje se može raspisati uz poznate parametre generatora te će to biti učinjeno u šestom poglavlju.

5.2. Stabilnost lineariziranog sustava s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja

U ovom se dijelu disertacije stabilnost sustava s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja analizira klasično, tako da se sustav prvo linearizira, a zatim se ispituje njegova stabilnost u pojedinoj radnoj točki. Ocjena stabilnosti se daje na temelju svojstvenih vrijednosti jakobijana sustava i vrijedi samo u okolini radne točke, što znači da se na ovaj način ne može ispitati dinamička, već samo statička stabilnost sustava. Polazi se od zapisa linearnog sustava u prostoru stanja [37]:

$$f_c(\mathbf{x},\mathbf{u}) = \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}\ ,\ h_c(\mathbf{x},\mathbf{u}) = \mathbf{y} = \mathbf{C}_c\mathbf{x} + \mathbf{D}_c\mathbf{u}, \tag{5-40}$$

gdje su matrica sustava **A**, matrica upravljanja **B**, matrica izlaza $\mathbf{C}_c$ i matrica direktnih veza ulaz-izlaz $\mathbf{D}_c$ jakobijani funkcija f_c, odnosno h_c. Kontinuirani linearni sustav je asimptotski stabilan ako sve svojstvene vrijednosti $\lambda_1, \lambda_1, \ldots, \lambda_n$ matrice sustava **A** leže strogo u lijevoj poluravnini kompleksne *s* ravnine [37]. Analogno, se na temelju svojstvenih vrijednosti matrice **A** određuje stabilnost lineariziranog sustava u okolišu radne točke $(\mathbf{x}_*, \mathbf{u}_*)$:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{u},\ \Delta\mathbf{y} = \mathbf{C}_c\Delta\mathbf{x} + \mathbf{D}_c\Delta\mathbf{u}, \tag{5-41}$$

gdje su $\Delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_*$, $\Delta\mathbf{u} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_*$, $\Delta\mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_*$ promjene varijabli sustava u okolišu radne točke.

5.2.1. Stabilnost lineariziranog nereguliranog sustava

Neregulirani sustav predstavlja sinkroni generator s istaknutim polovima spojen na električnu mrežu uz konstantnu uzbudu. Linearizirani sustav jednadžbi modela sinkronog generatora sedmog reda s varijablama stanja $x = \begin{bmatrix}\Delta\psi_d & \Delta\psi_q & \Delta\psi_{fd} & \Delta\psi_D & \Delta\psi_Q & \Delta\omega & \Delta\delta\end{bmatrix}$ dan je u [37]. Matrica sustava glasi:

$$\mathbf{A} = \omega_s \begin{bmatrix} (R_s+R_e)y_{11} & 1 & (R_s+R_e)y_{13} & (R_s+R_e)y_{14} & 0 & \psi_{q*} & U_{m0}\cos\delta \\ -1 & (R_s+R_e)y_{22} & 0 & 0 & (R_s+R_e)y_{25} & -\psi_{d*} & -U_{m0}\sin\delta \\ -R_{fd}y_{31} & 0 & -R_{fd}y_{33} & -R_{fd}y_{34} & 0 & 0 & 0 \\ -R_D y_{41} & 0 & -R_D y_{43} & -R_D y_{44} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -R_Q y_{52} & 0 & 0 & -R_Q y_{55} & 0 & 0 \\ -\frac{(y_{22}-y_{11})\psi_{q*}+y_{25}\psi_{1q*}}{2\omega_s H} & -\frac{(y_{22}-y_{11})\psi_{d0}-y_{13}\psi_{fd*}-y_{14}\psi_{1d*}}{2\omega_s H} & \frac{y_{13}\psi_{q*}}{2\omega_s H} & \frac{y_{14}\psi_{q*}}{2\omega_s H} & -\frac{y_{25}\psi_{d*}}{2\omega_s H} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5\text{-}42)$$

gdje su y_{ij}, gdje su $i,j = 1,\ldots,5$ elementi invertirane matrice induktiviteta [37]:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} -\mathbf{L_{dq}} & \mathbf{L_{ad}} \\ -\mathbf{L_{ad}^T} & \mathbf{L_r} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (5\text{-}43)$$

Matrica upravljanja **B** matrica upravljanja je prema [37] jednaka:

$$\mathbf{B}^T = \omega_s \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dfrac{R_{fd}}{l_{ad}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5\text{-}44)$$

Svojstvene vrijednosti matrice **A** moguće je odrediti analitički, rješavanjem determinante

$$\left|s\mathbf{I} - \mathbf{A}\right| = 0\ , \quad (5\text{-}45)$$

ili uporabom ugrađenih funkcija nekih od matematičkih programskih paketa.

5.2.2. Stabilnost reguliranog sustava

Da bi se odredile svojstvene vrijednosti lineariziranog zatvorenog regulacijskog sustava, potrebno je odrediti njegovu matricu sustava. Polazi se od izraza za zatvoreni PCH sustav s implementiranim IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja, uvrštavanjem izraza parcijalnih derivacija hamiltonijana zatvorenog regulacijskog sustava koje se dobivaju iz (4-125):

$$\frac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial x_1} = -b_2 \sin(2x_1) - M + b_1 x_3 \sin x_1 - \alpha b_1 \cos x_1 - \alpha b_1 \cos x_{1*} + \alpha \frac{\beta}{k} e\,, \quad (5\text{-}46)$$

$$\frac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial x_2} = b_0 x_2 , \tag{5-47}$$

$$\frac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial x_3} = -b_1 \cos x_1 + b_1 \cos x_{1*} - \frac{\beta}{k} e , \tag{5-48}$$

u izraz (4-69):

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \left[\mathbf{J_d} - \mathbf{R_d}\right] \frac{\partial \mathrm{H}_d(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & -\alpha \\ 0 & \alpha & -k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -b_2 \sin\left(2x_1\right) - M + b_1 x_3 \sin x_1 - \alpha b_1 \cos x_1 - \alpha b_1 \cos x_{1*} + \alpha \dfrac{\beta}{k} e \\ b_0 x_2 \\ -b_1 \cos x_1 + b_1 \cos x_{1*} - \dfrac{\beta}{k} e \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} b_0 x_2 \\ b_2 \sin\left(2x_1\right) + M - b_1 x_3 \sin x_1 \\ \alpha b_0 x_2 + k b_1 \cos x_1 - k b_1 \cos x_{1*} + \beta e \end{bmatrix}. \tag{5-49}$$

Izraz (5-49) potrebno je linearizirati:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{x}_1 \\ \Delta\dot{x}_2 \\ \Delta\dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \Delta x_2 \\ 2b_2 \cos\left(2x_{1*}\right)\Delta x_1 - b_1 x_{3*} \cos x_{1*} \Delta x_1 - b_1 \sin x_{1*} \Delta x_3 \\ \alpha b_0 \Delta x_2 - k b_1 \sin x_{1*} \Delta x_1 + \beta \Delta e \end{bmatrix}. \tag{5-50}$$

Uzme li se u obzir dinamika pogreške izražena pomoću varijabli stanja pomoću izraza (4-112) i (4-118), dobiva se:

$$\Delta e = \Delta u_{gref} - \Delta u_g = -\Delta u_g =$$

$$= -\frac{u_{d*}\left(c_1 \cos x_{1*}\Delta x_1 + c_2 \sin x_1 \Delta x_1 + c_3 \Delta x_3\right) + u_{q*}\left(c_4 \cos x_{1*}\Delta x_1 - c_5 \sin x_{1*}\Delta x_1 - c_6 \Delta x_3\right)}{u_{g*}}, \tag{5-51}$$

polazni sustav je moguće zapisati u sljedećem obliku:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{x}_1 \\ \Delta\dot{x}_2 \\ \Delta\dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & b_0 & 0 \\ 2b_2 \cos(2x_{1*}) - b_1 x_{3*} \cos x_{1*} & 0 & -b_1 \sin x_{1*} \\ -k b_1 \sin x_{1*} - \beta \frac{u_{d*}(c_1 \cos x_{1*} + c_2 \sin x_{1*}) + u_{q*}(c_4 \cos x_{1*} - c_5 \sin x_{1*})}{u_{g*}} & \alpha b_0 & -\beta \frac{u_{d*} c_3 + u_{q*} c_6}{u_{g*}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \Delta x_3 \end{bmatrix}. \tag{5-52}$$

Izraz (5-52) predstavlja linearizirani zatvoreni regulacijski krug s modelom generatora trećeg reda. Dobivena matrica odgovara matrici sustava i iz njenih svojstvenih vrijednosti moguće je donositi zaključke o stabilnosti sustava u pojedinoj radnoj točki.

Moguće je odrediti i stabilnost sustava s modelom generatora sedmog reda. Polazi se od modela generatora spojenog na mrežu sedmog reda opisanog u prošlom podpoglavlju izrazima (5-42) i (5-44). S obzirom da su varijable stanja modela sustava trećeg reda i modela sustava sedmog reda drugačije zapisane, treba prilagoditi upravljački algoritam (4-105) uvažavajući jednakost (3-97):

$$u = b_4 e_q^{'} + \alpha b_0 \Delta\omega + \left(kb_1 - b_3\right)\cos\delta - kb_1 \cos\delta_* =$$

$$= b_4 \frac{l_{ad}}{l_{fd}} \psi_{fd} + \alpha b_0 \Delta\omega + \left(kb_1 - b_3\right)\cos\delta - kb_1 \cos\delta_* . \tag{5-53}$$

U okolini radne točke djelovanje upravljačkog algoritma se linearizira:

$$\Delta u = b_4 \frac{l_{ad}}{l_{fd}} \Delta\psi_{fd} + \alpha b_0 \Delta\omega - \left(kb_1 - b_3\right)\sin\delta_* \Delta\delta . \tag{5-54}$$

Uvrštavanjem u (5-42) dobiva se:

$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{R_{fd}}{l_{ad}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta e_{fd} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} +$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T'_{do}\omega_s \frac{R_{fd}}{l_{ad}} \left(b_4 \frac{l_{ad}}{l_{fd}} \Delta\psi_{fd} + \alpha b_0 \Delta\omega - (kb_1 - b_3)\sin\delta_* \Delta\delta\right) -$$

$$- \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} T'_{do}\omega_s \frac{R_{fd}}{l_{ad}} \beta \left(\frac{u_{d*}c_3 + u_{q*}c_6}{u_{g*}} \Delta\psi_{fd} + \frac{u_{d*}(c_1 \cos x_{1*} + \sin x_{1*}) + u_{q*}(c_4 \cos x_{1*} - c_5 \sin x_{1*})}{u_{g*}} \Delta\delta\right) =$$

$$= \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + \mathbf{A}_\mathbf{r}\Delta\mathbf{x} - \mathbf{A}_\mathbf{pv}\Delta\mathbf{x} = \mathbf{A}_\mathbf{z}\Delta\mathbf{x} . \tag{5-55}$$

Konačno, dobiva se jakobijan sustava $\mathbf{A_z}$ na temelju kojeg je moguće odrediti svojstvene vrijednosti zatvorenog regulacijskog kruga:

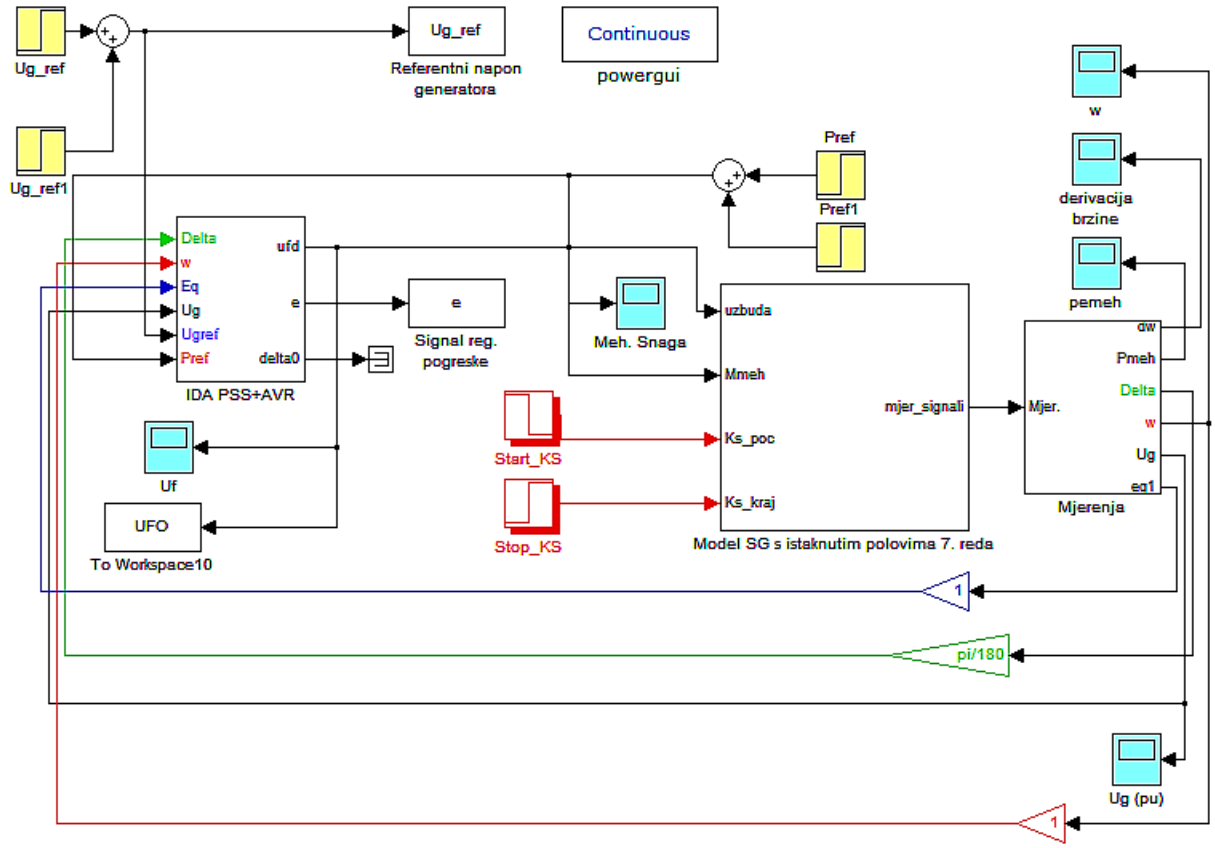
$$\Delta\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\Delta\mathbf{x} + T'_{do}\omega_s \frac{R_{fd}}{l_{ad}} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_4 \frac{l_{ad}}{l_{fd}} & 0 & 0 & \alpha b_0 & -(kb_1 - b_3)\sin\delta_* \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \Delta\mathbf{x} -$$

$$-T'_{do}\omega_s \frac{R_{fd}}{l_{ad}}\beta \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{u_{d*}c_3 + u_{q*}c_6}{u_{g*}} \frac{l_{ad}}{l_{fd}} & 0 & 0 & 0 & \frac{u_{d*}(c_1\cos x_{1*} + c_2\sin x_{1*}) + u_{q*}(c_4\cos x_{1*} - c_5\sin x_{1*})}{u_{g*}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta\mathbf{x} =$$

$$= \mathbf{A_z}\Delta\mathbf{x}. \qquad (5\text{-}56)$$

6. Ispitivanje kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja

Ispitivanje kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja učinjeno je u simulacijskom programu Matlab R2009a. Simulacija rada sinkronog generatora s istaknutim polovima spojenog na električnu mrežu s IDA stabilizatorom načinjena je u Matlabovom potprogramu Simulink v.7.3.(R2009a). Za rješavanje matematičkih jednadžbi u modelu odabrana je metoda „ode5“ (Dormand-Prince), a korak rješavanja, tj. period uzorkovanja je nepromjenjiv te ga je potrebno zadati. Odabrani period uzorkovanja iznosi 1 ms. Stabilizator elektromehaničkih njihanja implementiran je u uzbudni krug sinkronog generatora danog modelom sedmog reda izvedenom u [37], kao što je prikazano na slici 6.1.



Slika 6.1. Simulacijski model za ispitivanje kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja

Simulacijski model omogućuje ispitivanje kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja u slučaju promjene referentne veličine napona generatora te u slučaju promjene mehaničke snage na osovini generatora. Također, simulacijski model

omogućuje ispitivanje stabilnosti sustava u slučaju pojave velikih poremećaja, tj. kratkog spoja na sabirnici generatora. Za ispitivanje kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja odabran je sinkroni generator s istaknutim polovima. Potpuni popis parametra generatora prema [68] dan je u tablici 6.1.

Tablica 6.1. Popis parametara sinkronog generatora SG 83kVA

Oznaka parametra	Opis parametra	Vrijednost
S_n	nazivna snaga generatora	83000 kVA
U_n	nazivni armaturni napon generatora	400 V
I_n	nazivna armaturna struja generatora	120 A
f_n	nazivna frekvencija generatora	50 Hz
p	broj pari polova	5
n	nazivna brzina vrtnje	600 min^{-1}
$\cos\varphi_n$	nazivni faktor snage	0,8
U_{fn}	nazivni napon uzbude	100 V
I_{fn}	nazivna struja uzbude	11,8 A
X_d [rj]	uzdužna reaktancija	0,8056
X_q [rj]	poprečna reaktancija	0.5334
X_l [rj]	rasipna reaktnacija	0,0834
X'_d [rj]	prijelazna uzdužna reaktancija	0,1816
X''_d [rj]	početna uzdužna reaktancija	0,1193
X''_q [rj]	početna poprečna reaktancija	0.1074
R_{fd} [rj]	otpor uzbudnog namota	0,002183
X_{fd} [rj]	reaktancija uzbudnog namota	0,8358
T'_{d0} [s]	prijelazna uzdužna vremenska konstanta uz otvoreni armaturni krug	1,21866 s
T'_d [s]	prijelazna uzdužna vremenska konstanta uz zatvoreni armaturni krug	0,2746 s
R_s [rj]	otpor statorskog namota	0,03604
T''_d [s]	početna uzdužna vremenska konstanta uz zatvoreni armaturni krug	0,054 s
T''_q [s]	početna poprečna vremenska konstanta uz zatvoreni armaturni krug	0,054 s

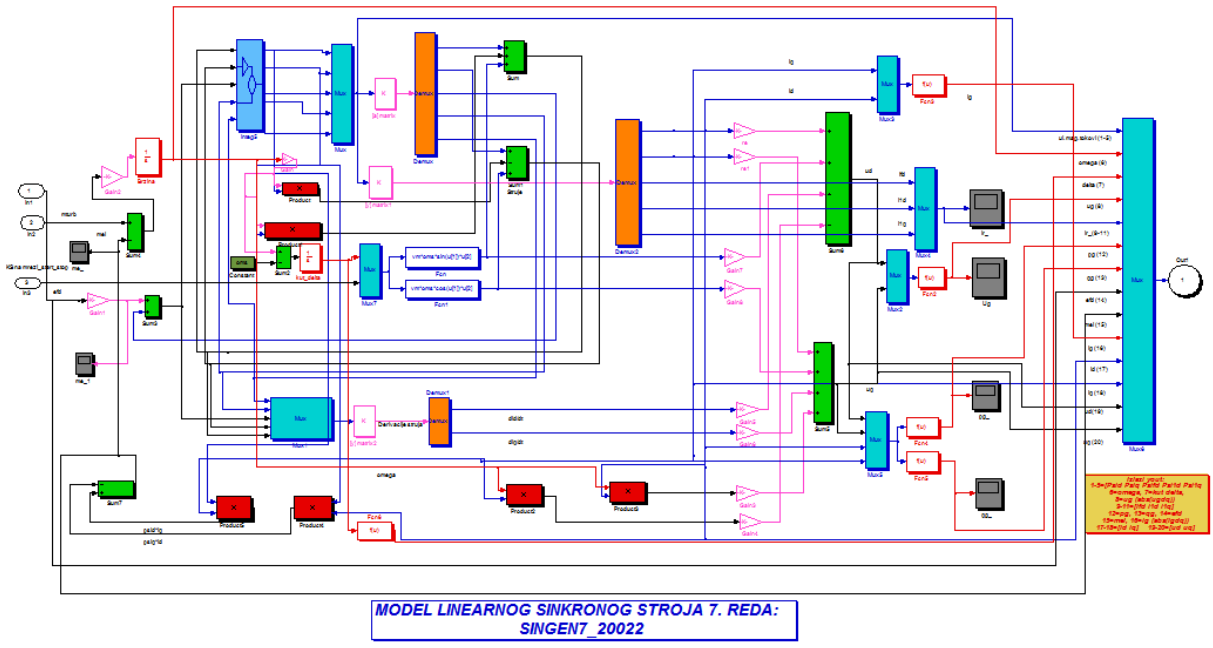
T''_{d0} [s]	početna uzdužna vremenska konstanta uz otvoreni armaturni krug	0,0822 s
T''_{q0} [s]	početna poprečna vremenska konstanta uz otvoreni armaturni krug	0,0822 s
X_{lD} [rj]	rasipna reaktancija uzdužnog dijela prigušnog namota	0,0566
R_D [rj]	otpor uzdužnog dijela prigušnog namota	0,006
X_{lQ} [rj]	rasipna reaktancija poprečnog dijela prigušnog namota	0,0253
R_Q [rj]	otpor poprečnog dijela prigušnog namota	0,0056
X_{lfd} [rj]	rasipna reaktancija uzbudnog namota	0,1137
R_e [rj]	ekvivalentni otpor transformatora i vodova	0,0272
X_e [rj]	elvivalentna reaktancija transformatora i vodova	0,264
H [rj]	konstanta tromosti	0,862

Iz podataka navedenih u tablici 6.1. određeni su parametri modela generatora definirani izrazima (3-104) do (3-108) i dani u tablici 6.2:

Tablica 6.2. Parametri modela sinkronog generatora trećeg reda

b_0	b_1	b_2	b_3	b_4
314,1593	1,2447	0.2625	1,0988	1,9697

Korišteni model sinkronog generatora preuzet iz [37] dan je na slici 6.2.

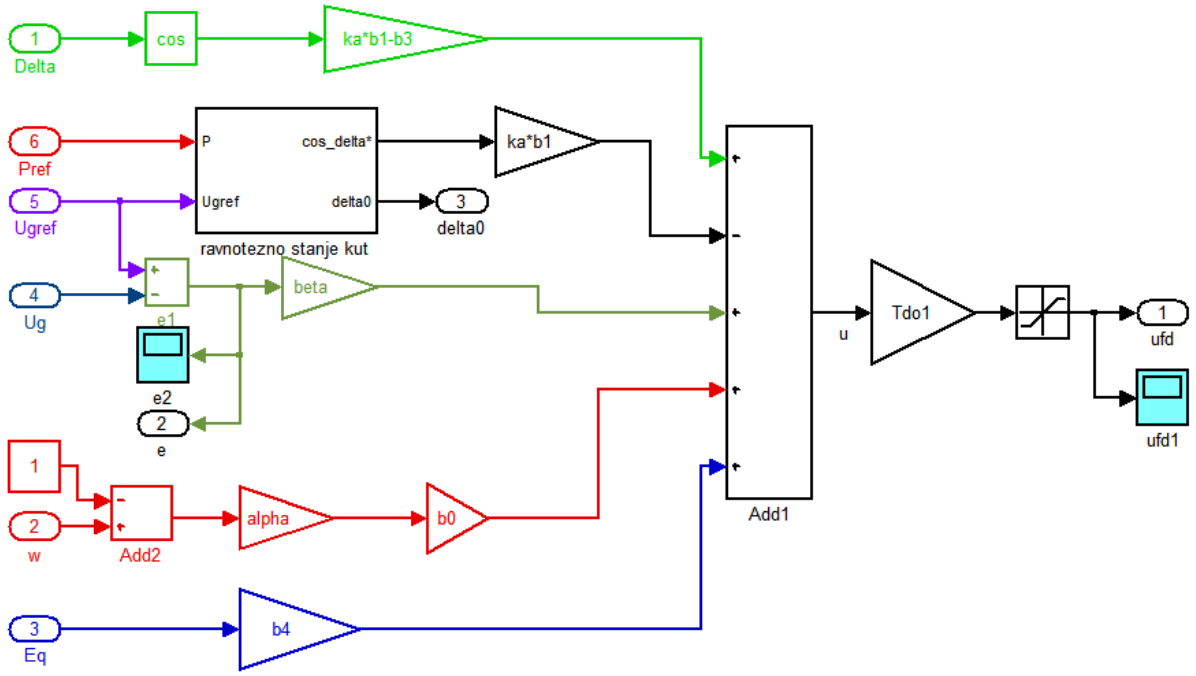


Slika 6.2. Model linearnog sinkronog stroja sedmog reda

Prema izrazu (4-121):

$$u = b_4 x_3 + \alpha b_0 x_2 + (k b_1 - b_3)\cos x_1 - k b_1 \cos x_{1*} + \beta \mathrm{e}. \qquad (6\text{-}1)$$

modeliran je IDA stabilizator elektromehaničkih njihanja prikazan na slici 6.3. Unutar stabilizatora nalazi se blok za estimaciju kuta opterećenja generatora u ravnotežnoj točki, koji, uz pretpostavku da su ostali parametri generatora konstantni, ovisi o mehaničkoj snazi i referentnom naponu generatora.



Slika 6.3. IDA stabilizator elektromehaničkih njihanja

Izlaz regulatora prema izrazu (3-109) valja pomnožiti prijelaznom uzdužnom vremenskom konstantom generatora uz otvoreni armaturni krug da bi se dobio napon uzbude generatora izražen u sustavu relativnih jedinica statora, što model generatora prikazan na slici 6.2. uzima kao ulaznu vrijednost.

U nastavku poglavlja prvo će biti određen raspon parametara IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja za koji je ispitivani sustav stabilan te utjecaj promjene parametara IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja na kvalitetu regulacije. Nadalje će biti dani simulacijski odzivi ispitivanja slijeđenja referentne vrijednosti napona generatora, pojave poremećaja u sustavu u frekvencijskom rasponu karakterističnom za elektromehanička njihanja od 0,2 do 3 Hz te usporedbe kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja i kvalitete regulacije klasičnih linearnih regulatora. Pri svakom ispitivanju bit će dani odzivi referentnog napona generatora, tranzijentne elektromotorne sile, napona uzbude, jalove

snage, napona generatora, kuta opterećenja, brzine vrtnje, struje uzbude, djelatne snage i struje generatora. Također će za odabrane radne točke biti dana analiza stabilnosti sustava.

6.1. Stabilnost modeliranog sustava s obzirom na izbor parametara IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja

Kako je objašnjeno u četvrtom poglavlju, IDA stabilizator u svojoj strukturi sadrži tri parametra čija promjena utječe na kvalitetu regulacije rada sinkronog generatora s istaknutim polovima spojenog na električnu mrežu. Parametar β predstavlja pojačanje signala pogreške armaturnog napona generatora. Iz definicije signala pogreške vidljivo je da će sustav biti stabilan samo za nenegativne vrijednosti parametra β jer bi u suprotnom u sustavu bila ostvarena pozitivna povratna veza.

$$\beta > 0. \tag{6-2}$$

Parametar k je parametar koji dodaje prigušenje dinamici tranzijentne elektromotorne sile. Izrazi (4-86) i (5-38) određuju minimalnu vrijednost parametra k, odnosno k' koji je također pozitivan realni broj $k' \geq 1$.

Prema (4-82) vidljivo je da je parametar α strukturni parametar koji povezuje dinamiku promjene kutne brzine generatora i tranzijentne elektromotorne sile, tj. rotorskog toka generatora. Uvjet na parametar α dan je izrazom (5-35) i ovisi o vrijednosti parametra k'.

6.2. Utjecaj promjene parametara IDA stabilizatora na kvalitetu rada generatora

U prošlom potpoglavlju određen je raspon parametara IDA stabilizatora u kojem je odziv ispitivanog sustava stabilan. Ovdje će biti ispitana kvaliteta regulacije IDA stabilizatora u ovisnosti o vrijednostima parametara β, k i α. Uvede li se u upravljački algoritam IDA stabilizatora (6-1) supstitucija parametra k parametrom k', dobiva se izraz sljedećeg oblika:

$$u = b_4 x_3 + \alpha b_0 x_2 + (k' - 1)\, b_3 \cos x_1 - k' b_3 \cos x_{1*} + \beta \mathrm{e}. \tag{6-3}$$

Jedino stacionarno stanje koje mora biti poznato kako bi se mogla implementirati regulacija prema upravljačkom zakonu (6-3) je stacionarno stanje kuta opterećenja generatora x_{1*} te se ono estimira. Stacionarno stanje x_{2*} promjene brzine vrtnje je prema svojoj definiciji

jednako nuli. Ostaje još razmotriti što utječe na stacionarno stanje tranzijentne elektromotorne sile x_{3*}. Prema (3-112) upravljački signal djeluje neposredno na vremensku derivaciju varijable x_3. Drugim riječima, upravljački signal (6-3) neposredno djeluje na dinamiku toka rotora, tj. na dinamiku uzbude:

$$\dot{x}_3 = b_3 \cos x_1 - b_4 x_3 + u = k' b_3 (\cos x_1 - \cos x_{1*}) + \alpha b_0 x_2 + \beta e . \tag{6-4}$$

Izraz (6-4) pokazuje da je dinamika rotorskog toka određena utjecajima dinamike promjene kosinusa kuta opterećenja u odnosu na kosinus stacionarnog kuta opterećenja, zatim utjecajem dinamike brzine vrtnje rotora te utjecajem dinamičke pogreške armaturnog napona generatora. Svaki od utjecaja množi se s odgovarajućim parametrom IDA stabilizatora. Stacionarno stanje rotorskog toka određeno je integralom izraza (6-4) i nastupa kad ne postoji odstupanje kuta opterećenja, brzine vrtnje i armaturnog napona sinkronog generatora. Kako bi utjecaj dinamičke pogreške napona generatora bio podjednak utjecaju dinamike mehaničkih veličina, parametar β treba biti reda veličine sinkrone kružne frekvencije statora b_0 pa je ovdje zgodno uvesti nadomjesni parametar b' takav da vrijedi:

$$\beta = b' b_0 . \tag{6-5}$$

6.3.1. Optimiziranje kvalitete regulacije promjenom parametra IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja

Kako je pokazano izrazima (6-3) i (6-4), promjena svakog od parametara IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja dovodi do promjene upravljačkog signala i dinamike uzbude generatora. Kako bi se ispitao utjecaj promjene parametara na kvalitetu regulacije IDA stabilizatora, proveden je niz simulacijskih ispitivanja čiji su rezultati dani u tablicama 6.3. do 6.14. Ispitivanja se vrše za mali i veliki poremećaj u induktivnom i kapacitivnom režimu rada. Ispitni mali poremećaj je impulsna promjena referentne vrijednosti napona generatora. Ispitni veliki poremećaj je pojava kratkog spoja na sabirnici generatora u trajanju 200 ms. Kako bi se dobila ocjena kvalitete regulacije IDA stabilizatora, prilikom svake simulacije bilježeni su podaci o maksimalnim nadvišenjima armaturnog napona i kuta opterećenja generatora σ_{Ug}, odnosno σ_{δ}. Također, kvaliteta regulacije se određuje na temelju vremenski otežane linearne površine apsolutne vrijednosti regulacijskog odstupanja (*engl.* **I**ntegral of **T**ime Multiplied by **A**bsolute Value of **E**rror – ITAE) [40]:

$$I_{ITAE} = \int_0^{\infty} |e(t)| t dt . \qquad (6\text{-}6)$$

ITAE kriterij je odabran stoga što, osim ukupne površine ispod signala regulacijske pogreške, sadrži i podatak o vremenu u kojem regulacijska pogreška iščezava. Važno je primijetiti da će integral dan izrazom (6-6) konvergirati samo ako ne postoji regulacijsko odstupanje u stacionarnom stanju. Što je vrijednost integrala (6-6) manja, to je kvaliteta regulacije bolja. ITAE za signal pogreške napona generatora u tablicama je označen s $ITAE_{Ug}$, a ITAE za odstupanje kuta opterećenja od stacionarnog stanja označen je s $ITAE_{\delta}$.

Vrijednosti odziva povoljne kvalitete u tablicama su označeni plavo, a nepovoljni odzivi su označeni crveno.

Tablica 6.3. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=1, induktivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
1	1	1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}94 \cdot 10^{-4}$	$1{,}63 \cdot 10^{-2}$	$6{,}15 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}23 \cdot 10^{-4}$	$1{,}63 \cdot 10^{-2}$	$6{,}34 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}63 \cdot 10^{-4}$	$1{,}63 \cdot 10^{-2}$	$6{,}64 \cdot 10^{-4}$
	10	1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}37 \cdot 10^{-4}$	$1{,}56 \cdot 10^{-2}$	$2{,}26 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}71 \cdot 10^{-4}$	$1{,}56 \cdot 10^{-2}$	$2{,}62 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$6{,}15 \cdot 10^{-4}$	$1{,}56 \cdot 10^{-2}$	$3{,}07 \cdot 10^{-4}$
	100	1	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$	$13{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}51 \cdot 10^{-2}$	$10{,}0 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$	$13{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}51 \cdot 10^{-2}$	$11{,}0 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$	$13{,}0 \cdot 10^{-4}$	$1{,}51 \cdot 10^{-2}$	$11{,}0 \cdot 10^{-4}$

Tablica 6.4. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=5, induktivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
5	1	1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}56 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}15 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}56 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}16 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}56 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}18 \cdot 10^{-4}$
	10	1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}96 \cdot 10^{-4}$	$1{,}60 \cdot 10^{-2}$	$4{,}25 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}96 \cdot 10^{-4}$	$1{,}60 \cdot 10^{-2}$	$4{,}26 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}96 \cdot 10^{-4}$	$1{,}60 \cdot 10^{-2}$	$4{,}26 \cdot 10^{-4}$
	100	1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}34 \cdot 10^{-4}$	$1{,}53 \cdot 10^{-2}$	$2{,}27 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}34 \cdot 10^{-4}$	$1{,}53 \cdot 10^{-2}$	$2{,}27 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}35 \cdot 10^{-4}$	$1{,}53 \cdot 10^{-2}$	$2{,}28 \cdot 10^{-4}$

Tablica 6.5. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=10, induktivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
10	1	1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}56 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}38 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}56 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}38 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}56 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}38 \cdot 10^{-4}$
	10	1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}73 \cdot 10^{-4}$	$1{,}61 \cdot 10^{-2}$	$5{,}39 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}73 \cdot 10^{-4}$	$1{,}61 \cdot 10^{-2}$	$5{,}40 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}73 \cdot 10^{-4}$	$1{,}61 \cdot 10^{-2}$	$5{,}40 \cdot 10^{-4}$
	100	1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}30 \cdot 10^{-4}$	$1{,}56 \cdot 10^{-2}$	$2{,}23 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}30 \cdot 10^{-4}$	$1{,}56 \cdot 10^{-2}$	$2{,}23 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$5{,}30 \cdot 10^{-4}$	$1{,}56 \cdot 10^{-2}$	$2{,}23 \cdot 10^{-4}$

U nastavku se analizira kvaliteta odziva za jednake promjene parametara u slučaju malog poremećaja u kapacitivnom režimu rada.

Tablica 6.6. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=1, kapacitivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
1	1	1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}77 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}02 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}88 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$15{,}0 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$18{,}0 \cdot 10^{-4}$
	10	1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}83 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}92 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$15{,}0 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$17{,}7 \cdot 10^{-4}$
	100	1	$2{,}85 \cdot 10^{-2}$	$2{,}49 \cdot 10^{-2}$	$7{,}35 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
		5	$2{,}83 \cdot 10^{-2}$	$2{,}32 \cdot 10^{-2}$	$7{,}28 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
		10	$2{,}79 \cdot 10^{-2}$	∞	$7{,}19 \cdot 10^{-2}$	∞

Tablica 6.7. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=5, kapacitivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
5	1	1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}26 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}50 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}85 \cdot 10^{-4}$
	10	1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}01 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}03 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}00 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}13 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}00 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}37 \cdot 10^{-4}$
	100	1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$6{,}32 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$6{,}32 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$6{,}28 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$

Tablica 6.8. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=10, kapacitivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
10	1	1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}50 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}48 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}64 \cdot 10^{-4}$
	10	1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}56 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}63 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}71 \cdot 10^{-4}$
	100	1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}79 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
		5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}79 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
		10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}80 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$

Dalje se promatra odziv na velike poremećaje. Prvo se simulira kratki spoj u trajanju 300 ms u induktivnom režimu rada generatora.

Tablica 6.9. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=1, induktivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
1	1	1	2,2035	0,1255	7,359	1,063
		5	2,2035	0,1242	7,358	1,055
		10	2,2035	0,1232	7,360	1,045
	10	1	2,2031	0,2012	7,358	1,078
		5	2,2031	0,2020	7,361	1,073
		10	2,2031	0,2030	7,364	1,065
	100	1	2,2014	1,0570	7,592	1,7822
		5	2,2014	1,0368	7,592	1,7626
		10	2,2014	1,0121	7,591	1,7392

Tablica 6.10. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=5, induktivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
5	1	1	2,2035	0,1064	7,359	1,1529
		5	2,2035	0,1062	7,359	1,1512
		10	2,2035	0,1062	7,361	1,1488
	10	1	2,2035	0,1393	7,356	1,0600
		5	2,2035	0,1391	7,356	1,0588
		10	2,2035	0,1389	7,356	1,0575
	100	1	2,2030	0,2447	7,382	1,0787
		5	2,2030	0,2448	7,382	1,0779
		10	2,2030	0,2449	7,382	1,0769

Tablica 6.11. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=10, induktivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
10	1	1	2,2035	0,1062	7,360	1,1668
		5	2,2035	0,1062	7,360	1,1660
		10	2,2035	0,1062	7,361	1,1649
	10	1	2,2035	0,1240	7,359	1,0546
		5	2,2035	0,1239	7,359	1,0539
		10	2,2035	0,1237	7,358	1,0531
	100	1	2,2030	0,1999	7,359	1,0764
		5	2,2030	0,2000	7,359	1,0758
		10	2,2030	0,2001	7,359	1,0750

Slijedi analiza kvalitete regulacije za opisanu promjenu parametara prilikom kratkog spoja u kapacitivnom režimu rada generatora u trajanju 200 ms.

Tablica 6.12. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=1, kapacitivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
1	1	1	1,8625	0,0315	2,3488	0,1317
		5	1,8625	0,0305	2,3488	0,1310
		10	1,8625	∞	2,3487	∞
	10	1	1,8614	0,1193	2,3501	0,1230
		5	1,8615	0,1182	2,3501	0,1227
		10	1,8615	∞	2,3499	∞
	100	1	1,8567	1,5313	2,3586	0,1367
		5	1,8567	1,5049	2,3586	0,1366
		10	1,8567	∞	2,3586	∞

Tablica 6.13. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=5, kapacitivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
5	1	1	1,8625	0,0224	2,3488	0,1428
		5	1,8625	0,0222	2,3487	0,1427
		10	1,8625	0,0219	2,3487	0,1426
	10	1	1,8620	0,0414	2,3495	0,1279
		5	1,8620	0,0413	2,3494	0,1278
		10	1,8620	0,0411	2,3494	0,1275
	100	1	1,8602	0,2044	2,3512	0,1258
		5	1,8601	0,2040	2,3514	0,1258
		10	1,8600	0,2036	2,3516	0,1257

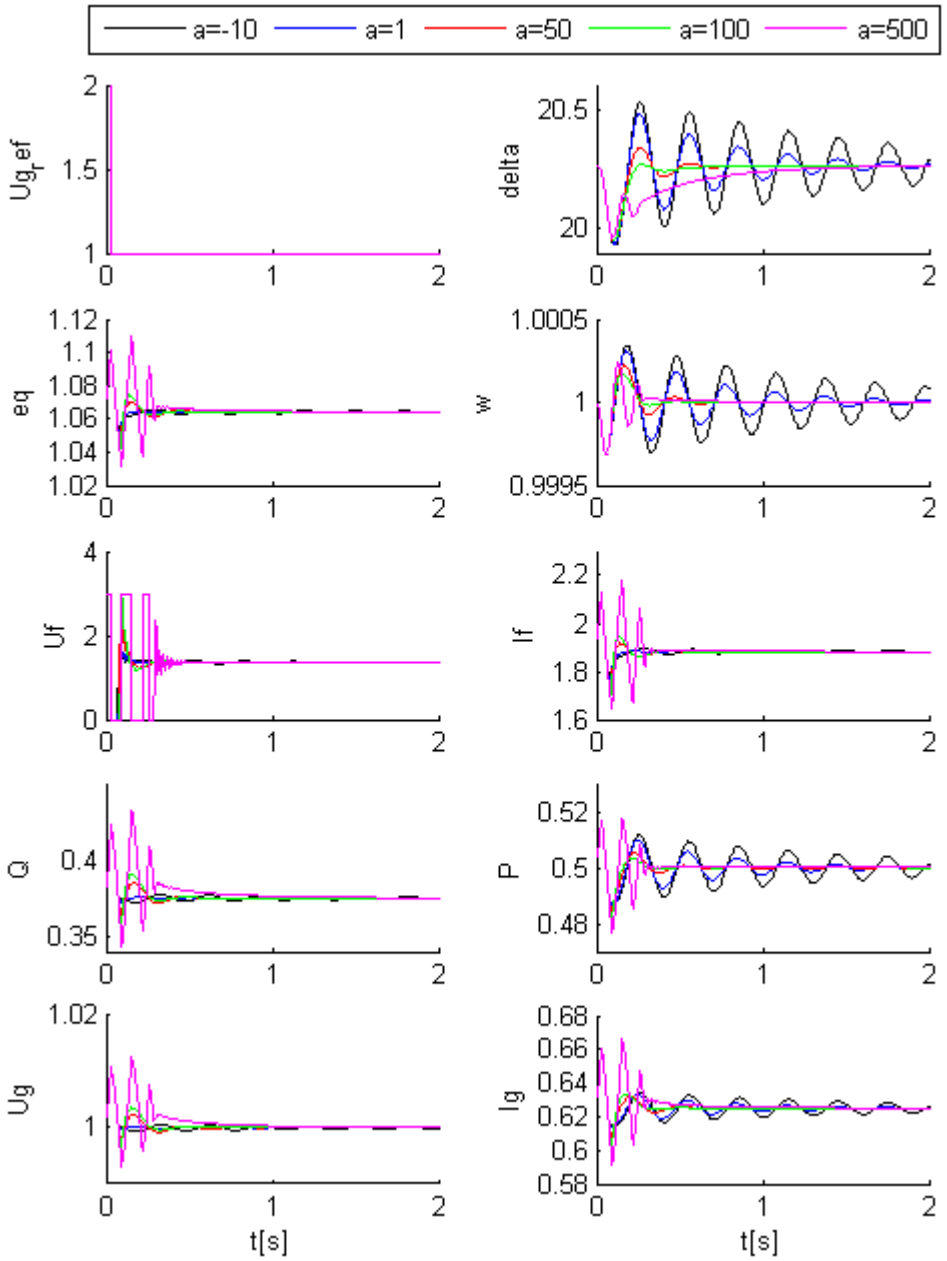
Tablica 6.14. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=10, kapacitivni režim rada

b'	α	k'	σ_{Ug}	$ITAE_{Ug}$	σ_{δ}	$ITAE_{\delta}$
10	1	1	1,8624	0,0218	2,3489	0,1443
		5	1,8624	0,0217	2,3489	0,1442
		10	1,8624	0,0215	2,3489	0,1441
	10	1	1,8623	0,0305	2,3491	0,1304
		5	1,8623	0,0304	2,3490	0,1303
		10	1,8623	0,0305	2,3491	0,1303
	100	1	1,8612	0,1190	2,3505	0,1230
		5	1,8612	0,1188	2,3505	0,1229
		10	1,8612	0,1187	2,3505	0,1229

Rezultati provedenih simulacija pokazuju da je u ispitivanom rasponu parametara optimalno parametar k' postaviti na vrijednost 1, parametar α je također povoljno postaviti na vrijednost 1 kako bi se dobilo minimalno odstupanje u odzivu napona, a ukoliko je cilj postići minimalnu oscilaciju mehaničkih veličina, povoljno je parametar α postaviti na veću vrijednost. Iz odziva na veliki poremećaj u kapacitivnom režimu rada je vidljivo da je parametar b' povoljnije postaviti na veće vrijednosti, jer je tada sustav stabilniji. Rezultati simulacija ukazuju na stabilnost reguliranog sustava za široki opseg vrijednosti parametara IDA stabilizatora. Prilikom pokusa kratkog spoja na sabirnici generatora u kapacitivnom režimu rada dolazi do pojavljivanja konstantne regulacijske pogreške napona generatora i kuta opterećenja generatora za parametar $k' = 10$, zbog čega ITAE integral ne konvergira. Valja primijetiti kako se, zbog nelinearne prirode sustava i IDA stabilizatora u svojstvu uzbudnog regulatora, analitički ne može odrediti optimalni izbor parametara IDA stabilizatora. U sljedećim potpoglavljima promatrat će se odzivi sustava na promjenu pojačanja pojedinog parametra, dok će ostali parametri biti postavljeni na ovdje dobivene optimalne vrijednosti.

6.3.2. Utjecaj promjene parametra α na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije

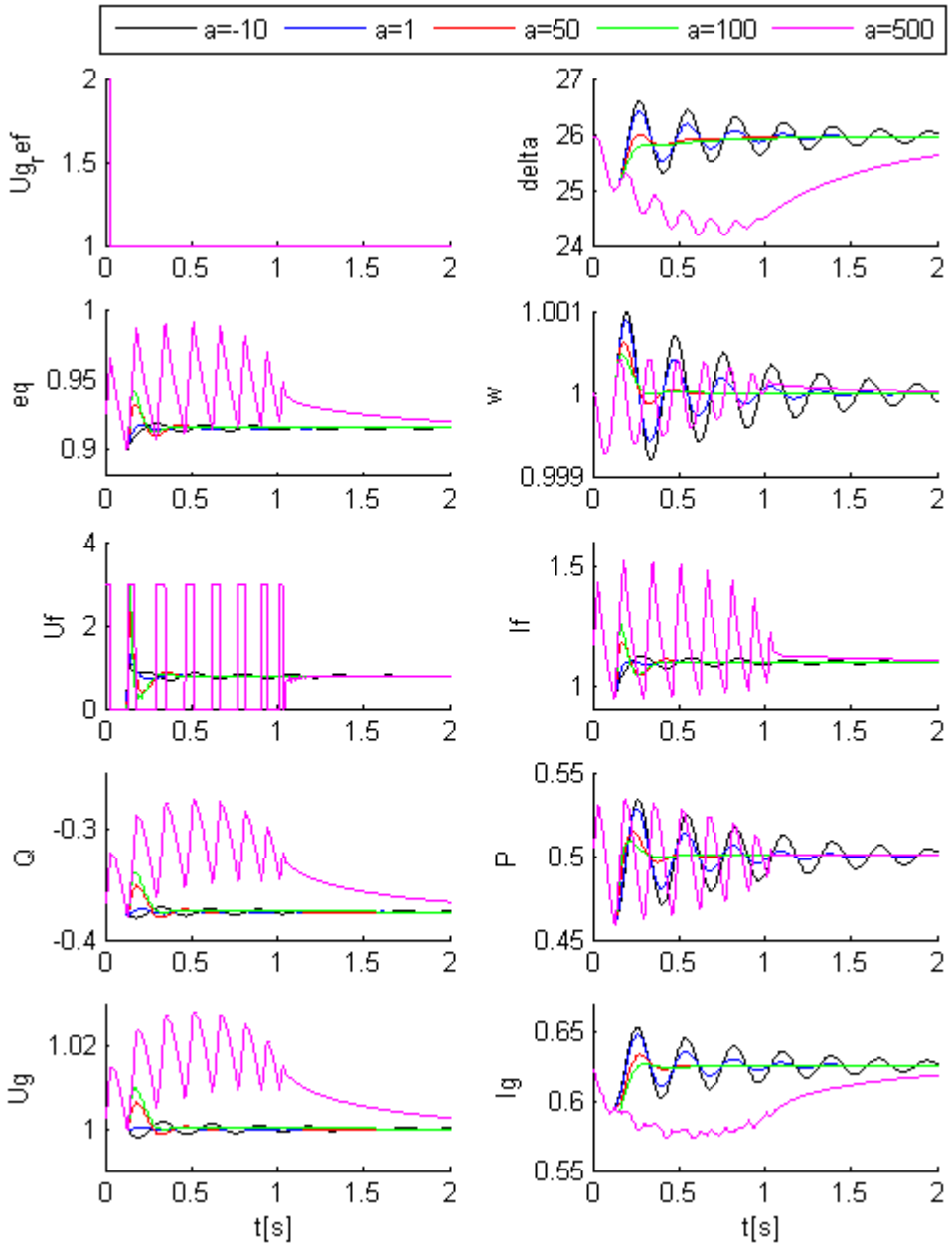
Da bi se ispitao utjecaj promjene parametra α na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije IDA stabilizatora, simulirana je impulsna promjena referentne vrijednosti napona generatora. Simulacija je izvedena u dvije radne točke. Prva radna točka odgovara induktivnom režimu rada, a druga radna točka kapacitivnom režimu rada. Za obje radne točke vrijedi: je $U_{gref} = 1$, $P_{ref} = 0{,}5$, $cos\varphi = 0{,}8$. Vrijednosti ostala dva parametra se drže konstantima i iznose: $k' = 1$, $b' = 5$ Odzivi simulacija dani su na slikama 6.4. i 6.5, a njihove analize dane su u tablicama 6.15 i 6.16. Za razliku od prošlog podpoglavlja, promjena parametra α se ispituje u puno većem opsegu, od -10 do 500. Vrijeme simulacije je 5 s, ali je, zbog bolje preglednosti prikazano prve dvije sekunde simulacije.



Slika 6.4. Promjena parametra α, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, induktivni režim rada

Tablica 6.15. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.4.

α	σ_{Ug}	$\mathbf{ITAE_{Ug}}$	σ_{δ}	$\mathbf{ITAE_{\delta}}$
-10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}52 \cdot 10^{-4}$	$1{,}64 \cdot 10^{-2}$	$7{,}08 \cdot 10^{-5}$
1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}52 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-5}$
50	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}70 \cdot 10^{-4}$	$1{,}56 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-5}$
100	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}90 \cdot 10^{-4}$	$1{,}53 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-5}$
500	$1{,}26 \cdot 10^{-2}$	$6{,}62 \cdot 10^{-4}$	$1{,}51 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-5}$



Slika 6.5. Promjena parametra α, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, kapacitivni režim rada

Tablica 6.16. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.5.

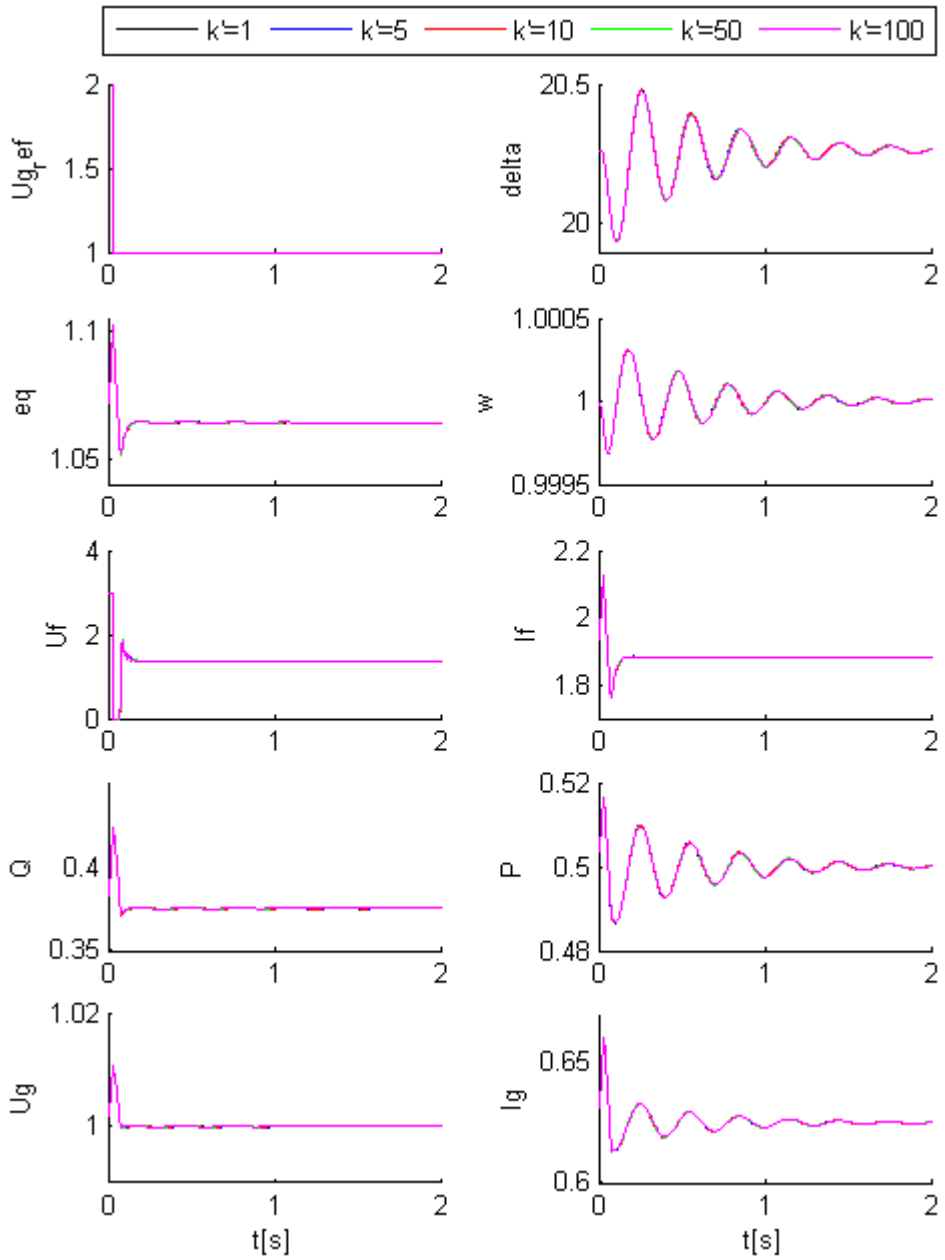
α	σ_{Ug}	$\mathbf{ITAE_{Ug}}$	σ_{δ}	$\mathbf{ITAE_{\delta}}$
-10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}32 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$13{,}0 \cdot 10^{-4}$
1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}25 \cdot 10^{-4}$
50	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}79 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
100	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$6{,}32 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$
500	$2{,}72 \cdot 10^{-2}$	$170 \cdot 10^{-4}$	$6{,}75 \cdot 10^{-2}$	$1{,}15 \cdot 10^{-4}$

Rezultati pokazuju da je, za dane vrijednosti parametara k i β parametar α optimalno postaviti na 1. Za induktivni režim rada tada se postiže najveće prigušenje u odzivu kuta opterećenja generatora i najbolja kvaliteta regulacije prema ITAE kriteriju. Povećanjem parametra α povećava se prigušenje u odzivu kuta opterećenja generatora, ali se smanjuje prigušenje u odzivu napona generatora.

6.3.3. Utjecaj promjene parametra k na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije

Utjecaj promjene parametra k na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije IDA stabilizatora ispituje se također simuliranjem impulsne promjene referentne vrijednosti napona generatora. Simulacija je izvedena u dvije radne točke. Prva radna točka odgovara induktivnom režimu rada, a druga radna točka kapacitivnom režimu rada. Za obje radne točke vrijedi: je $U_{gref} = 1$, $P_{ref} = 0{,}5$, $cos\varphi = 0{,}8$. Vrijednosti ostala dva parametra se drže konstantima i iznose: $\alpha = 1$, $b' = 5$. Zbog jednostavnijeg zapisa uvodi se pomoćni parametar k' tako da vrijedi $k = \mathrm{k}' \cdot \mathrm{b}_3/\mathrm{b}_1$. U skladu s izrazom (4-86) vrijedi $\mathrm{k}' \geq 1$. Odzivi simulacija dani su na slikama 6.6. i 6.7, a njihove analize dane su u tablicama 6.17 i 6.18.

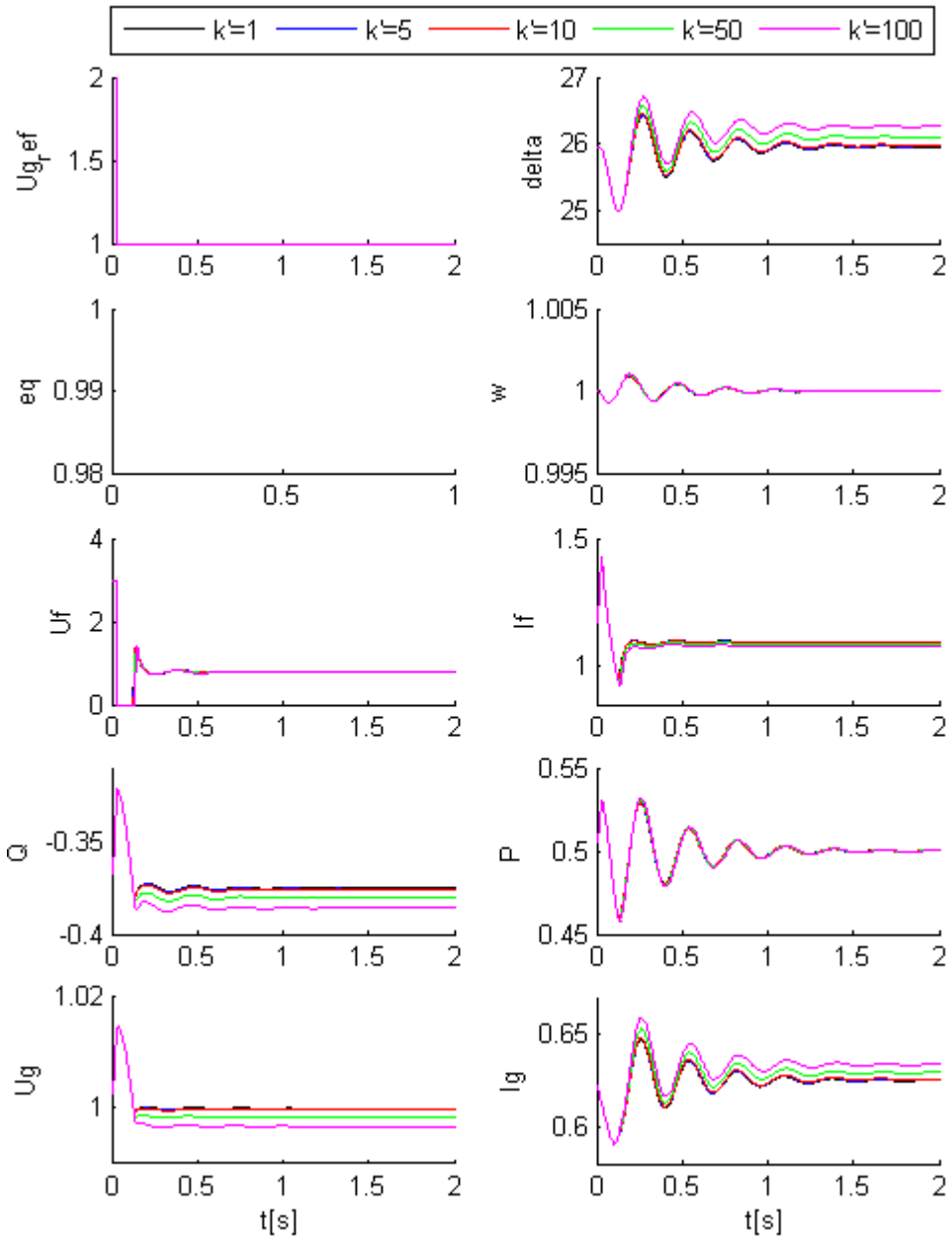
Rezultati simulacije za induktivni režim rada ukazuju na to da parametar k ne djeluje značajno na kvalitetu odziva i stabilnost rada sinkronog generatora, međutim, simulacija kapacitivnog režima rada pokazuje da povećanje parametra k djeluje negativno na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije IDA stabilizatora. Naime, s povećanjem parametra k u kapacitivnom režimu rada dolazi do povećanja stalne regulacijske greške, tj. napon generatora više ne slijedi referentnu vrijednost. Ova se pojava može objasniti činjenicom da prema izrazu (6-1) jedino parametar k djeluje na upravljački signal u stacionarnom stanju te njegovo značajno povećanje dovodi do smanjenja stacionarnog napona uzbude, a time i napona na izlazu generatora.



Slika 6.6. Promjena parametra k, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, induktivni režim rada

Tablica 6.17. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.6.

k'	σ_{Ug}	$\mathbf{ITAE_{Ug}}$	σ_{δ}	$\mathbf{ITAE_{\delta}}$
1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-5}$
5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-5}$
10	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-5}$
50	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-5}$
100	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-5}$



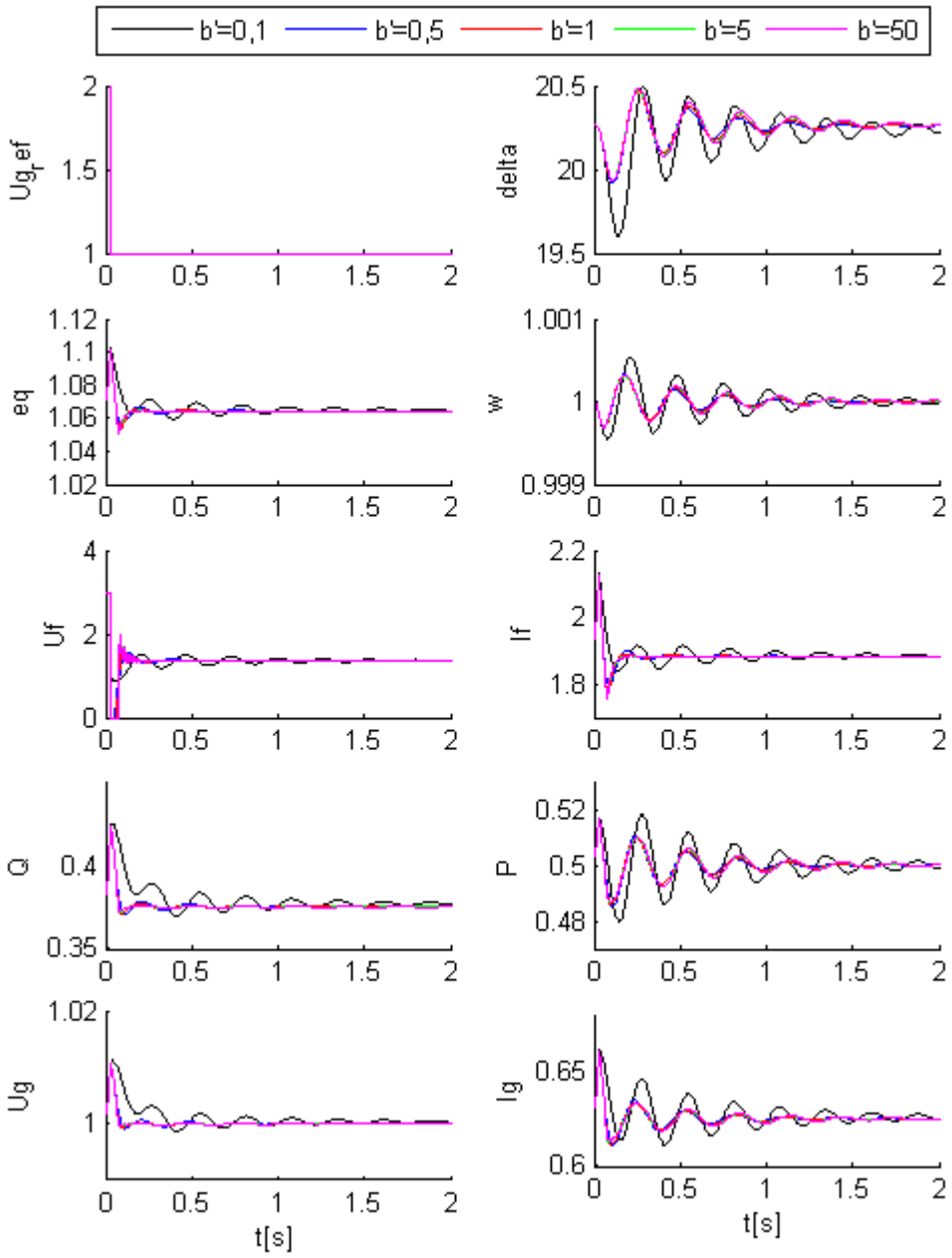
Slika 6.7. Promjena parametra k, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, kapacitivni režim rada

Tablica 6.18. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.7.

k'	σ_{Ug}	$\mathrm{ITAE}_{\mathrm{Ug}}$	σ_{δ}	ITAE_{δ}
1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}25 \cdot 10^{-4}$
5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}50 \cdot 10^{-4}$
10	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}85 \cdot 10^{-4}$
50	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	∞	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	∞
100	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	∞	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	∞

6.3.4. Utjecaj promjene parametra β na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije

Utjecaj promjene parametra β na stabilnost sustava i kvalitetu regulacije IDA stabilizatora ispituje se također dvije radne točke $U_{gref} = 1$, $P_{ref} = 0{,}5$, $cos\varphi = 0{,}8$. simuliranjem impulsne promjene referentne vrijednosti napona generatora. Prva radna točka odgovara induktivnom režimu rada, a druga radna točka kapacitivnom režimu rada. Vrijednosti ostala dva parametra se drže konstantima i iznose: $\alpha = 1$, $k' = 1$. Odzivi simulacija dani su na slikama 6.8. i 6.9, a njihove analize dane su u tablicama 6.19 i 6.20.



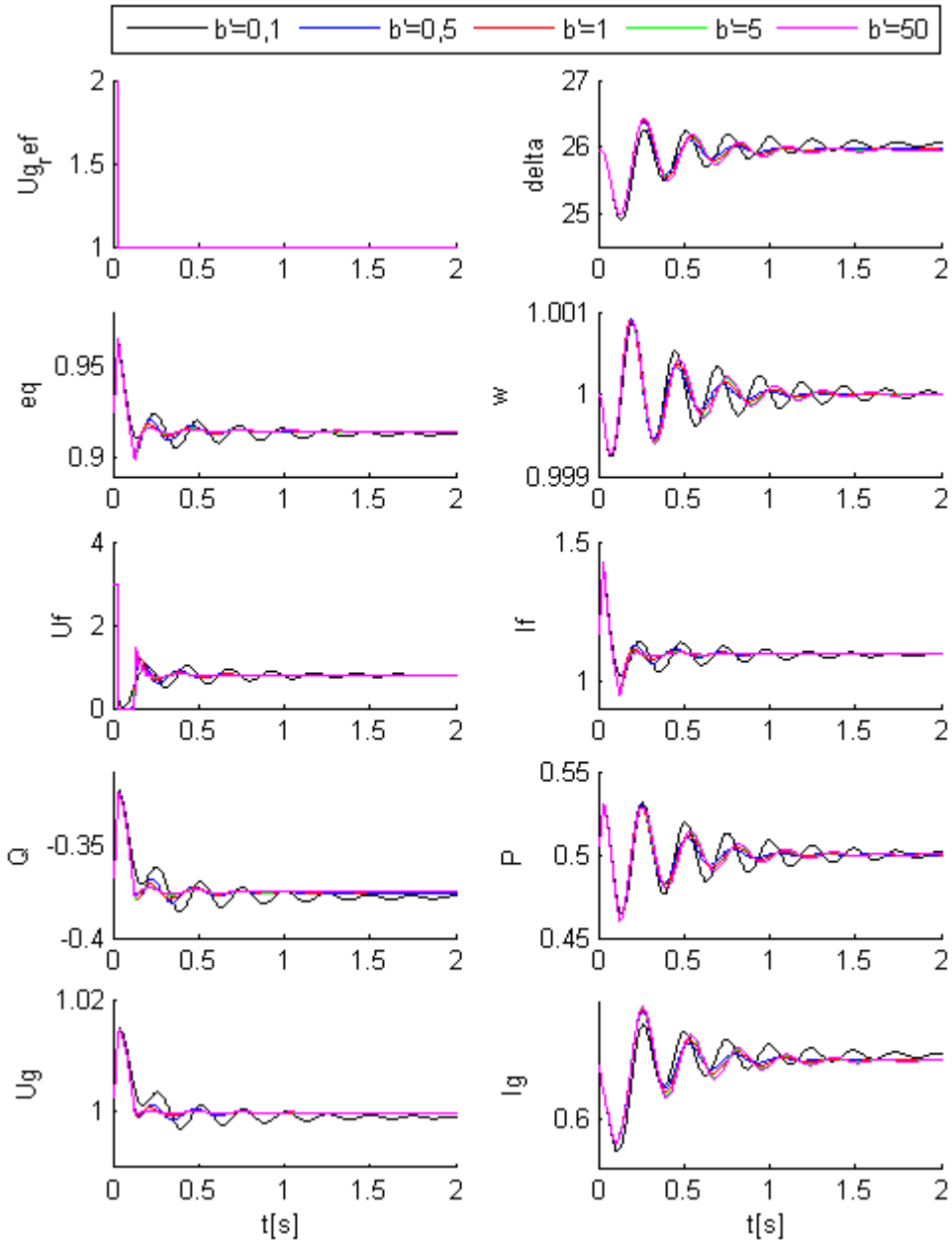
Slika 6.8. Promjena parametra β, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, induktivni režim rada

Tablica 6.19. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.8.

b'	σ_{Ug}	$\mathbf{ITAE_{Ug}}$	σ_{δ}	$\mathbf{ITAE_{\delta}}$
0,1	$1{,}13 \cdot 10^{-2}$	$6{,}40 \cdot 10^{-4}$	$3{,}26 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-4}$
0,5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}54 \cdot 10^{-4}$	$1{,}72 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-4}$
1	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}63 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-4}$
5	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-4}$
50	$1{,}05 \cdot 10^{-2}$	$4{,}53 \cdot 10^{-4}$	$1{,}62 \cdot 10^{-2}$	$7{,}09 \cdot 10^{-4}$

Vrijeme simulacije je 5 s, a zbog preglednosti prikazane su prve dvije sekunde simulacije. Iz rezultata prikazanih na slici 6.8. i u tablici 6.19. vidljivo je da povećanje parametra β djeluje povoljno na odziv napona generatora i odziv kuta opterećenja.

U kapacitivnom režimu rada promjena vrijednosti parametra β nešto više utječe na kvalitetu regulacije rada sinkronog generatora. Povećanje parametra β i u ovom slučaju djeluje pozitivno na kvalitetu regulacije sustava.



Slika 6.9. Promjena parametra β, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, kapacitivni režim rada

Tablica 6.20. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.9.

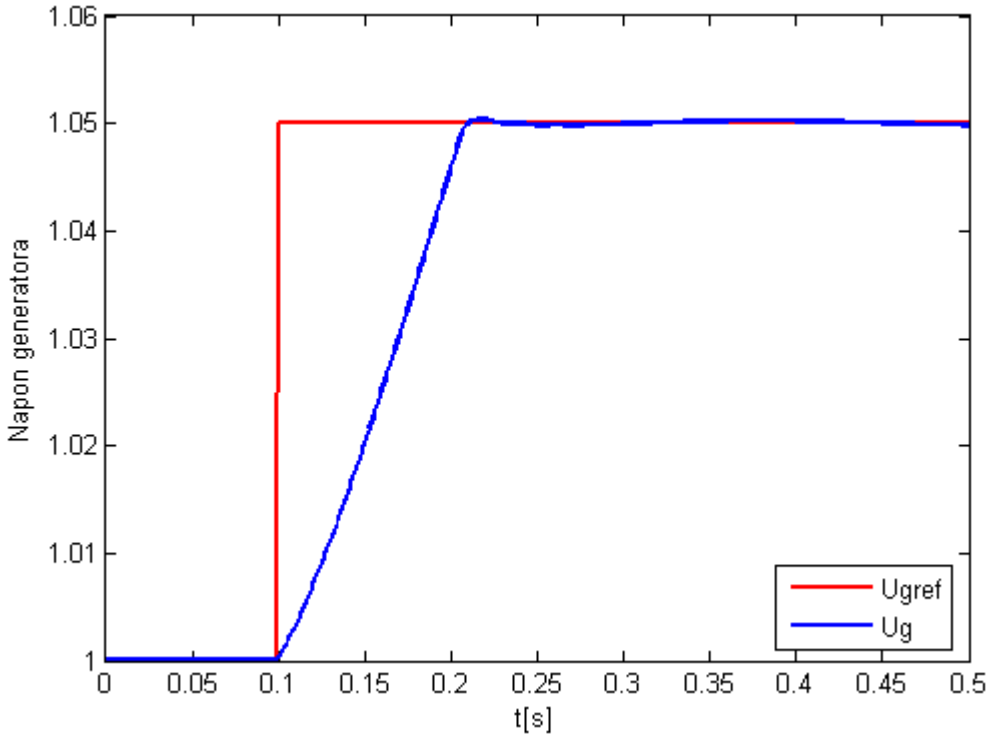
b'	σ_{Ug}	$\mathbf{ITAE_{Ug}}$	σ_{δ}	$\mathbf{ITAE_{\delta}}$
0,1	$1{,}46 \cdot 10^{-2}$	$8{,}49 \cdot 10^{-4}$	$4{,}02 \cdot 10^{-2}$	$7{,}19 \cdot 10^{-4}$
0,5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$5{,}03 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}47 \cdot 10^{-4}$
1	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$2{,}78 \cdot 10^{-4}$
5	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}25 \cdot 10^{-4}$
50	$1{,}42 \cdot 10^{-2}$	$4{,}95 \cdot 10^{-4}$	$3{,}72 \cdot 10^{-2}$	$3{,}43 \cdot 10^{-4}$

6.3. Slijeđenje referentne vrijednosti napona generatora

Slijeđenje referentne vrijednosti napona generatora bit će ispitano za promjenu referentne veličine napona u iznosu ±5%. Početna radna točka je $U_{gref} = 1$, $P_{ref} = 0{,}5$, $cos\varphi = 0{,}8$ induktivno. Parametri IDA stabilizatora postavljeni su kako je prikazano u tablici 6.21. Referentna vrijednost napona generatora prikazana je plavom, a stvarni napon generatora crvenom bojom. Promjena referentne vrijednosti napona nastupa u 0,1 s simulacije. Odziv napona generatora na povećanje referentne vrijednosti prikazan je na slici 6.10, a odziv na smanjenje referentne vrijednosti prikazan je na slici 6.11.

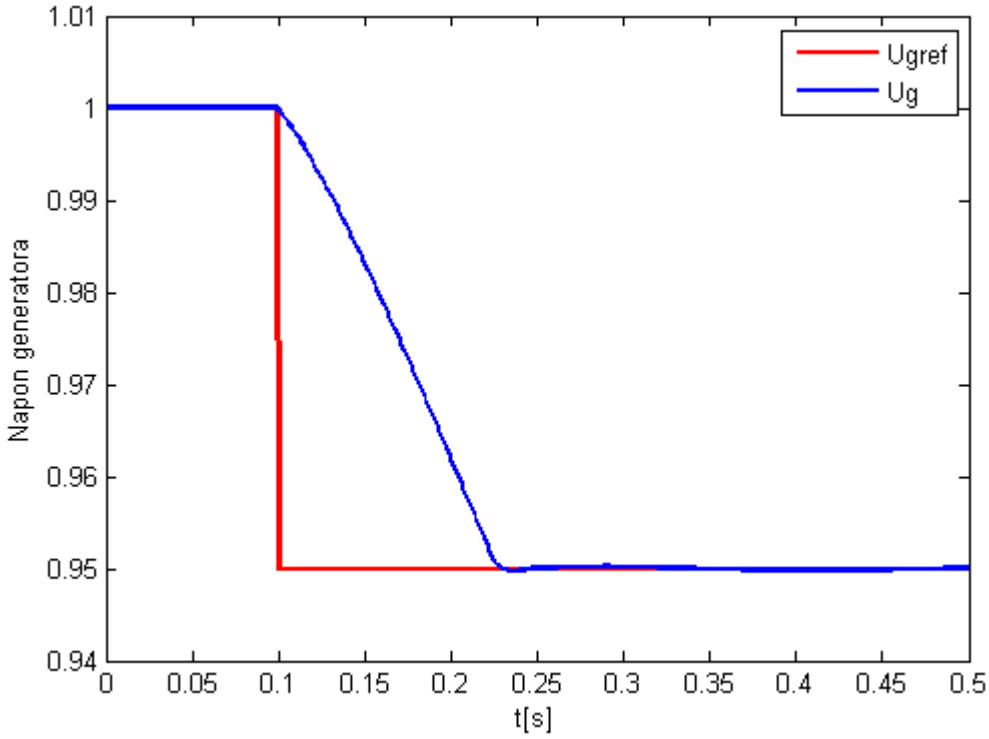
Tablica 6.21. Parametri IDA stabilizatora korišteni u simulaciji promjene referentne vrijednosti napona generatora

b'	α	k'
5	1	1



Slika 6.10. Odziv napona generatora na povećanje referentne vrijednosti

Iz odziva prikazanog na slici 6.10. je vidljivo da je postignuto slijeđenje referentne vrijednosti napona generatora. Promjenom referentne vrijednosti napona generatora sustav prelazi u novu stabilnu ravnotežnu točku je $U_{gref} = 1{,}05$, $P_{ref} = 0{,}5$.

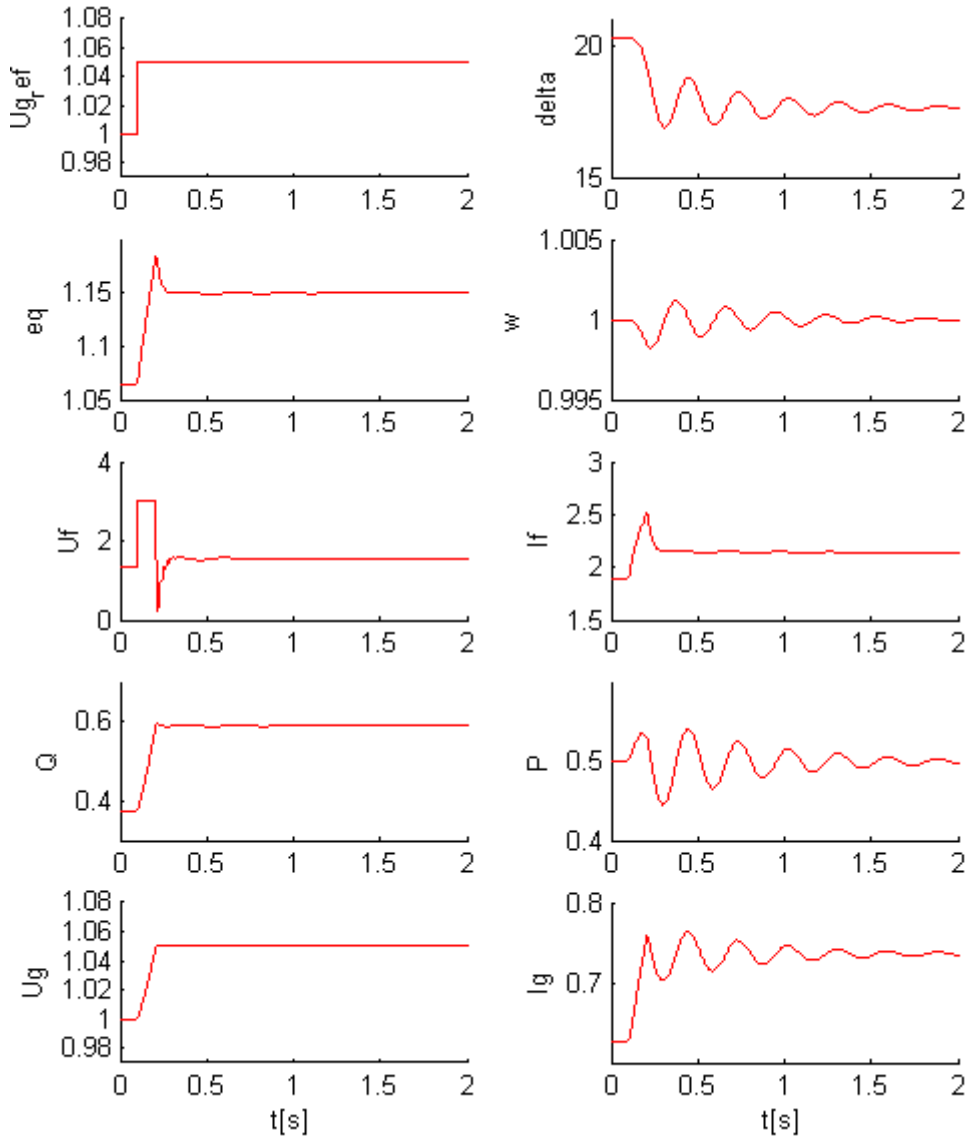


Slika 6.11. Odziv napona generatora na smanjenje referentne vrijednosti

Odziv napona generatora na slici 6.11. pokazuje da je slijeđenje referentne vrijednosti napona generatora postignuto i za smanjenje napona generatora, odnosno poduzbudni režim rada. Time je dokazano da je u IDA stabilizator elektromehaničkih njihanja uspješno integrirana funkcionalnost automatskog regulatora napona.

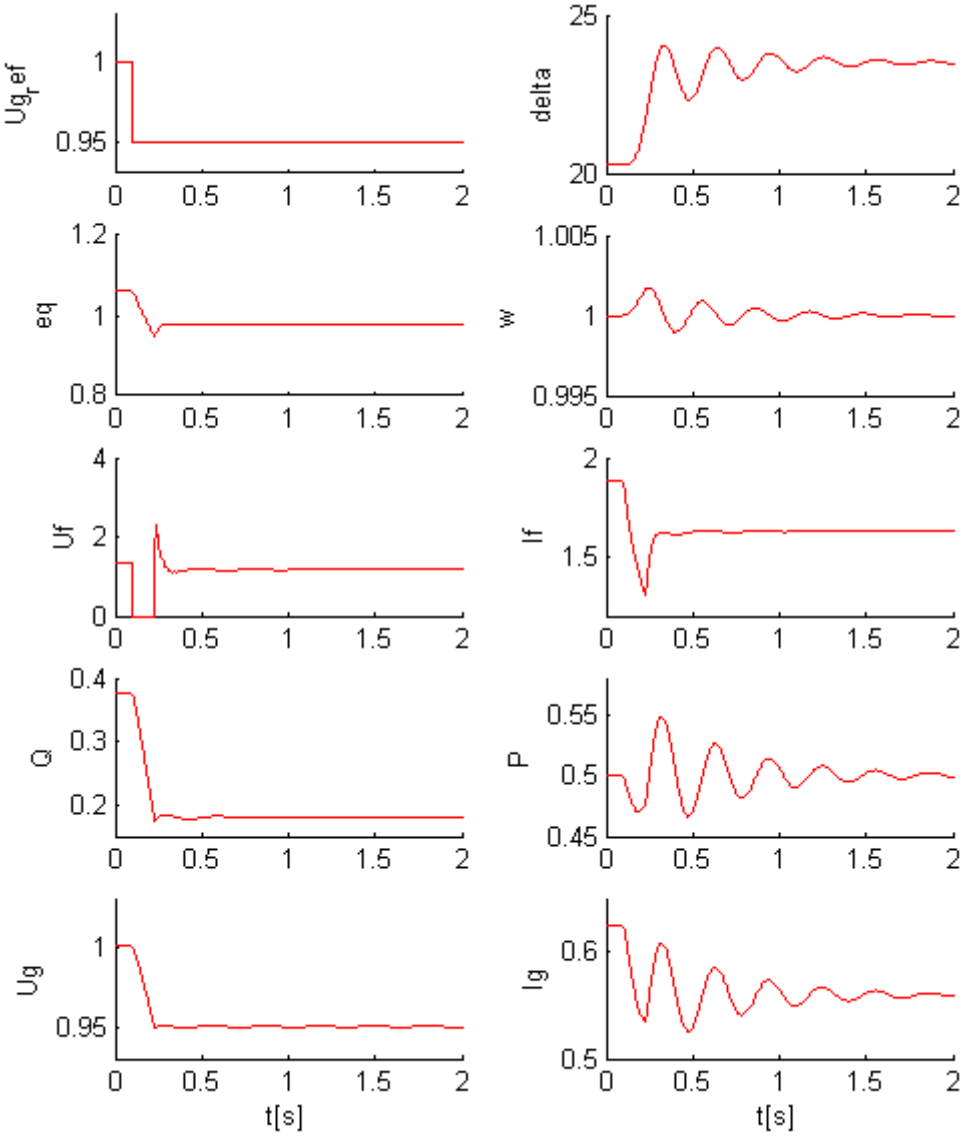
Na slikama 6.12. i 6.13. prikazani su odzivi svih promatranih veličina generatora u slučaju povećanja, odnosno smanjenja referentne vrijednosti napona. Vrijeme simulacije povećano je na 2 s, jer su mehaničke prijelazne pojave sporije od električkih.

Iz slike 6.12. vidljivo je da se povećanjem armaturnog napona generatora povećava jalova snaga koju generator predaje u mrežu. Kako jalova snaga raste, a djelatna snaga ostaje jednaka, pada i faktor snage, tj. povećava se kut φ. Stoga se povećava amplituda struje, ali i njeno fazno zaostajanje za naponom mreže, što znači da je došlo do povećanja njezine induktivne komponente. Prema dijagramu 3.3. vidljivo je da povećanje faznog zaostajanja struje dovodi do smanjenja kuta opterećenja generatora.



Slika 6.12. Povećanje referentnog napona generatora za 5%.

Na slici 6.13. dan je odziv sustava na smanjenje referentnog napona generatora. Iz početne radne točke nakon prijelazne pojave generator se stabilizira u zadanoj radnoj točki $U_{gref} = 0{,}95$, $P_{ref} = 0{,}5$. Smanjenjem napona generatora pada i jalova snaga te struja na izlazu generatora, a kut opterećenja pri tome raste.

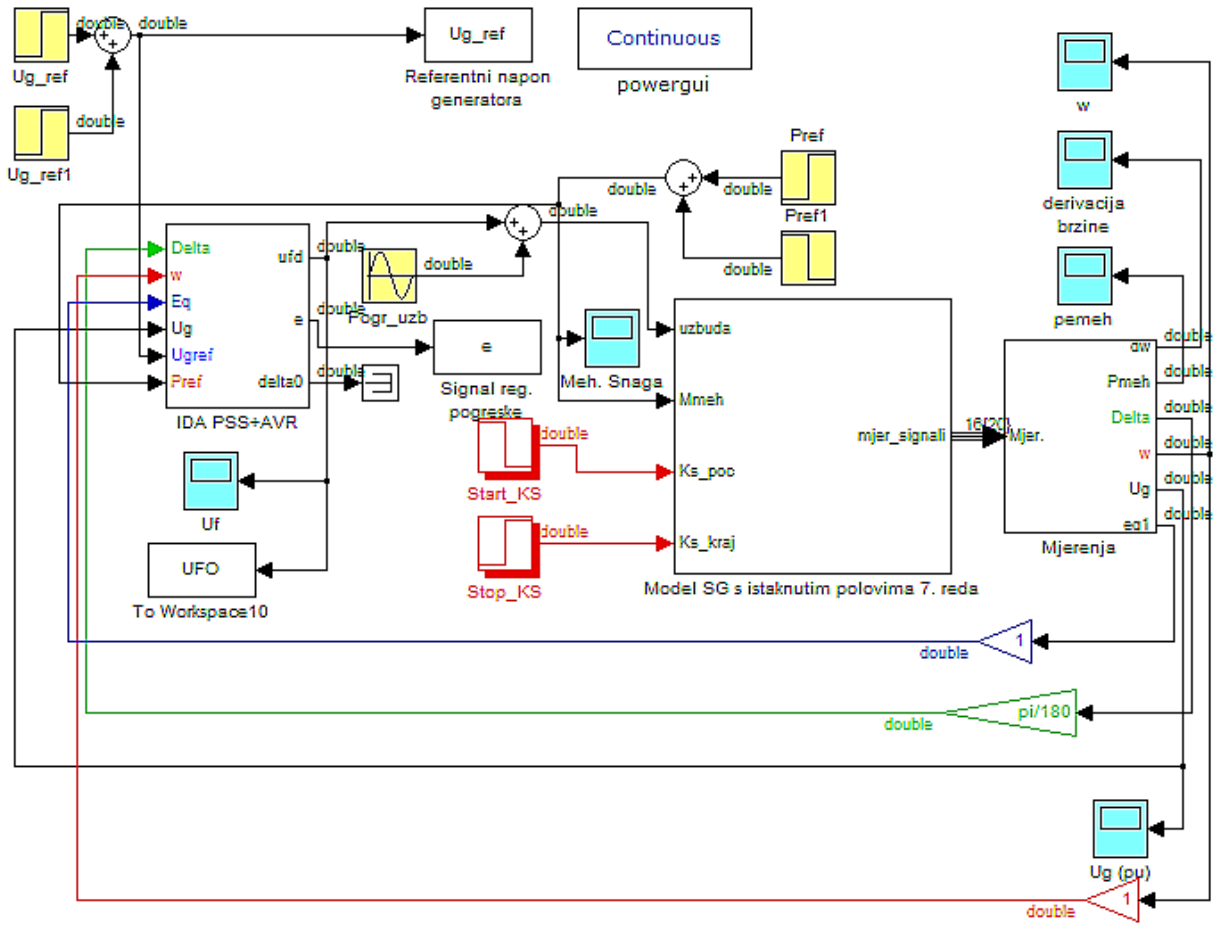


Slika 6.13. Smanjenje referentnog napona generatora za 5%.

6.4. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora u širem frekvencijskom području

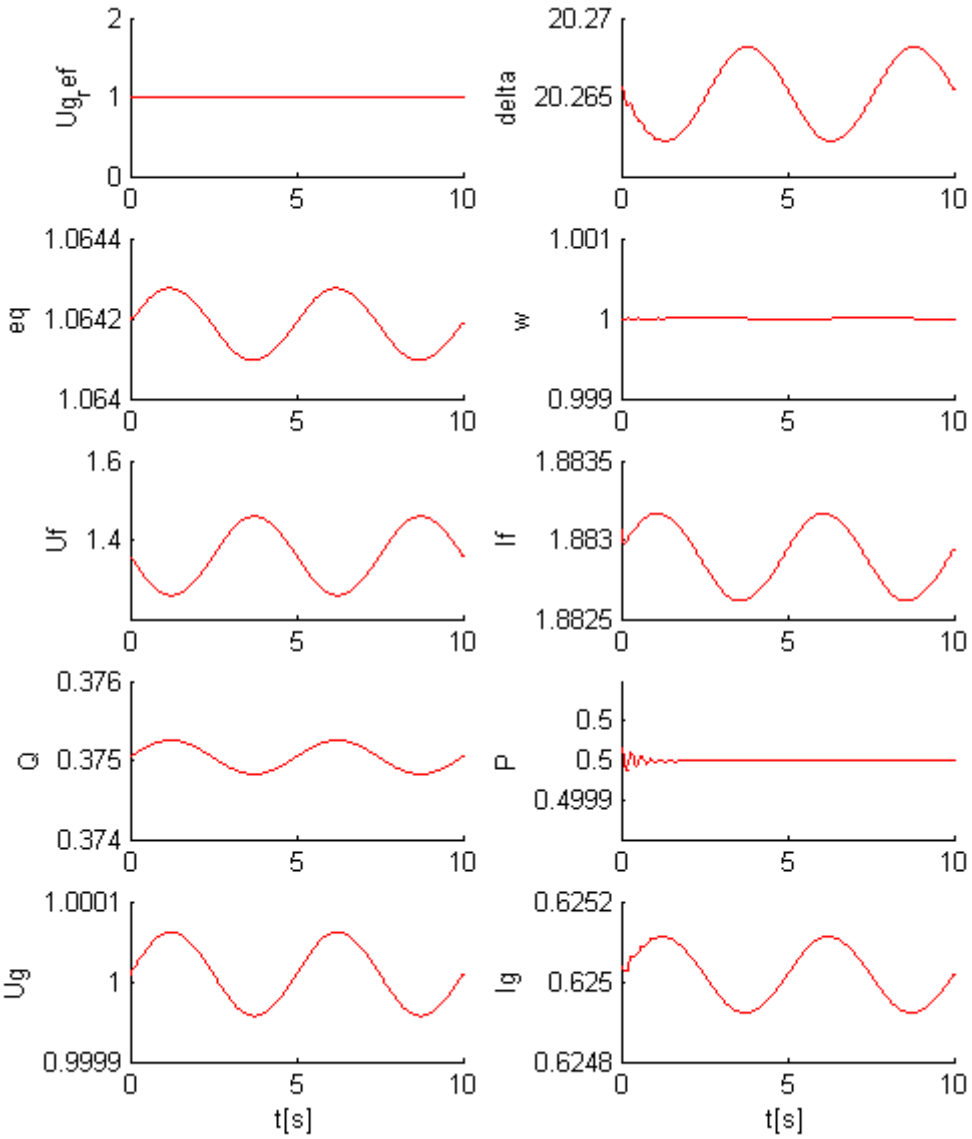
Raspon frekvencija od 0.2 do 3 Hz karakterističan je za elektromehanička njihanja u elektroenergetskom sustavu. S obzirom da je upravljački algoritam izveden u ovoj disertaciji prvenstveno stabilizator elektromehaničkih njihanja, potrebno je provjeriti stabilnost sustava u rasponu navedenih karakterističnih frekvencija. Elektromehanička njihanja se pojavljuju sa strane električne mreže. Međutim, u ispitivanom modelu generatora simuliran je spoj na krutu mrežu preko ekvivalentne impedancije X_e koja objedinjuje impedanciju vodova i blok transformatora između generatora i mreže. Kako nije moguće simulirati njihanja u mreži, ovdje će biti dani odzivi sustava u slučaju poremećaja u naponu uzbude navedenih frekvencija.

Za simulaciju poremećaja u naponu uzbude u simulacijski model dodan je sinusni izvor „Pogr_uzb“, kako je to prikazano na slici 6.14. Amplituda sinusnog poremećaja postavljena je na 0,1 rj, a frekvencija se mijenja unutar karakterističnog raspona.



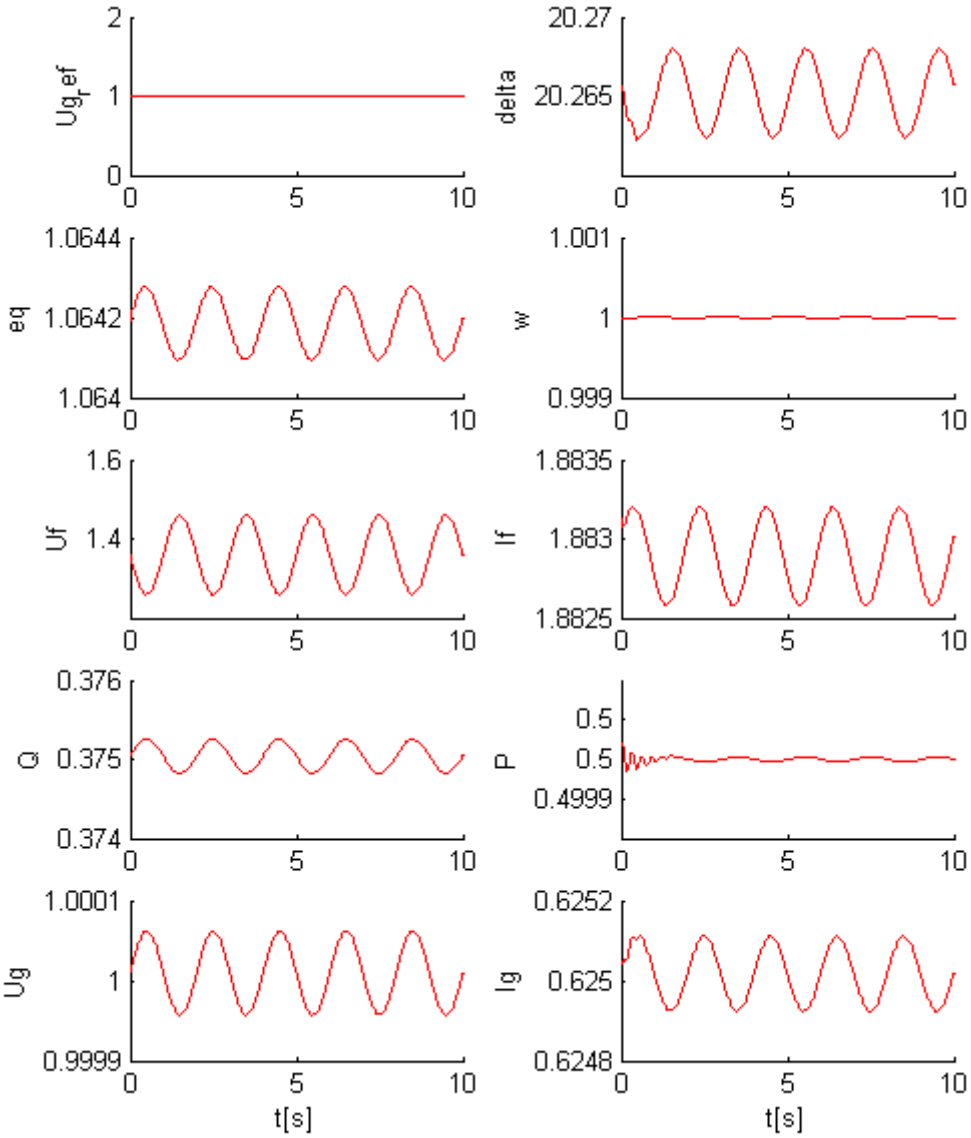
Slika 6.14. Dodavanje sinusnog poremećaja naponu uzbude

Simulacijski odzivi za frekvenciju poremećaja uzbude 0,2 Hz prikazani su na slici 6.15. Zbog niske frekvencije promatranog poremećaja vrijeme simulacije postavljeno je na 10 s.



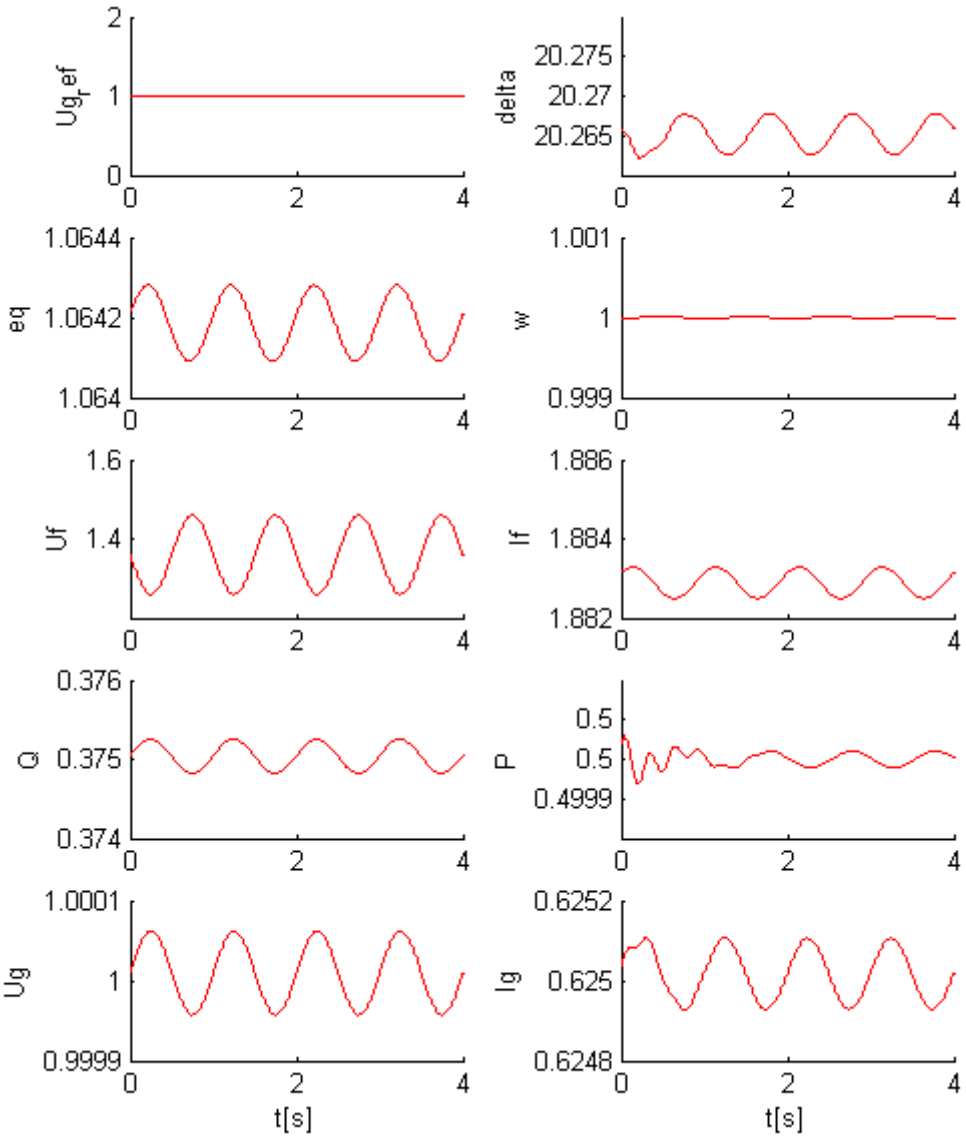
Slika 6.15. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 0,2 Hz

Simulacijski odzivi za frekvenciju poremećaja uzbude 0,5 Hz prikazani su na slici 6.16. Vrijeme simulacije postavljeno je na 10 s.



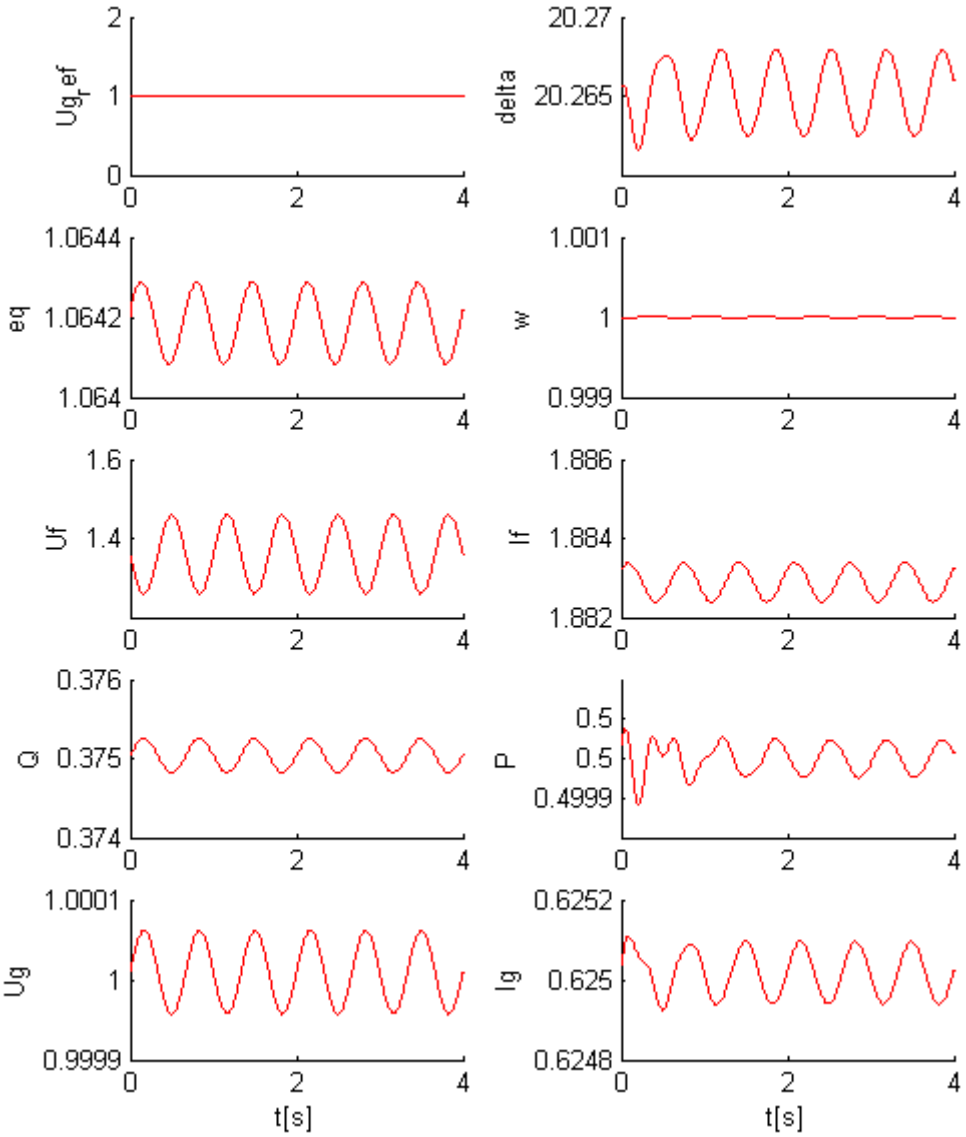
Slika 6.16. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 0,5 Hz

Simulacijski odzivi za frekvenciju poremećaja uzbude 1 Hz prikazani su na slici 6.17. Vrijeme simulacije postavljeno je na 4 s.



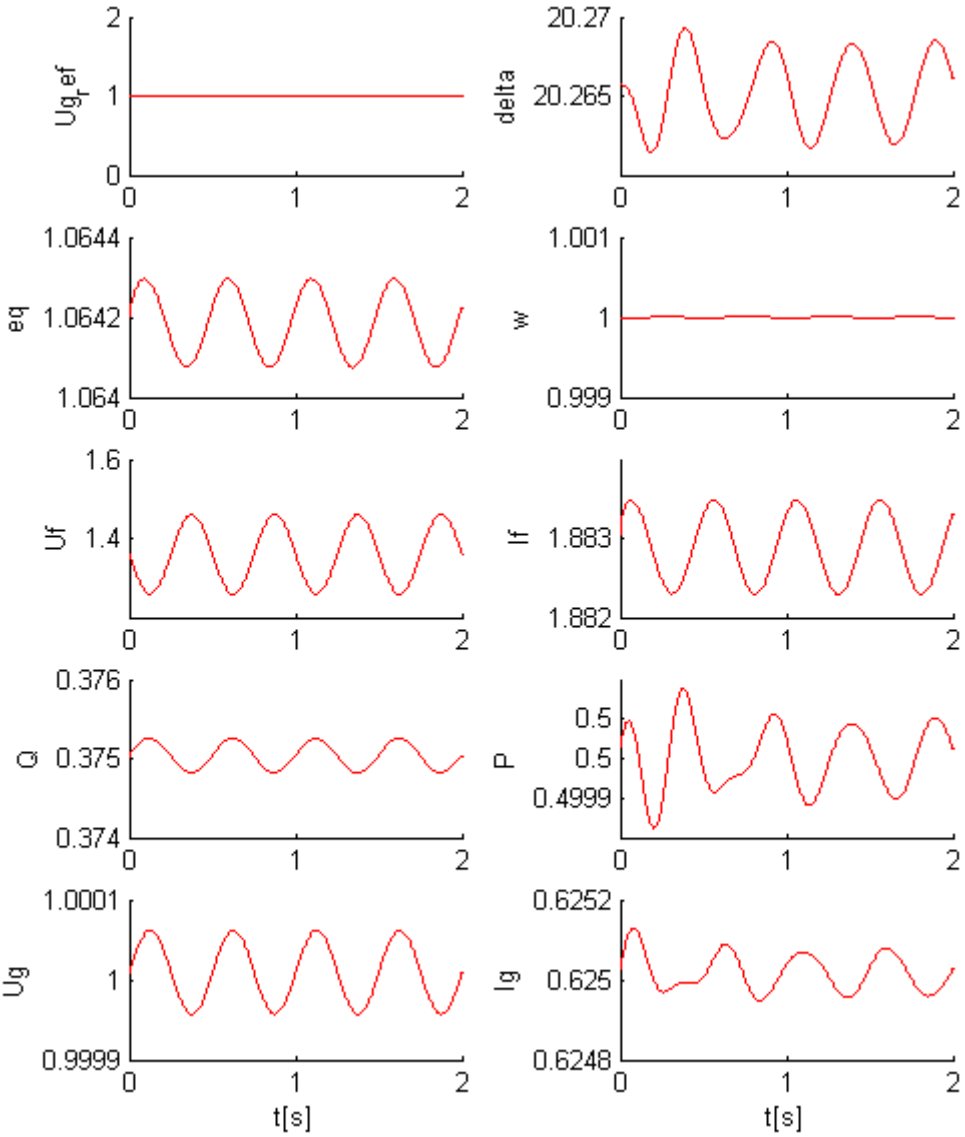
Slika 6.17. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 1 Hz

Simulacijski odzivi za frekvenciju poremećaja uzbude 1.5 Hz prikazani su na slici 6.18. Vrijeme simulacije postavljeno je na 4 s.



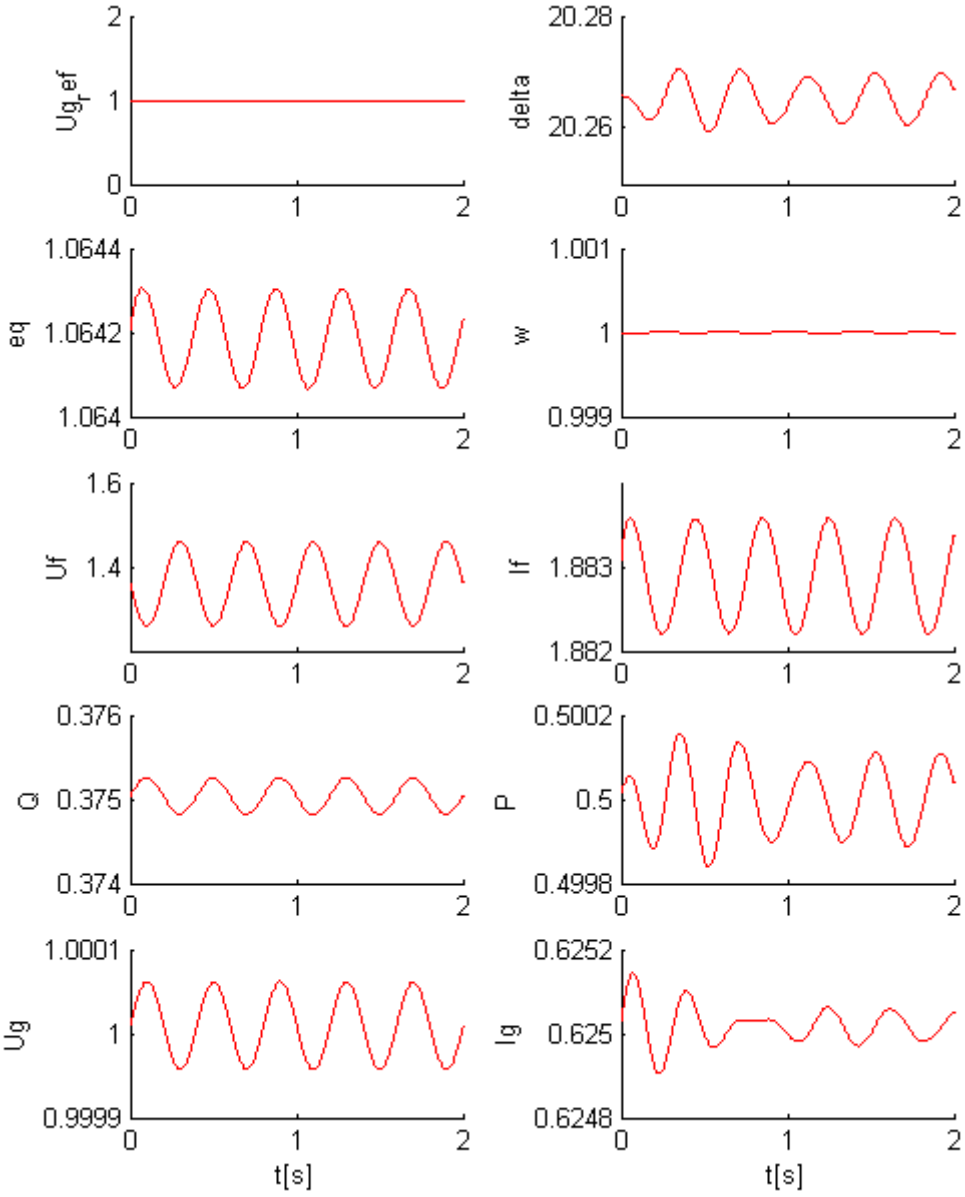
Slika 6.18. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 1,5 Hz

Simulacijski odzivi za frekvenciju poremećaja uzbude 2 Hz prikazani su na slici 6.19. Vrijeme simulacije postavljeno je na 2 s.



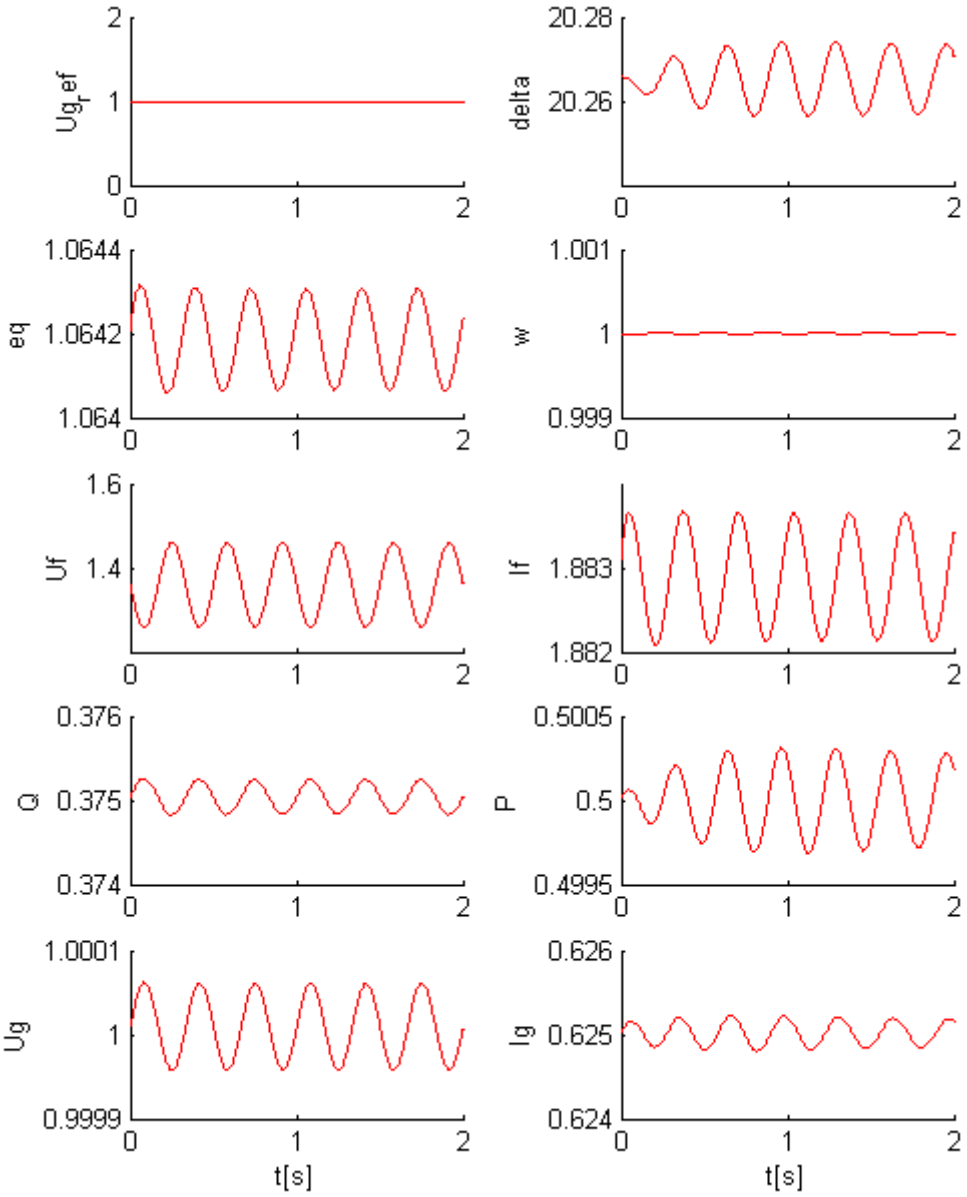
Slika 6.19. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 2 Hz

Simulacijski odzivi za frekvenciju poremećaja uzbude 2,5 Hz prikazani su na slici 6.20. Vrijeme simulacije postavljeno je na 2 s.



Slika 6.20. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 2,5 Hz

Simulacijski odzivi za frekvenciju poremećaja uzbude 3 Hz prikazani su na slici 6.21. Vrijeme simulacije postavljeno je na 2 s.



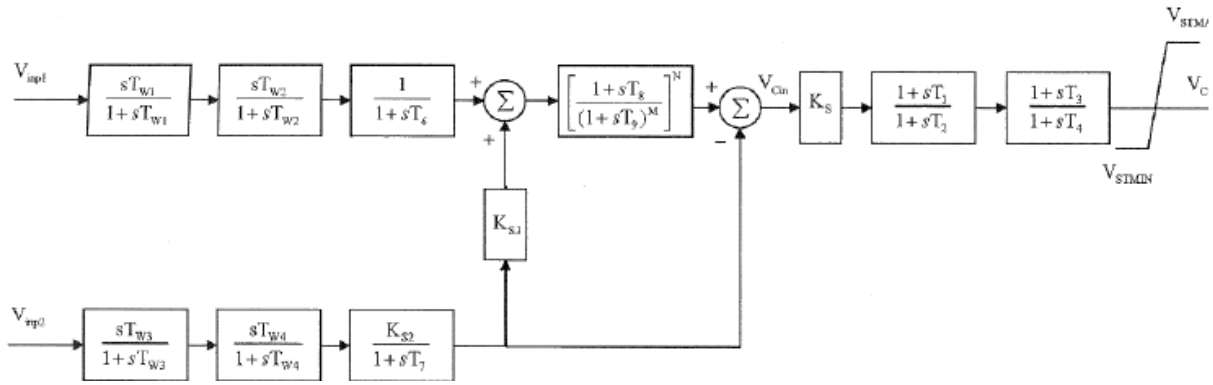
Slika 6.21. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 3 Hz

Odzivi prikazani na slikama 6.15. do 6.21. pokazuju da se oscilacije uzrokovane poremećajem u naponu uzbude pojavljuju i u ostalim mjerenim veličinama generatora, ali su značajno prigušene. Poremećaj napona uzbude amplitude 10% nazivne vrijednosti uzbudnog napona izaziva pogrešku armaturnog napona generatora manju od 10‰. Izazvano njihanje kuta opterećenja mjeri se u stotinkama stupnja, a utjecaj poremećaja na brzinu vrtnje generatora je neznatan. Ipak, moguće je primijetiti da se s povećanjem frekvencije poremećaja napona uzbude povećava i njihanje djelatne snage generatora. Tako je njihanje djelatne snage

generatora u slučaju poremećaja frekvencije 0,2 Hz neznatno, dok za 3 Hz njihanje postaje vidljivo, ali i dalje u prihvatljivim granicama. Njihanje jalove snage prati njihanje armaturnog napona generatora i ne mijenja se s promjenom frekvencije poremećaja uzbudnog napona. Ovime je također pokazana robusnost IDA stabilizatora s obzirom na poremećaj uzbude konstante frekvencije.

6.5. Usporedba kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja i klasičnog regulatora

Kvalitetu regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja potrebno je usporediti s kvalitetom regulacije linearnog regulatora i stabilizatora elektromehaničkih njihanja. Za usporedbu kvalitete regulacije bit će korišten linearni PI regulator napona generatora i stabilizator elektromehaničkih njihanja PSS2A. PSS2A prikazan na slici 6.22. opisan je u [4, 69]. Ovaj stabilizator ima dva ulaza, mehaničku snagu te brzinu vrtnje ili frekvenciju generatora. Ovakav stabilizator sastoji se od nekoliko visokopropusnih filtara (*engl*. wash-out), definiranih vremenskim konstantama $T_{w1} \dots T_{w4}$, koji služe za eliminaciju istosmjerne komponente. Bez postavljanja ovakvih filtara stabilizator elektromehaničkih njihanja mogao bi djelovati i u novom stacionarnom stanju, što ne bi bilo povoljno. Nakon propuštanja kroz visokopropusne filtre oba signala je moguće derivirati, što se određuje vremenskim konstantama T_6 i T_7. Nakon zbrajanja utjecaja oba ulaza, signal se dovodi na niskopropusni filtar definiran konstantama T_8 i T_9. Na kraju se dodaje pojačanje stabilizatora K_{s1} i mogućnost fazne kompenzacije, koja se određuje vremenskim konstantama $T_1 \dots T_4$. Na izlazu stabilizatora moguće je postaviti ograničenje utjecaja stabilizatora na regulacijski signal. U novijim IEEE standardima umjesto PSS2A pojavljuje se stabilizator PSS2B, koji ima dodatni element za faznu kompenzaciju na izlazu stabilizatora. Ovisno o izabranoj uporabi, parametriraju se pojedini dijelovi stabilizatora. Parametriranje stabilizatora PSS2A je detaljno objašnjeno u [69], odakle su preuzeti parametri korišteni u simulaciji prikazani u tablici 6.22.

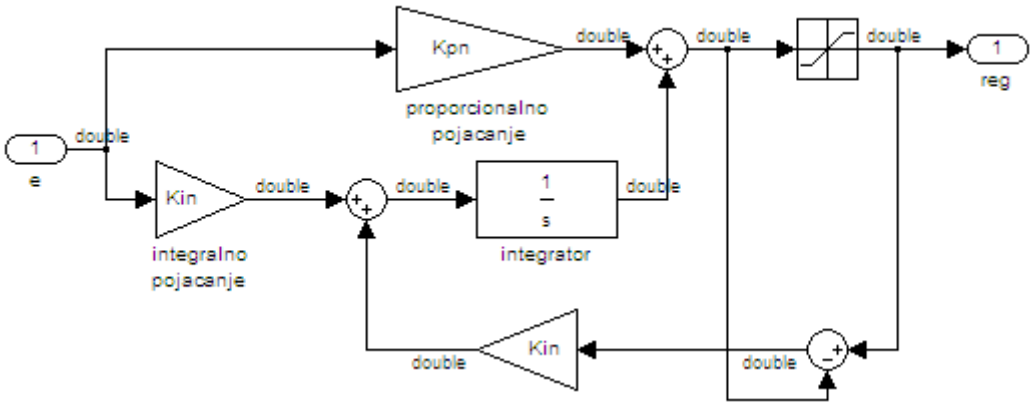


Slika 6.22. Stabilizator elektromehaničkih njihanja PSS2A [71]

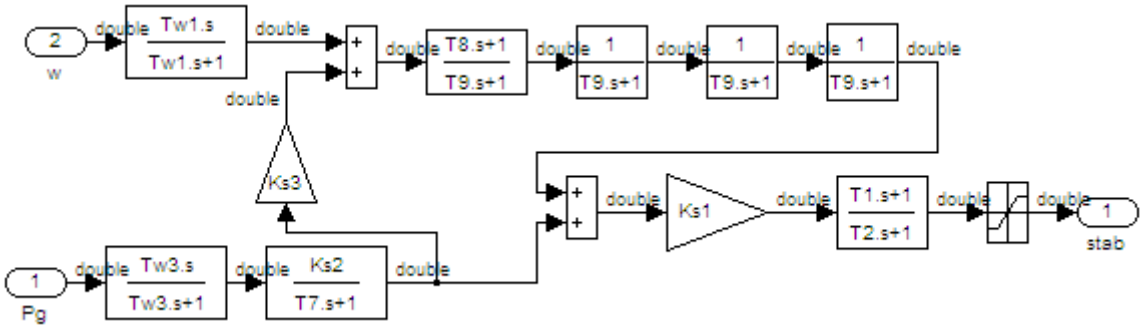
Tablica 6.22. Parametri stabilizatora PSS2A i PI regulatora napona[69]

T_{w1}	T_{w2}	T_{w3}	T_{w4}	T_6	T_7	K_{S2}	K_{S3}	T_8
1	0	1	0	0	1	0,58	1	0,2
T_9	K_{S1}	T_1	T_2	T_3	T_4	v_{s_lim}	K_P	K_I
0,05	5	0,3	0,05	0	0	±0,2	10	10

Parametri PI regulatora napona prikazani su u također u tablici 6.21. PI regulator napona modeliran je tako da je zasićenje integralnog člana onemogućeno (*engl.* antiwindup) i prikazan je na slici 6.23. Model stabilizatora PSS2A prikazan je na slici 6.24.



Slika 6.23. PI regulator napona sa zaštitom od zasićenja integralnog člana



Slika 6.24. Simulacijski model PSS2A

6.5.1. Odziv sustava na skokovitu promjenu referentne vrijednosti napona generatora

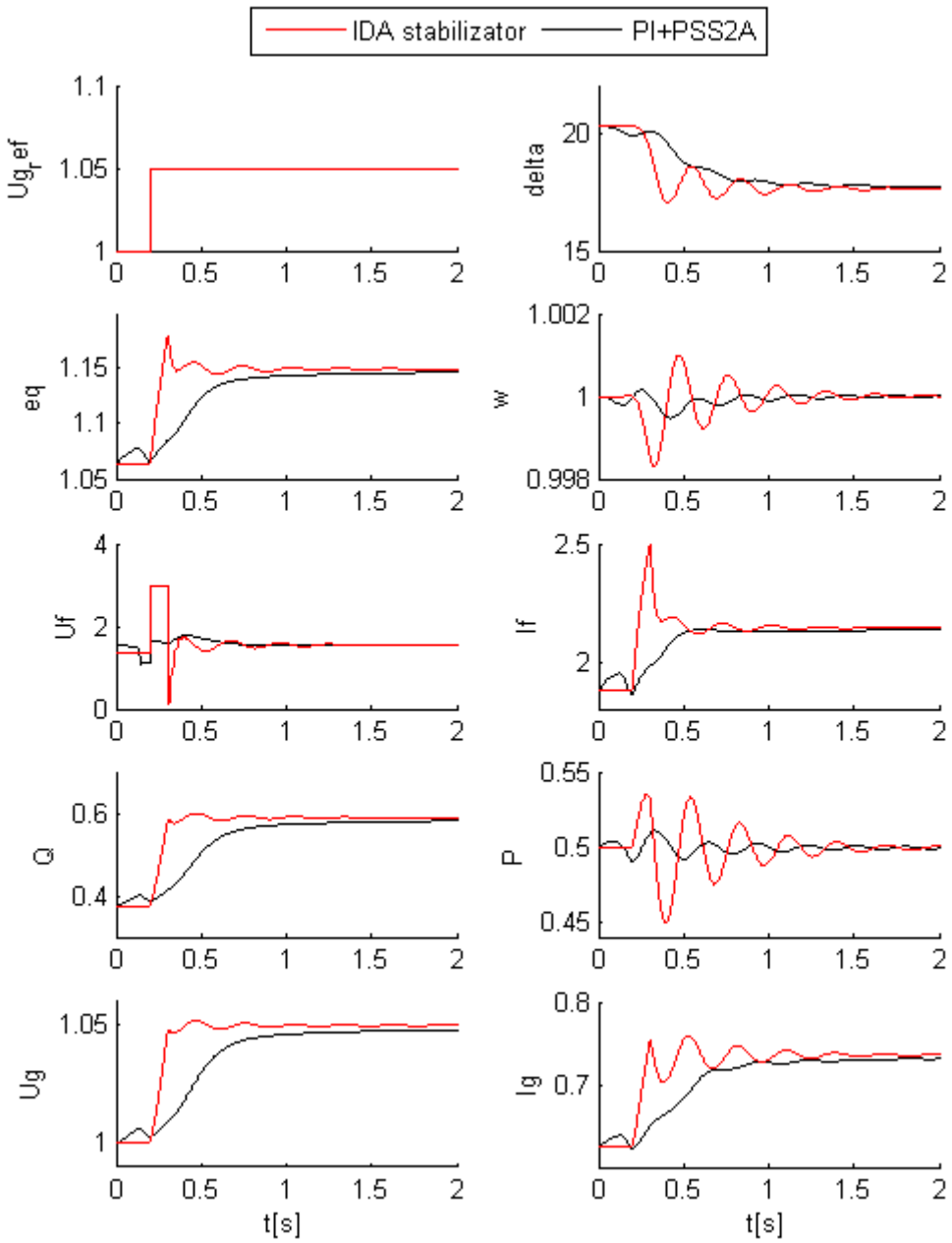
Usporedba kvalitete odziva na skokovitu promjenu vrijednosti napona generatora sustava s implementiranim IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja i sustava s klasičnim linearnim regulatorima bit će dana na sljedećim slikama i analizirana u tablicama. Kako bi se dobio dobar uvid u kvalitetu regulacije pojedinih regulatora, simulacije će biti provedene za četiri slučaja:

- povećanje referentne vrijednosti napona za 5% u induktivnom režimu rada
- smanjenje referentne vrijednosti napona za 5% u induktivnom režimu rada
- povećanje referentne vrijednosti napona za 5% u kapacitivnom režimu rada
- smanjenje referentne vrijednosti napona za 5% u kapacitivnom režimu rada

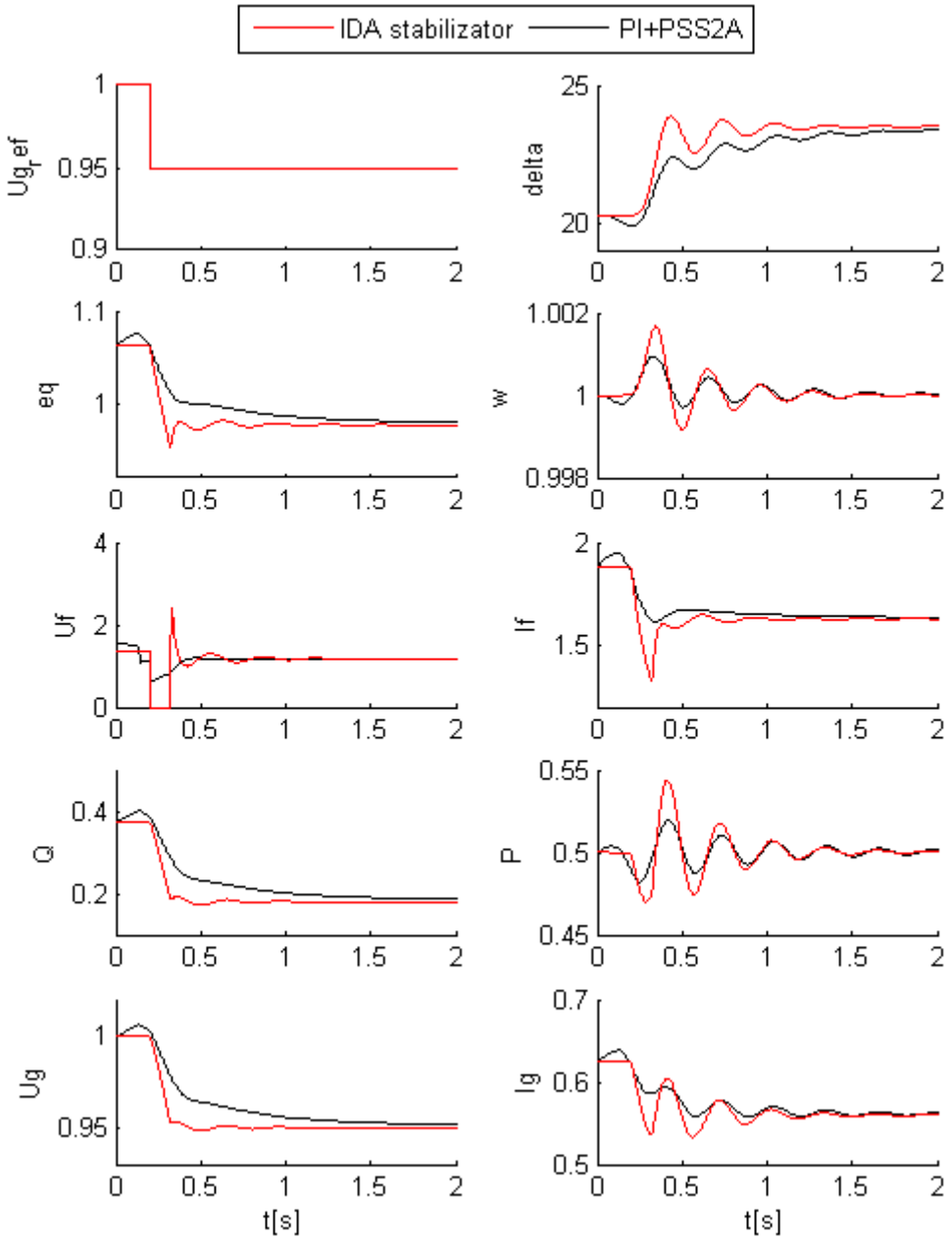
Početni napon generatora u sva četiri slučaja jednak je 1 rj, a mehanička snaga je konstantna i iznosi 0,5 rj. Faktor snage iznosi 0,8 i pozitivan je u induktivnom, a negativan u kapacitivnom režimu rada. Parametri linearnih regulatora su postavljeni prema tablici 6.22. Kako bi se postiglo veće prigušenje elektromehaničkih njihanja, parametri IDA stabilizatora postavljeni su prema tablici 6.23.

Tablica 6.23. Parametri IDA stabilizatora korišteni u simulaciji

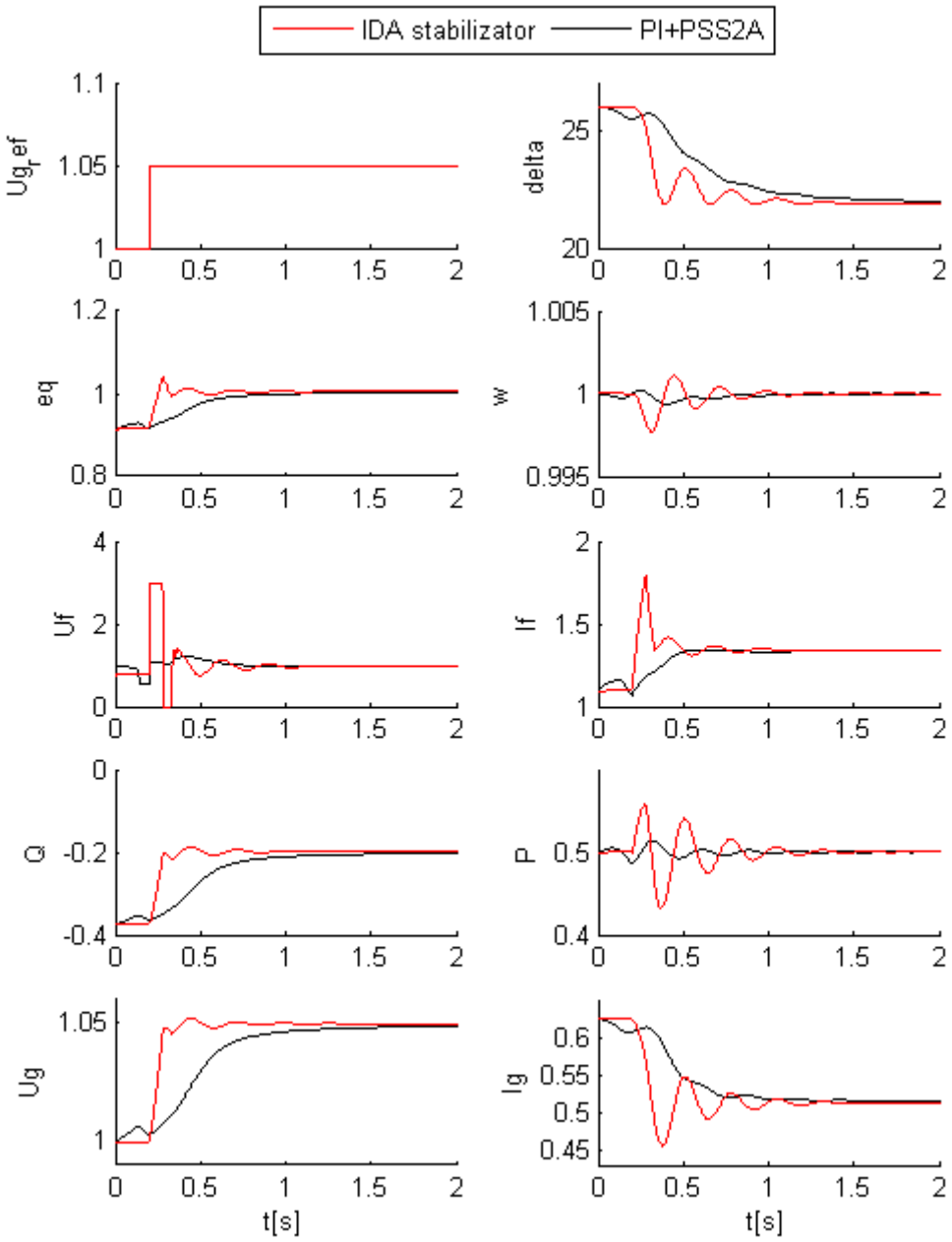
b'	α	k'
5	10	5



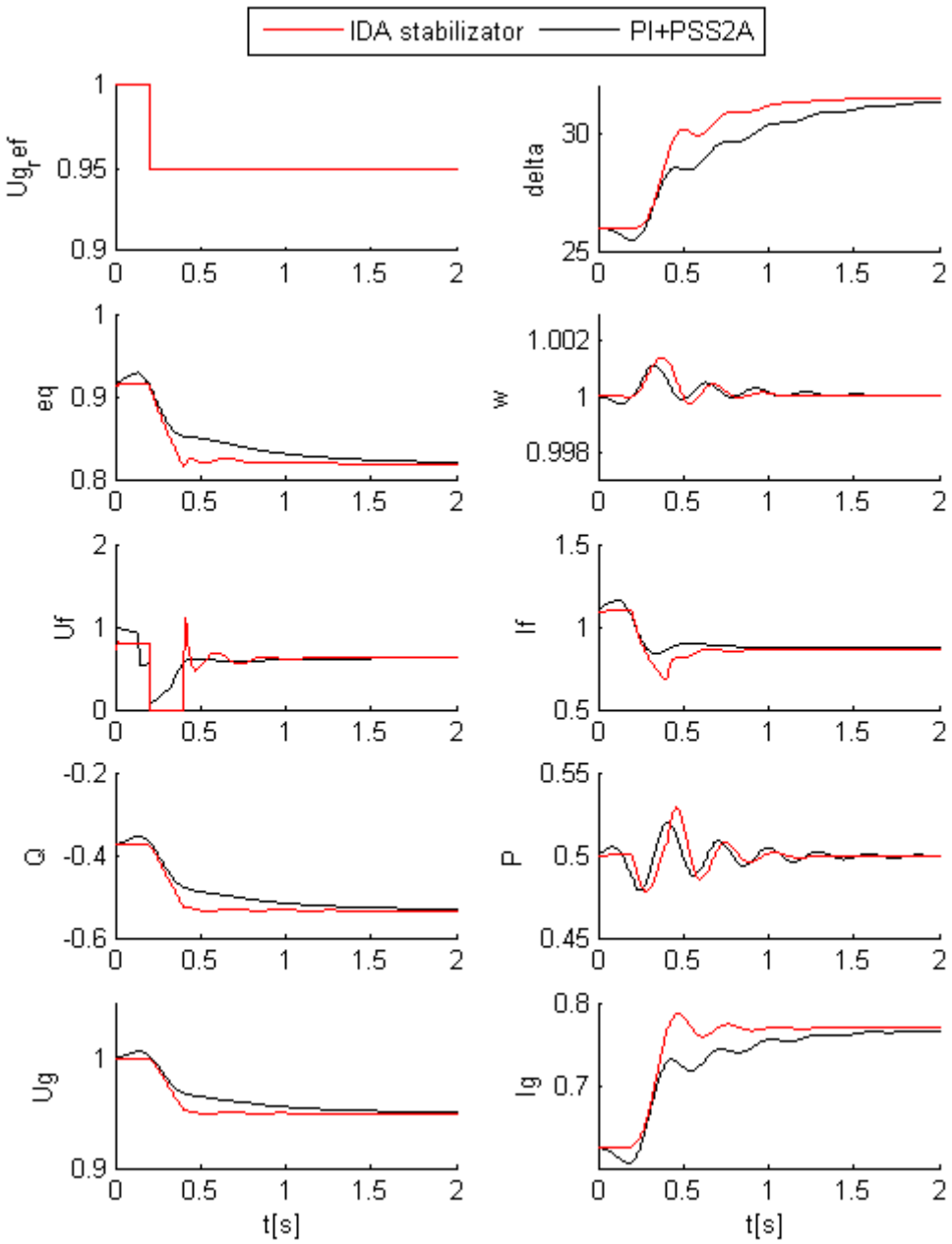
Slika 6.25. Povećanje referentne vrijednosti napona za 5%, induktivni režim rada



Slika 6.26. Smanjenje referentne vrijednosti napona za 5%, induktivni režim rada



Slika 6.27. Povećanje referentne vrijednosti napona za 5%, kapacitivni režim rada



Slika 6.28. Smanjenje referentne vrijednosti napona za 5%, kapacitivni režim rada

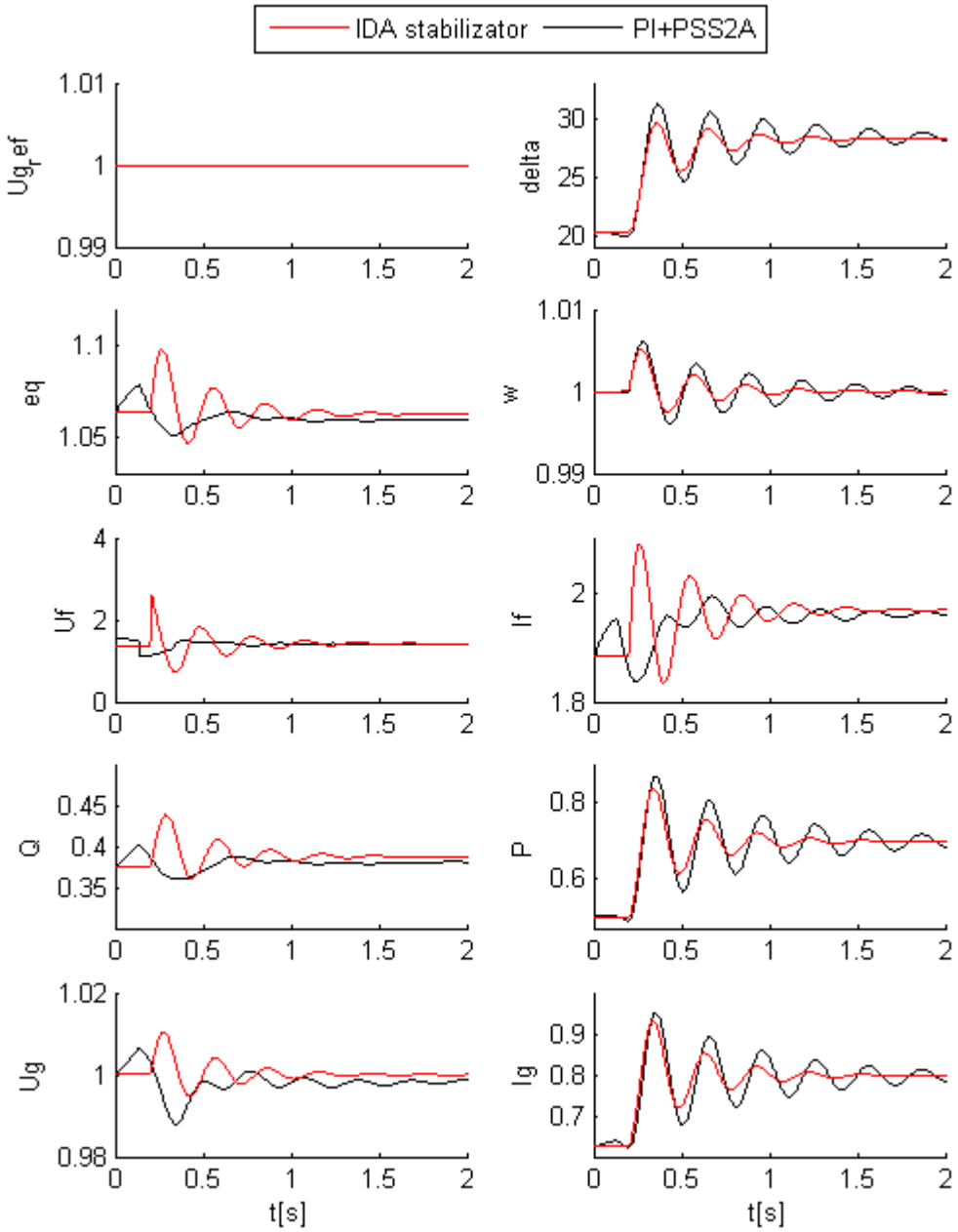
Iz odziva prikazanih na slikama 6.25 do 6.28 vidljivo je da klasični linearni regulatori daju bolje prigušenje elektromehaničkih njihanja, dok se referentna vrijednost napona postiže brže primjenom IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja. Ovakav rezultat je očekivan, jer je riječ o maloj promjeni radne točke generatora.

6.5.2. Odziv sustava na promjenu mehaničke snage turbine

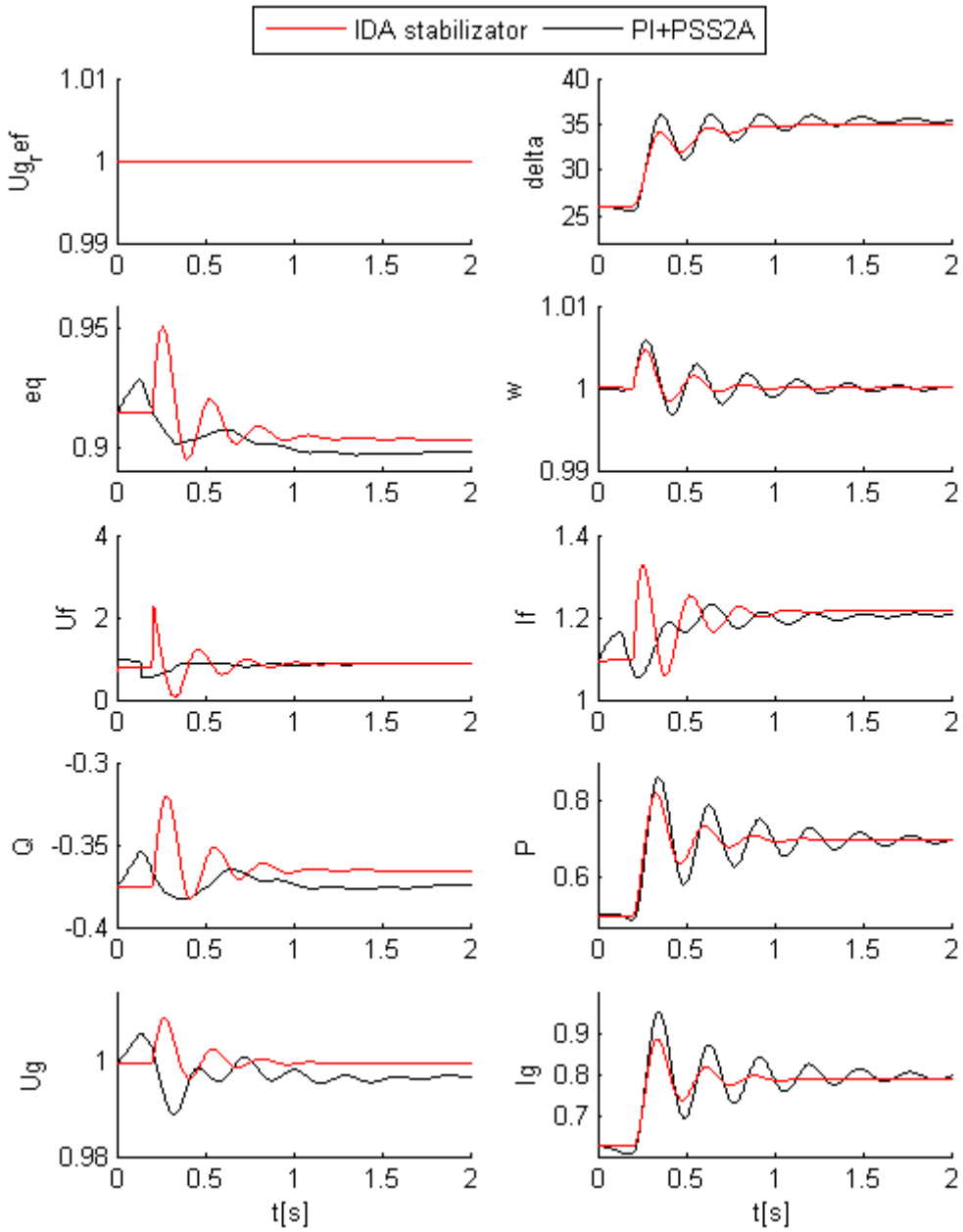
Iako je u praksi nemoguća skokovita promjena mehaničke snage na osovini generatora, u simulaciji će ipak biti korištena, jer je kvalitetu regulacije najjednostavnije procijeniti iz odziva na skokovitu pobudu. U praksi je brzina vrtnje i mehanička snaga svakog pogonskog stroja regulirana turbinskim regulatorom koji je u simulaciji također izostavljen, kako bi se mogao neovisno promatrati utjecaj regulatora u uzbudnom krugu na prigušenja elektromehaničkih njihanja.

Simuliran je odziv sustava prilikom skoka mehaničke snage s 0.5 na 0.7 rj u induktivnom (Sl. 6.29.) i kapacitivnom (Sl. 6.30.) režimu rada. Referentni napon generatora je jednak 1 rj, a iznos faktora snage je 0,8. Parametri linearnih regulatora su postavljeni prema tablici 6.22, a parametri IDA stabilizatora postavljeni su prema tablici 6.23.

Rezultati simulacije pokazuju da IDA stabilizator bolje prigušuje elektromehanička njihanja u odnosu na stabilizator PSS2A. Također je vidljivo da primjenom nelinearnog IDA stabilizatora dolazi do manjih oscilacija u armaturnom naponu generatora prilikom skokovite promjene mehaničke snage na osovini generatora. Osim većeg prigušenja elektromehaničkih njihanja, vidljivo je da sustav s IDA stabilizatorom značajno brže doseže novo stacionarno stanje.



Slika 6.29. Povećanje mehaničke snage s 0,5 na 0,7 rj, induktivni režim rada



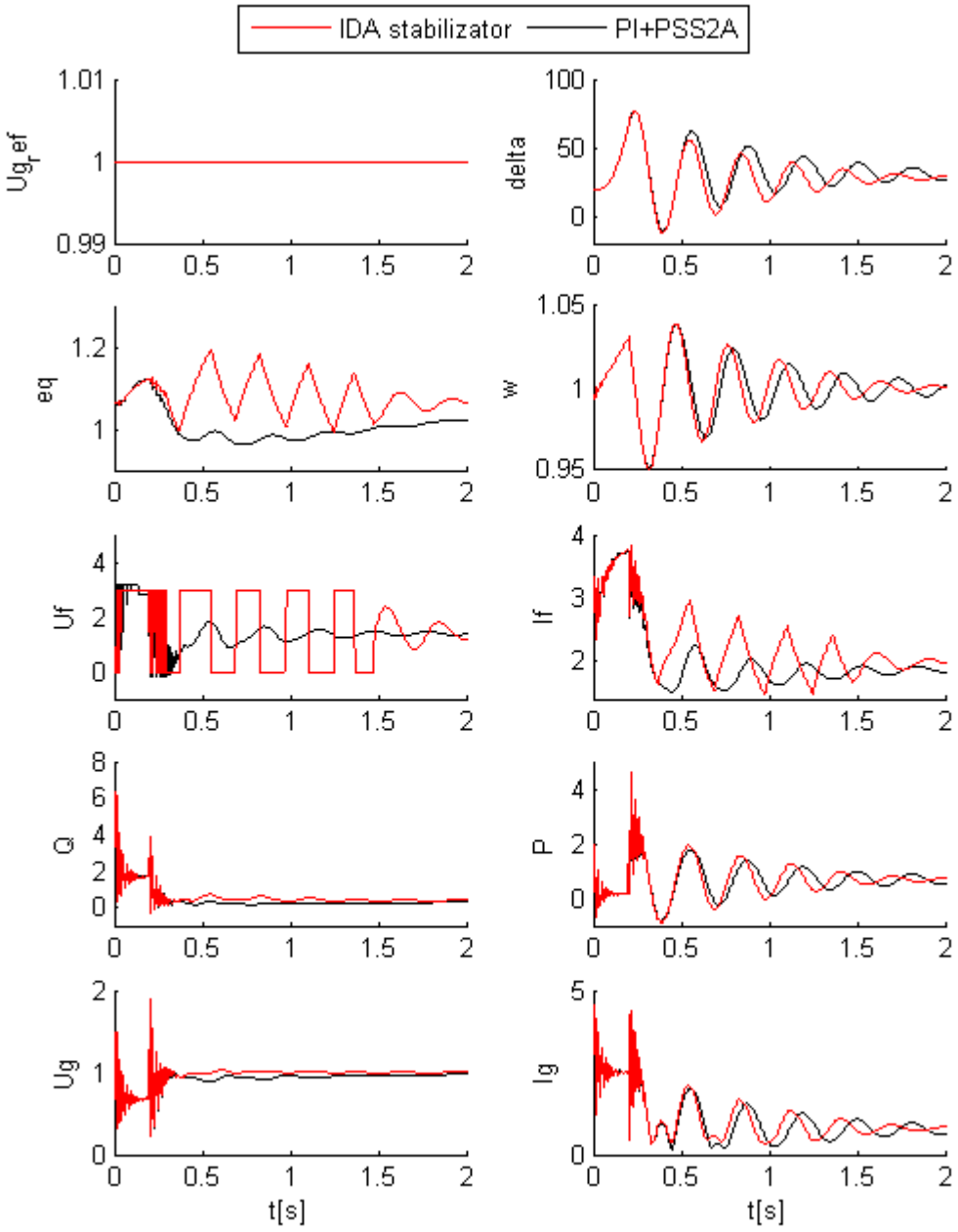
Slika 6.30. Povećanje mehaničke snage s 0,5 na 0,7 rj, kapacitivni režim rada

6.5.3. Odziv sustava u slučaju kratkog spoja na sabirnici generatora

Kratki spoj na sabirnici generatora predstavlja veliki poremećaj jer se tijekom trajanja kratkog spoja radna točka generatora značajno udaljava od stacionarnog stanja. Kako bi se usporedila kvaliteta regulacije linearnih regulatora i IDA stabilizatora prilikom kratkog spoja, načinjene su simulacije za sljedeća četiri slučaja:

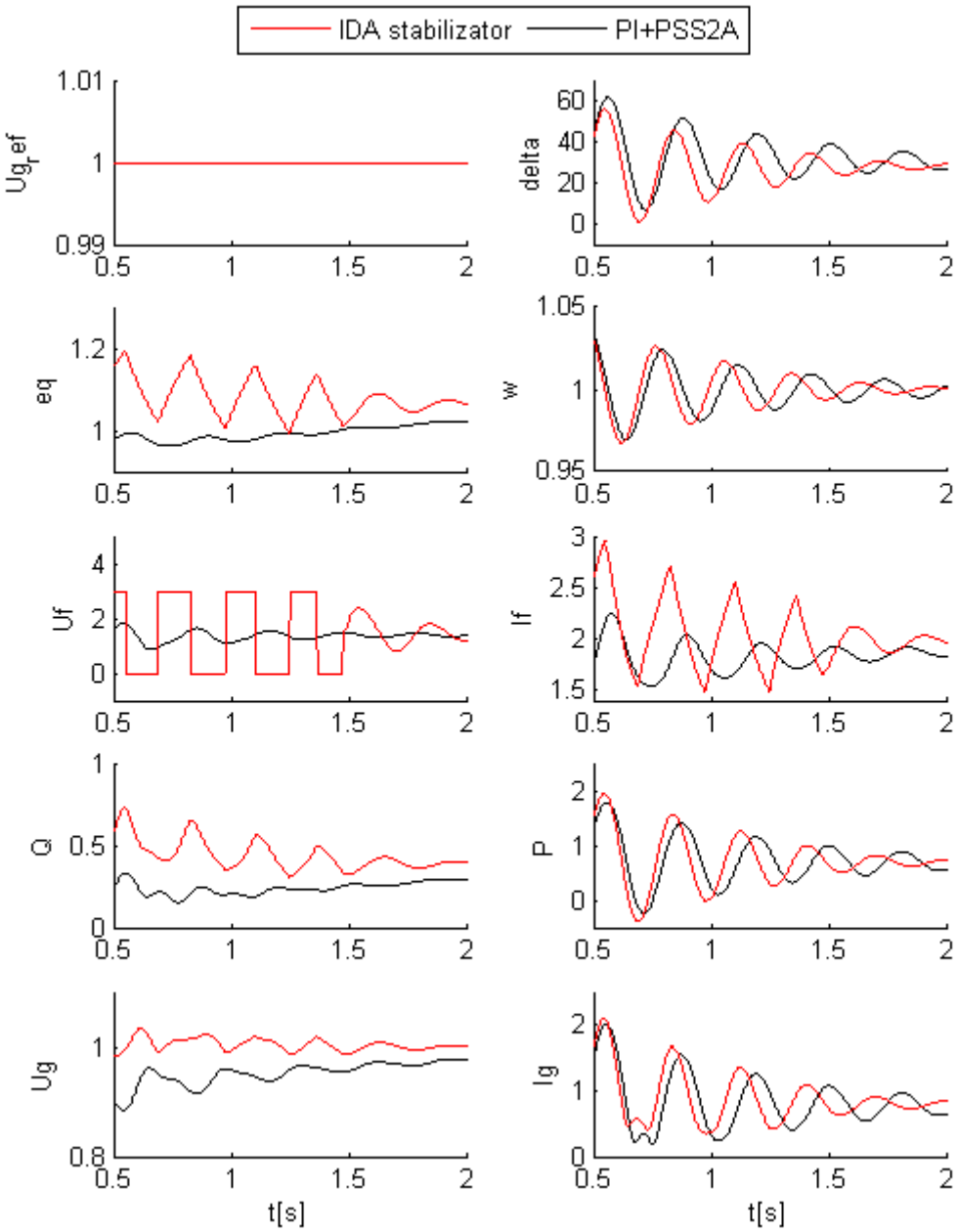
- kratki spoj na sabirnici generatora u trajanju 200 ms, induktivni režim rada
- kratki spoj na sabirnici generatora u trajanju 200 ms, kapacitivni režim rada
- kratki spoj na sabirnici generatora u trajanju 280 ms, induktivni režim rada
- kratki spoj na sabirnici generatora u trajanju 267 ms, kapacitivni režim rada

Referentna vrijednost armaturnog napona generatora je 1 rj, a iznos faktora snage 0,8. Početna djelatna snaga generatora je 0,5 rj, a početna jalova snaga iznosi 0,375 rj. Parametri linearnih regulatora su postavljeni prema tablici 6.22, a parametri IDA stabilizatora postavljeni su prema tablici 6.23.

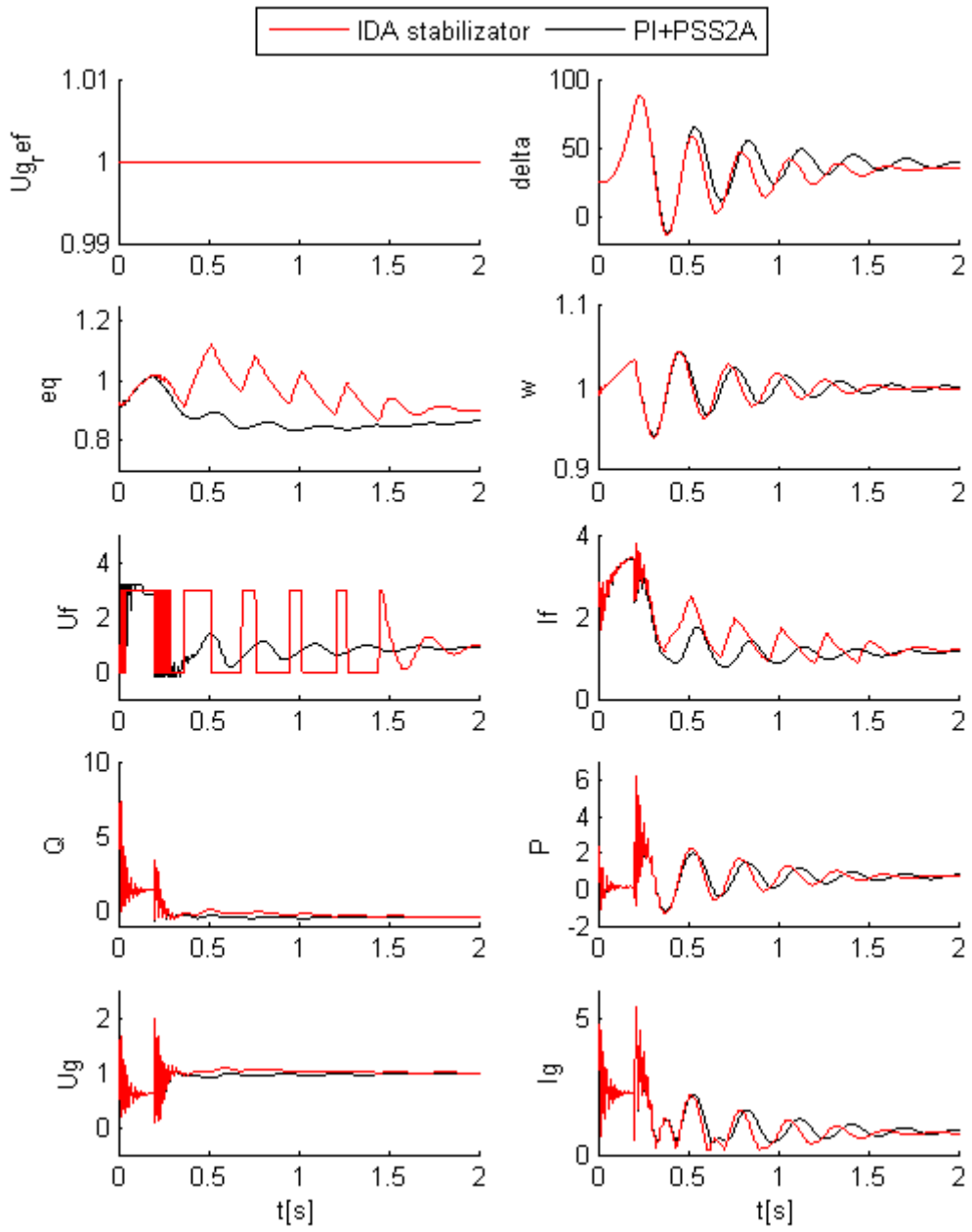


Slika 6.31. Kratki spoj 200 ms na sabirnici generatora, induktivni režim rada

Kako bi se dobio bolji prikaz smirivanja mjerenih veličina generatora nakon otklanjanja kratkog spoja na sabirnici generatora, na sljedećoj slici prikazan je odziv sustava na pojavu kratkog spoja 200 ms, u induktivnom režimu rada od vremena simulacije 0,5 s do 2 s.

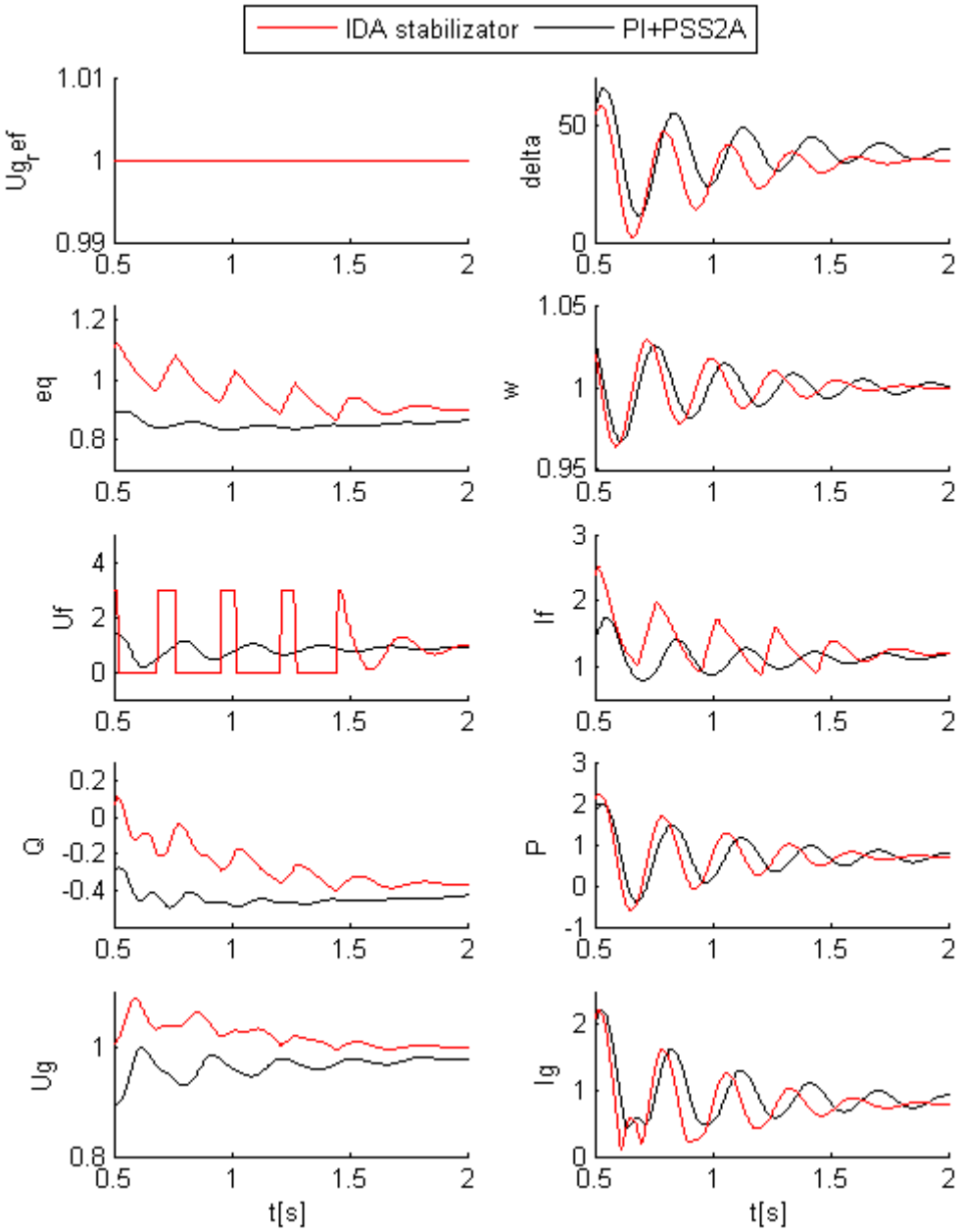


Slika 6.32. Kratki spoj 200 ms na sabirnici generatora, smirivanje, induktivni režim rada



Slika 6.33. Kratki spoj na sabirnici generatora, kapacitivni režim rada

Na sljedećoj slici dan je dio simulacijskog odziva s prethodne slike od vremena 0,5 s.

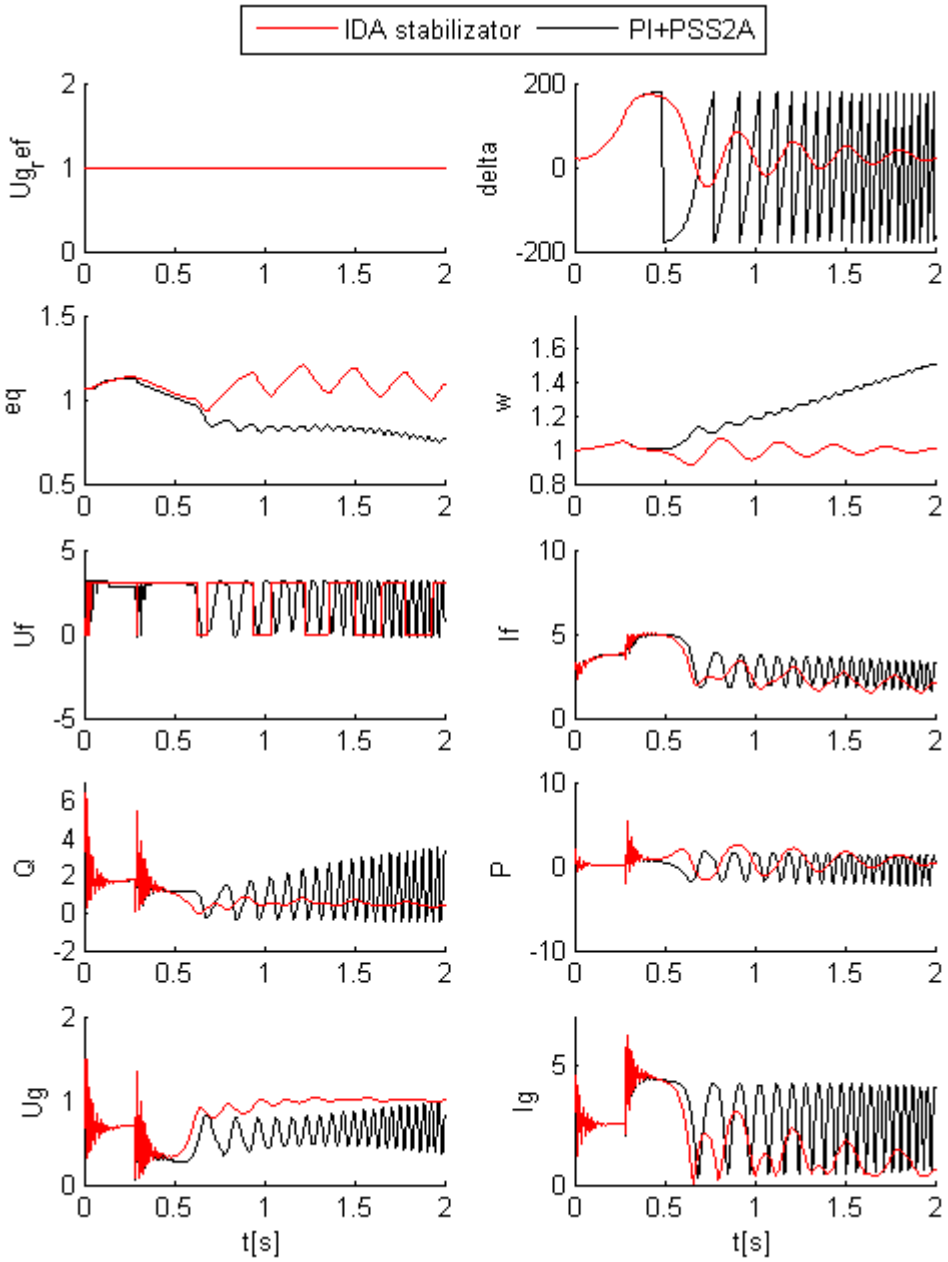


Slika 6.34. Kratki spoj na sabirnici generatora, smirivanje, kapacitivni režim rada

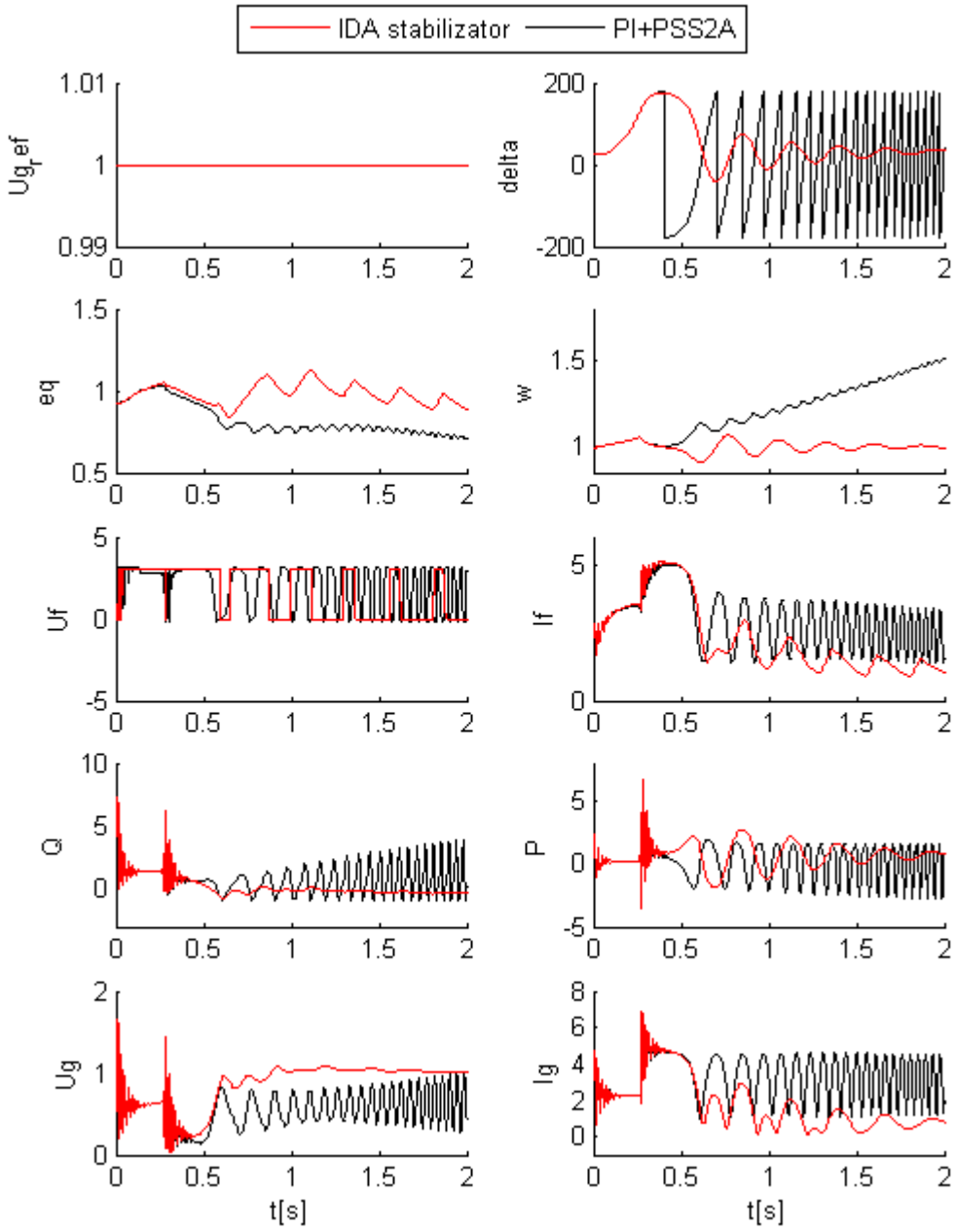
Rezultati simulacije kratkog spoja na sabirnici generatora u trajanju od 200 ms u induktivnom i kapacitivnom režimu rada pokazuju da sustav s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja ima veće prigušenje elektromehaničkih njihanja i nakon prestanka kratkog spoja prije postiže početno stacionarno stanje.

Simulacija kratkog spoja na sabirnici generatora omogućuje ispitivanje kritičnog vremena trajanja kvara (*engl.* critical clearing time), tj. maksimalnog vremena trajanja kvara nakon kojeg se generator vraća u stacionarno stanje. Rezultati simulacija su pokazali da je to vrijeme za sustav s IDA stabilizatorom jednako 280 ms u induktivnom, odnosno 267 ms u kapacitivnom režimu rada, a za sustav s klasičnim linearnim regulatorima to je vrijeme nešto

kraće. To znači da je granica stabilnosti sustava s klasičnim linearnim regulatorima manja u odnosu na granicu stabilnosti sustava s implementiranim IDA stabilizatorom, što je vidljivo sa slika 6.35. i 6.36.



Slika 6.35. Kratki spoj na sabirnici generatora u trajanju 280 ms, induktivni režim rada



Slika 6.36. Kratki spoj na sabirnici generatora u trajanju 267 ms, kapacitivni režim rada

6.6. Određivanje granice stabilnosti generatora bez i s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja

Stabilnost sustava s gledišta teorije regulacije i teorije elektroenergetskih sustava objašnjena je u petom poglavlju. Ovdje će biti analizirana granica stabilnosti ispitivanog sustava Pronyevom analizom te u pogonskom (P, Q) dijagramu. Glavna poveznica obje metode je određivanje svojstvenih vrijednosti sustava. Dok Pronyeva analiza za rezultat daje svojstvene vrijednosti sustava iz odziva sustava na impulsni poremećaj, određivanje granice stabilnosti u pogonskom dijagramu zahtijeva poznavanje jakobijana sustava.

6.6.1. Proniyeva analiza odziva sustava

Pronyeva analiza odziva sustava detaljno je objašnjena u [72, 73]. Proniyeva metoda se prvenstveno koristi za aproksimaciju funkcija, ali je također vrlo korisna za estimaciju i identifikaciju parametara. Pristup aproksimiranju funkcija sličan je onom iz Fourierove transformacije, s razlikom da se uz sinusne i kosinusne članove dodaju i njihova prigušenja [73]. Za periodički uzorkovani kompleksni signal od *N* elemenata [73]:

$$\{y(k)\}_{0\le k\le N-1} = \{y(0), y(1), \ldots, y(N-1)\}, \tag{6-7}$$

aproksimacija se daje zbrojem prigušenih kompleksnih eksponencijalnih članova:

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^{q} A_i e^{(\alpha_i + j\cdot 2\pi f_i)\cdot k\cdot T_s + j\cdot\varphi_i}, \tag{6-8}$$

gdje je T_s period uzorkovanja, A_i amplituda, α_i faktor prigušenja, f_i frekvencija i φ_i fazni pomak i-tog člana sume. Ako je ulazni signal slobodni odziv linearnog vremenski nepromjenjivog sustava, pojedini članovi sume (6-8) predstavljaju modove sustava. Zapiše li se izraz (6-8) u modalnom obliku [73]:

$$\hat{y}(k) = \sum_{i=1}^{n_a} C_i e^{\lambda_i\cdot k\cdot T_s} = \sum_{i=1}^{n_a} C_i z_i^k, \tag{6-9}$$

tada elementi C_i predstavljaju kompleksne amplitude modalnih komponenata uz korijene z_i karakterističnog polinoma diskretnog sustava $A(z)$:

$$C_i = A_i e^{j\cdot\varphi_i}. \tag{6-10}$$

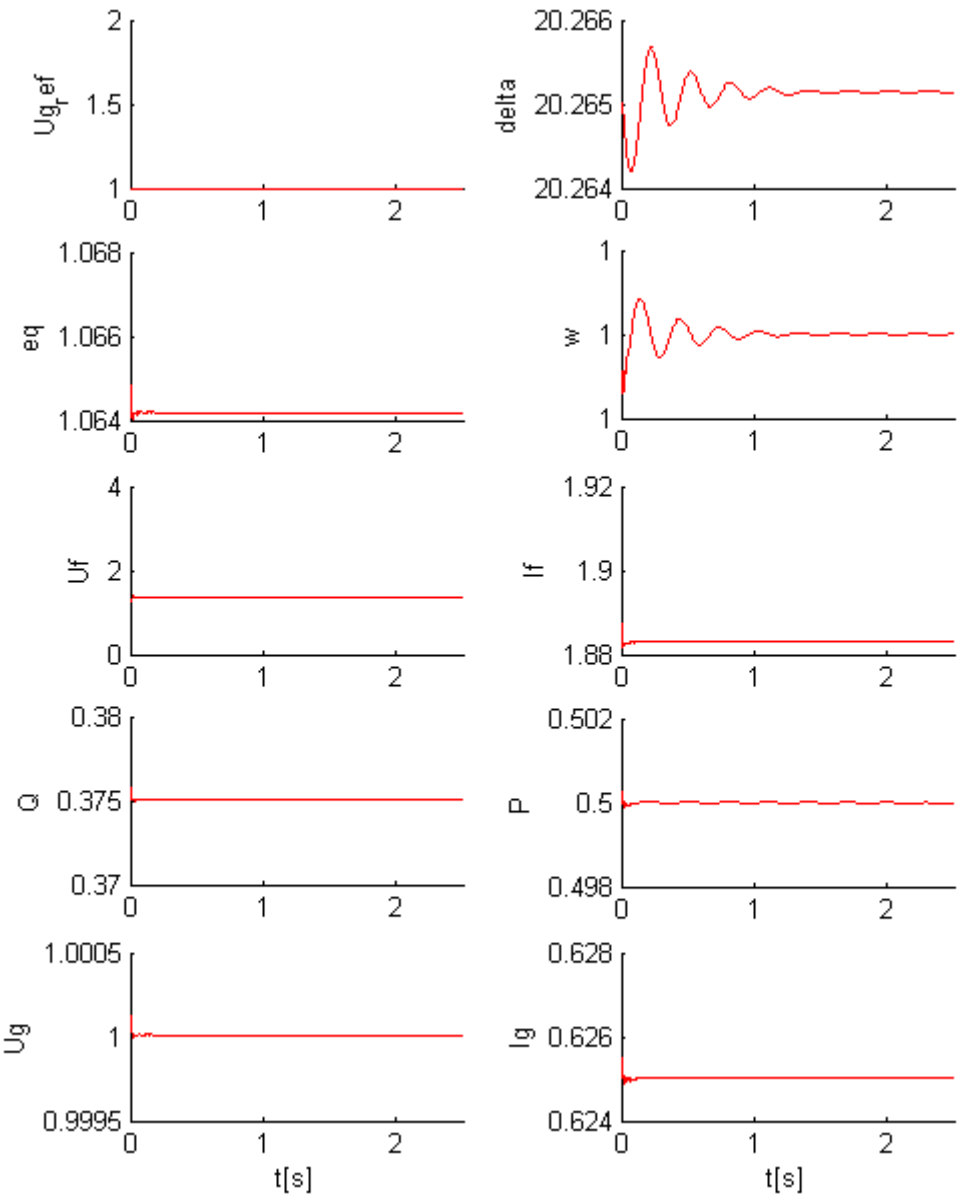
Korijeni z_i karakterističnog polinoma diskretnog sustava $A(z)$ predstavljaju polove sustava:

$$z_i = e^{(\alpha_i + j \cdot 2\pi f_i) \cdot T_s}, \tag{6-11}$$

Polovi kontinuiranog sustava, koji predstavljaju svojstvene vrijednosti matrice sustava, tada su jednaki:

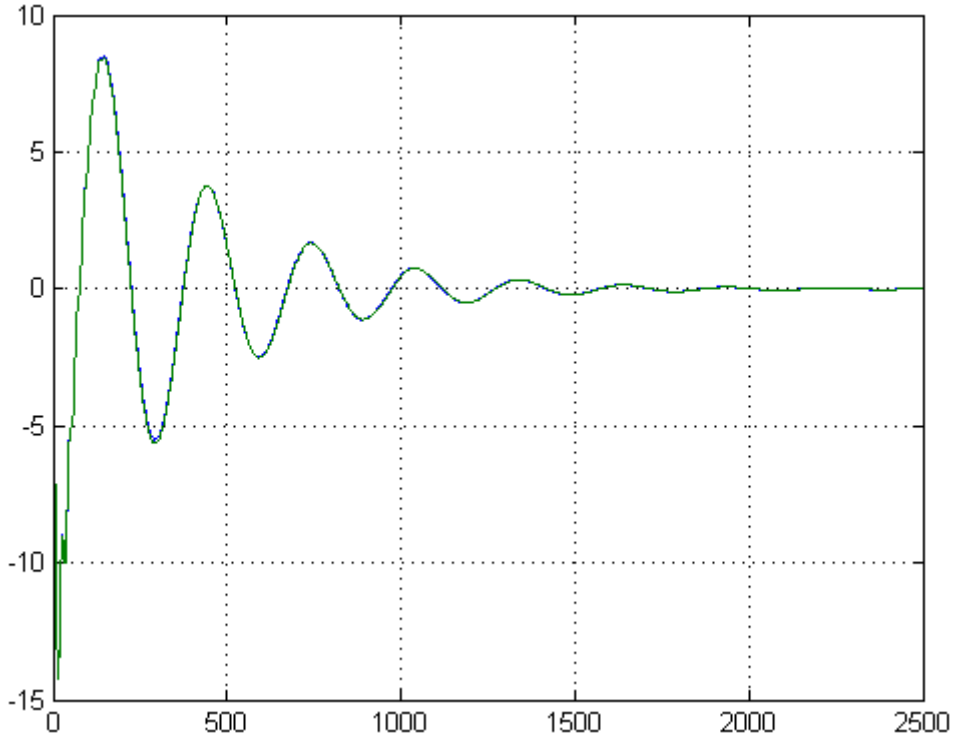
$$\lambda_i = \frac{1}{T_s} \ln z_i = \alpha_i + j \cdot 2\pi f_i \tag{6-12}$$

Iz [74] preuzeta je skripta za programski paket Matlab „pronyan_2013.m“ koja na temelju impulsnog odziva sustava daje Pronyevu aproksimaciju odziva i izračunava svojstvene vrijednosti sustava. Simuliran je odziv sustava na impulsni poremećaj referentne vrijednosti napona generatora. Referentni napon generatora iznosi 1 rj, a impulsni poremećaj napona iznosi 2 rj. Trajanje impulsnog poremećaja iznosi 1ms, tj. jedan period uzorkovanja u simulacijskom programu. Snaga generatora postavljena je na 0,5 rj, a faktor snage je jednak 0,8. Parametri IDA stabilizatora postavljeni su prema tablici 6.23.



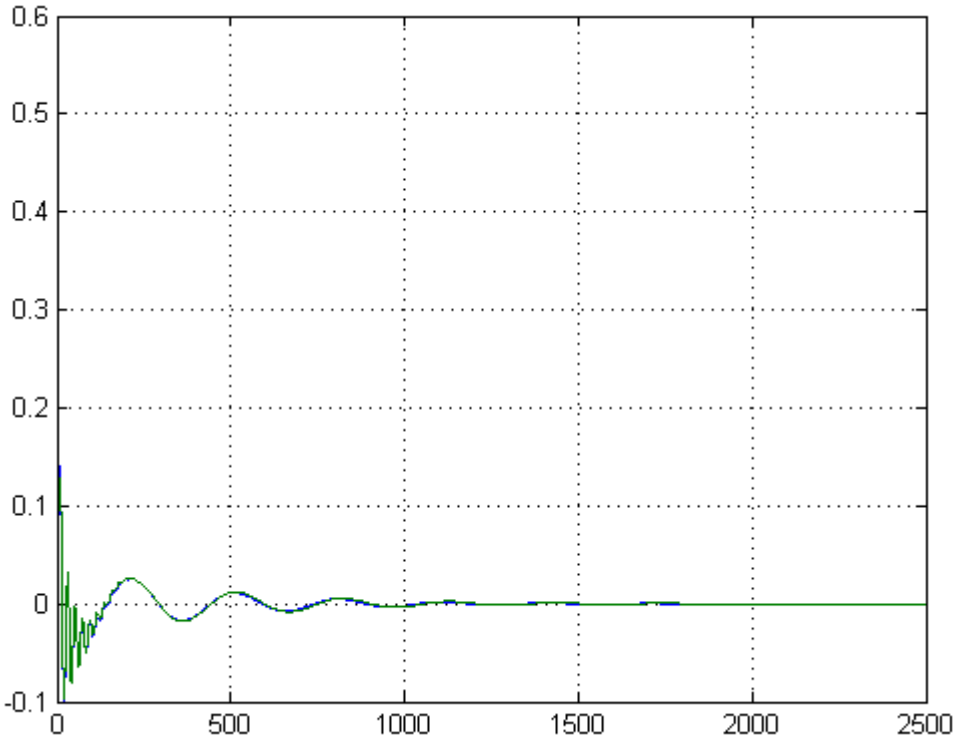
Slika 6.37. Odziv sustava na impulsni poremećaj u referentnoj vrijednosti napona

Impulsni odziv sustava prikazan je na slici 6.37. Pronyeva analiza izvedena je za signale brzine vrtnje i električne snage generatora. Da bi analiza bila pravilno provedena, istosmjerna komponenta signala je izuzeta tako što je vrijednostima signala u svakom trenutku oduzeta stacionarna vrijednost signala. Rezultat Pronyeve aproksimacija funkcije za signal brzine vrtnje prikazana je na slici 6.38. Polazna funkcija prikazana je plavom bojom, a njezina aproksimacija zelenom. Kako se aproksimacija vrši za diskretni signal, na osi apscisa umjesto vremena prikazan je broj uzoraka signala. S obzirom da je dinamika brzine vrtnje prikazana na slici 6.37. vrlo mala, amplituda dinamičkog signala pomnožena je s 10^6 kako bi se izbjegle numeričke pogreške simulacije.



Slika 6.38. Pronyeva aproksimacija funkcije brzine vrtnje

Pronyeva aproksimacija funkcije za signal snage prikazana je na slici 6.39. S obzirom da je dinamika snage prikazana na slici 6.39. vrlo mala, amplituda dinamičkog signala pomnožena je s 10^4 kako bi se izbjegle numeričke pogreške simulacije.



Slika 6.39. Pronyeva aproksimacija funkcije snage

Svojstvene vrijednosti sustava dobivene Pronyevom analizom mogu se usporediti sa svojstvenim vrijednostima jakobijana modela sustava trećeg reda (5-52) i jakobijana sustava sedmog reda (5-56) što je prikazano u tablici 6.24.

Tablica 6.24. Svojstvene vrijednosti sustava

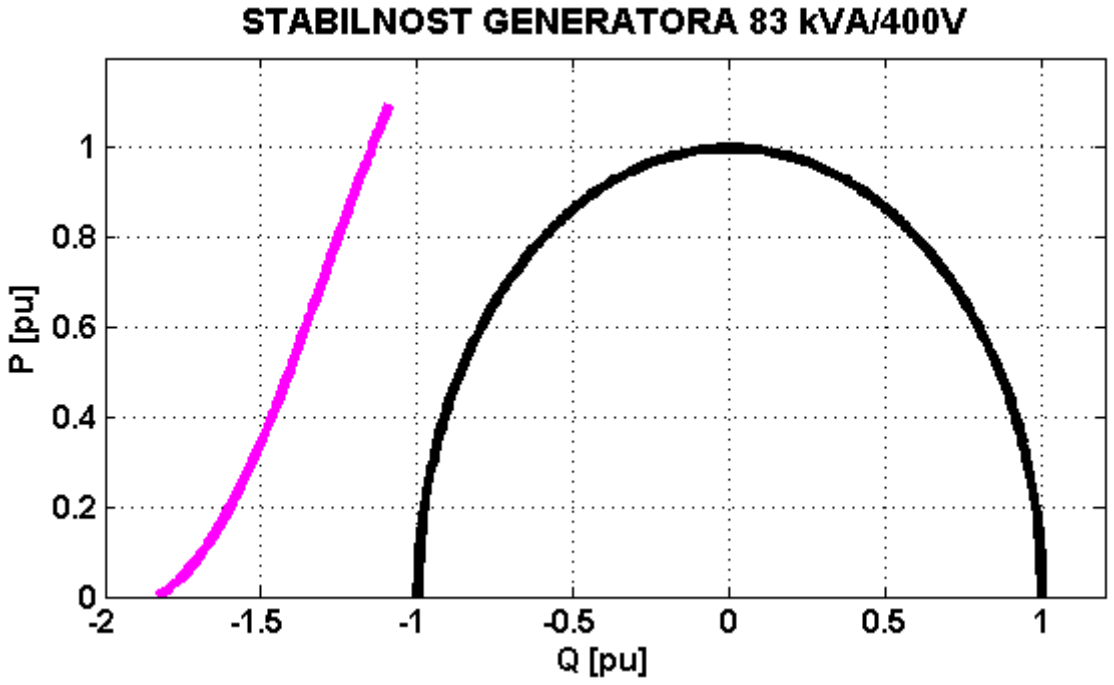
Pronyeva analiza	**Jakobijan modela 7. reda**	**Jakobijan modela 3. reda**
-25,75 + 297,57i	-25,69+313,87i	-
-25,75 – 297,57i	-25,6-313,87i	-
-2,70+20,96i	-2,47+20,00i	-1,85+17,95i
-2,70-20,96i	-2,47-20,00i	-1,85-17,95i
-47,14	-4,66	-
-277,08	-13,03	-
-562,16	-568,06	-925,88

Prve dvije svojstvene vrijednosti u tablici 6.24. odgovaraju dinamici statorskih tokova generatora s kružnom frekvencijom koja približno odgovara kružnoj frekvenciji magnetskog polja statora iznosa 50Hz. S obzirom da se dinamika statorskih tokova u modelu generatora trećeg reda zanemaruje, ove svojstvene vrijednosti u modelu trećeg reda nisu vidljive. Druge dvije svojstvene vrijednosti odgovaraju mehaničkim veličinama generatora, kutu opterećenja i brzini vrtnje. Njihova je frekvencija njihanja približno 3,3 Hz, što odgovara odzivima prikazanim na slici 6.37. Treći par svojstvenih vrijednosti odnosi se na prigušne namote generatora i nije zastupljen u modelu sustava trećeg reda. Zadnja svojstvena vrijednost u tablici 6.24. odgovara dinamici rotorskog toka. Sve svojstvene vrijednosti su negativne jer je odziv sustava stabilan. Usporedbom dobivenih rezultata vidljivo je najveće odstupanje svojstvenih vrijednosti dobivenih analitičkim putem iz modela trećeg reda. Svojstvene vrijednosti dobivene analitičkim putem iz modela sedmog reda i Pronyevom analizom su približno jednake.

6.6.2. Određivanje granice stabilnosti generatora u pogonskom dijagramu

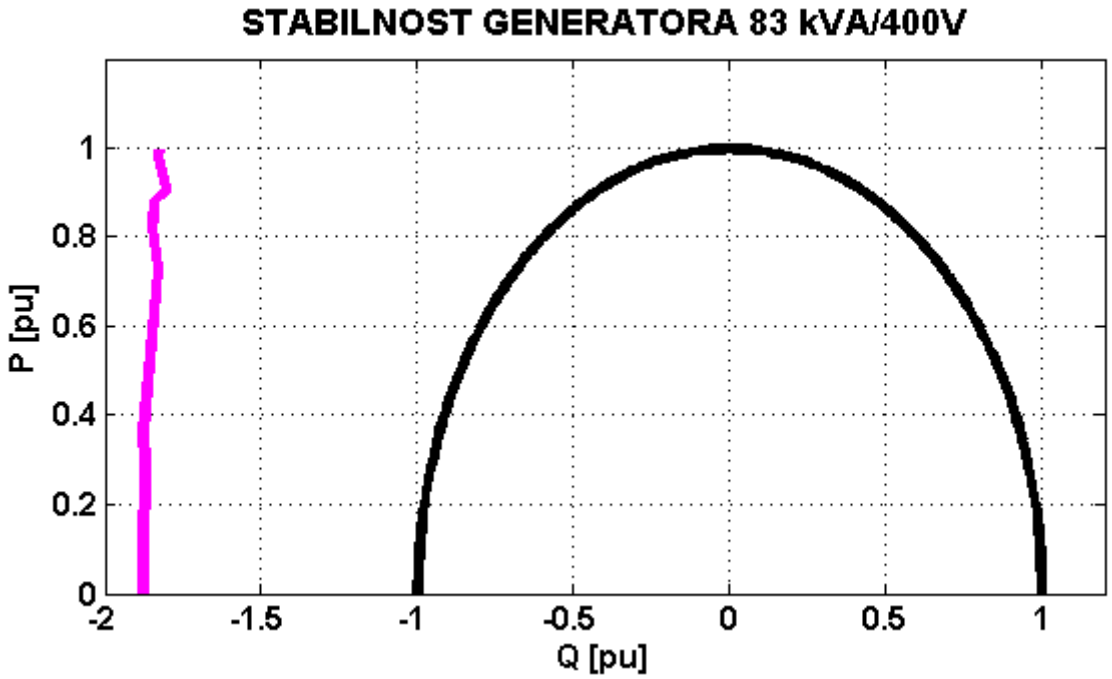
S gledišta teorije elektroenergetskih sustava granicu stabilnosti povoljno je prikazati u pogonskom (P, Q) dijagramu. U [75] načinjene su skripte za programski paket Matlab „STABMARG_612_HERA.m“, „CLASSTAB_N_612_HERA.m“ i „LINSTAB7_612.m“ koje na temelju Jakobijana sustava daju granicu stabilnosti sustava u pogonskom dijagramu. Za izvršavanje se poziva skripta „STABMARG_612_HERA.m“ u koju je potrebno unijeti parametre modela sustava te izabrati je li riječ o nereguliranom sustavu ili sustavu generatora s AVR-om. U skriptu je dodana i mogućnost izbora sustava s IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja. Dalje se za skup parova djelatne i jalove snage (P, Q) pogonske ravnine pomoću skripte „LINSTAB7_612“ iz jakobijana sustava određuju svojstvene vrijednosti sustava. Ova skripta je nadopunjena tako da na temelju jakobijana (5-56) određuje graničnu stabilnost sustava s implementiranim IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja. Konačno se pomoću skripte „CLASSTAB_N_612_HERA.m“ u pogonski dijagram crta granica stabilnosti sustava određena (P, Q) parovima za koje su utvrđene svojstvene vrijednosti na granici stabilnosti.

Granica stabilnosti u pogonskom dijagramu nereguliranog generatora spojenog na električnu mrežu dana je na slici 6.40.



Slika 6.40. Pogonski dijagram i granica stabilnosti nereguliranog generatora

Pogonski dijagram na slici 6.40. pokazuje da je granica stabilnosti nereguliranog generatora izvan jedinične kružnice što ukazuje na široko područje stabilnosti generatora. Pogonski dijagram sustava s implementiranim IDA stabilizatorom prikazan je na slici 6.41. Parametri IDA regulatora jednaki su onima u tablici 6.23. Vidljivo je proširenje područja stabilnosti u odnosu na neregulirani sustav.



Slika 6.41. Pogonski dijagram i granica stabilnosti generatora s implementiranim IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja

7. Zaključak

U ovoj doktorskoj disertaciji dana je sinteza nelinearnog IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja koji također ima funkcionalnost automatskog regulatora napona. Klasični regulatori koji se postavljaju u uzbudni krug sinkronog generatora su linearni regulatori. Oni su učinkoviti u slučaju pojave manjih poremećaja pri kojima se radna točka generatora ne mijenja. U slučaju većih poremećaja dolazi do promjene radne točke generatora i kvaliteta regulacije linearnih regulatora opada. Nelinearni regulatori implementirani u uzbudni krug sinkronih generatora trebali bi dati kvalitetnu regulaciju neovisno o radnoj točki generatora i povećati dinamičku stabilnost generatora.

Kako bi se moglo pristupiti sintezi IDA stabilizatora, detaljno je opisan nelinearni model sinkronog generatora s istaknutim polovima sedmog reda te njegova redukcija na model trećeg reda. Dan je model generatora trećeg reda u prostoru stanja pogodan za sintezu nelinearnog regulatora zasnovanog na energetskim funkcijama.

Nakon toga je detaljno opisana teorija upravljanja zasnovanog na energetskim funkcijama, tj. upravljanja zasnovanog na pasivnosti s naglaskom na upravljanje zasnovano na strukturi i prigušenju (IDA metoda). Kako bi se mogla provesti sinteza regulatora prema IDA metodi, potrebno je sustav zapisati u obliku portovima upravljanog Hamiltonovog sustava (PCH), čiji je izvod detaljno opisan. Također je dana usporedba PCH sustava i klasičnih Hamiltonovih sustava. Najvažnija osobina PCH sustava je strukturna pasivnost koja proizlazi iz Diracovog strukturnog zapisa fizikalnog sustava, odnosno njegove interpretacije u smislu međusobno povezanih podsustava među kojima se odvija pretvorba energije.

Nakon detaljnog opisa teorije upravljanja zasnovanog na pasivnosti, provedena je sinteza IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja. Dobivenom stabilizatoru dodana je povratna veza po armaturnom naponu generatora te je dokazano da se time zadržava PCH oblik sustava. Također je dokazano da povratna veza po naponu generatora daje IDA stabilizatoru elektromehaničkih njihanja funkcionalnost automatskog regulatora napona. S obzirom da upravljački algoritam u stacionarnom stanju daje signal različit od nule, sustav u koji se on implementira je forsiran. Hamiltonijan zatvorenog regulacijskog kruga forsiranog sustava nije njegova Lyapunovljeva funkcija. Prema tome, da bi se mogla dokazati asimptotska stabilnost forsiranog PCH sustava, bilo je potrebno hamiltonijan zatvorenog regulacijskog kruga proširiti pazeći da se pri tome ne mijenja dinamika varijabli stanja.

Dobiven je prošireni hamiltonijan koji ima minimum u forsiranom ravnotežnom stanju, što je dokazano dodatnom provjerom. Osim asimptotske stabilnosti objašnjeno je određivanje lineariziranog sustava u određenoj radnoj točki na temelju poznavanja matrice sustava. Analizom upravljačkog algoritma pokazano je da upravljački signal djeluje neposredno na vremensku derivaciju toka rotora, tj. na dinamiku toka uzbude koja je tada određena utjecajima dinamike promjene kosinusa kuta opterećenja u odnosu na kosinus stacionarnog kuta opterećenja, utjecajem dinamike brzine vrtnje rotora te utjecajem dinamičke pogreške armaturnog napona generatora.

Ispitivanje kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja provedeno je nizom simulacija u programskom paketu Matlab. Za simulaciju su korišteni parametri sinkronog generatora snage 83 kVA. Simulacijama je ispitivan induktivni i kapacitivni režim rada generatora. Prvo je ispitan utjecaj promjene parametara IDA stabilizatora na kvalitetu regulacije rada generatora spojenog na električnu mrežu. Utvrđena je stabilnost reguliranog sustava za široki raspon promjene parametara IDA stabilizatora. Analizom odziva dana je ocjena kvalitete regulacije za sve ispitane kombinacije parametara IDA stabilizatora.

Uvođenjem poremećaja u uzbudni napon generatora u rasponu frekvencija karakterističnom za elektromehanička njihanja koja se pojavljuju u elektroenergetskom sustavu pokazano je da IDA stabilizator te poremećaje prigušuje. Primijećeno je da se prigušenje smanjuje s povećanjem frekvencije poremećaja.

Kako bi se usporedila kvaliteta regulacije nelinearnog IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja i klasičnih linearnih regulatora, u uzbudni krug ispitnog generatora uveden je PI regulator napona generatora i stabilizator elektromehaničkih njihanja PSS2A. Ovakav odabir linearnih regulatora u uzbudnom krugu sinkronog generatora se najčešće susreće u praksi. Rezultati simulacija su pokazali da je kvaliteta regulacije linearnih regulatora bolja pri malim poremećajima kao što je promjena referentne veličine napona u iznosu 5%. Međutim, pri većim promjenama radne točke (skokovita promjena mehaničke snage pogonskog stroja generatora) i pri velikim poremećajima (kratki spoj na sabirnici generatora), bolju kvalitetu regulacije daje nelinearni IDA stabilizator elektromehaničkih njihanja. Simulacijom kratkog spoja je također pokazano da sustav s IDA stabilizatorom ima veće kritično vrijeme otklanjanja kvara u odnosu na sustav s linearnim regulatorima, što upućuje na veću dinamičku stabilnost sustava s implementiranim IDA stabilizatorom. Važno je naglasiti kako je struktura IDA stabilizatora puno jednostavnija u odnosu na regulacijsku

strukturu koju čine PI regulator napona i stabilizator elektromehaničkih njihanja PSS2A. Naime, dok navedeni linearni regulatori imaju mogućnost postavljanja ukupno 18 parametara, IDA stabilizator daje bolja regulacijska svojstva sa samo 3 parametra.

Na kraju je ocjena stabilnosti dana na temelju svojstvenih vrijednosti sustava te ispitivanjem granice stabilnosti u pogonskom dijagramu generatora. Svojstvene vrijednosti sustava određene su analitički, iz matrice lineariziranog sustava za model sedmog i trećeg reda te iz simulacijskog odziva sustava Pronyevom analizom. Analizom dobivenih rezultata moguće je zaključiti da model sedmog reda daje bolju informaciju o svojstvenim vrijednostima sustava. Također je iz rezultata vidljivo da je sustav stabilan.

Analizom stabilnosti u pogonskom dijagramu utvrđeno je da je granica stabilnosti nereguliranog generatora izvan jedinične kružnice što upućuje na široko područje stabilnosti generatora. Granica stabilnosti generatora s implementrianim IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja je još udaljenija od jedinične kružnice u odnosu na granicu stabilnosti nereguliranog generatora, što dokazuje da IDA stabilizator povećava statičku stabilnost sustava.

Rezultati simulacija dokazali su da je upravljački algoritam robusan s obzirom na velike poremećaje i promjenu radne točke generatora te stabilnost generatora u induktivnom i kapacitivnom režimu rada.

PRILOG I : Programski kodovi

U ovom prilogu su dani programski kodovi načinjeni u programskom paketu Matlab potrebni za izvođenje modela opisanih u 6. poglavlju.

P.I.1. Glavni program: SG_regulacija.m

```
%_____________________________________________________________________________
% ***** GLAVNI SIMULACIJSKI PROGRAM *****
% ***** V. Jerkovic Stil, 2014. ******
% ispitivani generator: 83 kVA, FER
% za sintezu koristen model sinkronog generatora treceg reda
% varijable stanja: kut opterecenja, brzina vrtnje i tranzijentna EMF
%_____________________________________________________________________________
clc; clear all; close all;
%_____________________________________________________________________________
%vrijeme simulacije i uzorkovanja
Tsim=2; Tsample=1e-3;
%_____________________________________________________________________________
% poremecaji:
%_____________________________________________________________________________
%promjena uzbude
tuf=1.50; tuf1=tuf+Tsample;
Ug_ref1=1; Ug_ref2=2;
%promjena snage
tp=150; tp1=tp+Tsample;
pel0=.5; p1=1;
%kratki spoj
tks1=120; tks2=121;
%_____________________________________________________________________________
%pocetni uvjeti
generator83
par83kVA
mod3reda
%_____________________________________________________________________________
%parametri regulatora
ka=b3/b1*5;
alpha=10;
beta=b0*10;
%_____________________________________________________________________________
%pocetni uvjeti
eq0=xv0(3)*Xad/Xfd;
p0=pel0+ig0^2*Rs;
%_____________________________________________________________________________

%********* SIMULACIJA IDA regulatora - model SG - Mehmedovic
stil='r'; model='meh7dokaz2_prony';
sim_gen;
%_____________________________________________________________________________
```

P.I.2. Parametri generatora: generator83.m

```
%_____________________________________________________________________________
% Zadavanje poznatih velicina generatora:
% V. Jerkovic Stil, 2013.
%_____________________________________________________________________________
Sn=83e3; %[VA]
Un=400;  %[V]
In=120;  %[A]
fn=50;   %[Hz]
p=5; nn=600;
cos_fi=0.8;
Uf=100;
If=11.8;
wb=2*pi*fn;
Ibr=4.303;
%_____________________________________________________________________________
% izbor baznih veličina:
%_____________________________________________________________________________
Usb=sqrt(2)*Un/sqrt(3);
Isb=sqrt(2)*In;
Sb=Sn;
tb=1;
Zb=Usb/Isb;
Zbr=Sb/Ibr^2;
Lb=Zb/wb;
Psib=Usb/wb;
Mb=Sb/wb*p;
%_____________________________________________________________________________
%****PARAMETRI GENERATORA****
%_____________________________________________________________________________
H=0.862;
Xd=0.8056;
Xq=0.5334;
Xl=0.0834;
Xad=Xd-Xl;
Xaq=Xq-Xl;
Xd1=0.1816;
Xd11=0.1193;
Xq11=0.9*Xd11;
Rfd=0.002183; rfd=9.786;
Xfd=0.8358;
Tdo1=1.21866;
Td1=0.2746;
Rs=0.03604; Rs=Rs/10;
Td11=0.054;
Tq11=0.054;
Tdo11=Td11*Xd1/Xd11;
Tqo11=Tq11*Xq/Xq11;
Xlkd=0.0566;
Rkd=0.006;
Xlkq1=0.0253;
Rkq=0.0056;
Xlfd=0.1137;
%_____________________________________________________________________________
%*****MREZA********
%_____________________________________________________________________________
Re=0.0272; Xe=0.264;
Ze=sqrt(Re^2+Xe^2);
%_____________________________________________________________________________
```

P.I.3. Parametri i početna stanja generatora: par83kVA.m

```
%_____________________________________________________________________________
% odredjivanje pocetnih stanja stroja
% funkcija STEADY2M preuzeta od M. Mehmedovic
% V. Jerkovic Stil, 2013.
%_____________________________________________________________________________
x=[Xad Xaq Xl Rs Xlfd Rfd Xlkd Rkd Xlkq1 Rkq Xe Re 2*H]';
q0=0.75*pel0;
PARS = [Sb 5.958 rfd Tsample pel0 q0 Xad Ug_ref1 1];
oms=2*50*pi;
[xv0,u0,mt0,vm,a,y,vg0,ig0]=STEADY2M(x,PARS,[1:5]);
Um0=vm;
Ig0=ig0;
y=ipsilon
%_____________________________________________________________________________
```

P.I.4. Model generatora trećeg reda: mod3reda.m

```
%_____________________________________________________________________________
% koeficijenti modela
% V. Jerkovic Stil, 2013.
%_____________________________________________________________________________
Um0;
b0=wb;
b1=1/(2*H)*Um0/(Xd1+Xe);
b2=Um0^2/(4*H)*(Xq-Xd1)/((Xq+Xe)*(Xd1+Xe));
b3=(Um0/Tdo1)*(Xd-Xd1)/(Xd1+Xe);
b4=(1/Tdo1)*(Xd+Xe)/(Xd1+Xe);
%_____________________________________________________________________________
```

P.I.5. Određivanje jakobijana reguliranog generatora, model sedmog i trećeg reda: jacobi7reda.m

```
%_____________________________________________________________________
%racunanje Jacobijana sinkronog generatora 7. reda
%V.Jerkovic Stil 2014.
%_____________________________________________________________________
%pocetni uvjeti
psid0=xv0(1);
psiq0=xv0(2);
psifd0=xv0(3);
psi1d0=xv0(4);
psi1q0=xv0(5);
del0=xv0(7);
%_____________________________________________________________________
% iz LINGENM7.m, autor M. Mehmedovic
% racunanje jakobijana prema LINGENM7.m
%_____________________________________________________________________
a1=zeros(7,7); y=ipsilon; vm=Um0;
om=2*pi*50;c=cos(del0); s=sin(del0); TM=2*H;
a1(1,1)=oms*(Rs+Re)*y(1,1); a1(1,2)=oms;
a1(1,3)=oms*(Rs+Re)*y(1,3); a1(1,4)=oms*(Rs+Re)*y(1,4);
a1(1,6)=oms*psiq0; a1(1,7)=oms*vm*c;
a1(2,1)=-oms; a1(2,2)=oms*(Rs+Re)*y(2,2);
a1(2,5)=oms*(Rs+Re)*y(2,5); a1(2,6)=-oms*psid0; a1(2,7)=-oms*vm*s;
a1(3,1)=-oms*Rfd*y(3,1); a1(3,3)=-oms*Rfd*y(3,3);
a1(3,4)=-oms*Rfd*y(3,4);
a1(4,1)=-oms*Rkd*y(4,1); a1(4,3)=-oms*Rkd*y(4,3);
a1(4,4)=-oms*Rkd*y(4,4);
a1(5,2)=-oms*Rkq*y(5,2); a1(5,5)=-oms*Rkq*y(5,5);
a1(6,1)=(y(2,2)-y(1,1))*psiq0+y(2,5)*psi1q0;
a1(6,2)=(y(2,2)-y(1,1))*psid0-y(1,3)*psifd0-y(1,4)*psi1d0;
a1(6,3)=-y(1,3)*psiq0;a1(6,4)=-y(1,4)*psiq0;a1(6,5)=y(2,5)*psid0;
a1(6,:)=-a1(6,:)/TM;
a1(7,6)=oms;
%_____________________________________________________________________
Areg=Tdo1*b0*Rfd/Xad*[0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 b4*Xad/Xfd 0 0 alpha*b0 -(ka*b1-b3)*sin(del0);
    0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0];
apv33=(ugd/uge*sigma3+ugq/uge*sigma6+ugd/uge*beta1*dex3);
apv35=(ugd/uge*sigma2+ugq/uge*sigma5+ugd/uge*beta1*dex2);
apv36=(ugd/uge*sigma1+ugq/uge*sigma4+ugd/uge*beta1*dex3);
Apv=Tdo1*b0*Rfd/Xad*beta*[0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 apv33*Xad/Xfd 0 0 apv35 apv36;
    0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0];
Az=a1+Areg-Apv;
lambda_z7red=eig(Az);
%_____________________________________________________________________
```

LITERATURA

[1] Y. Kitauchi, T. Shirasaki, K. Hayashi, M. Banjo, S. Kitamura: Recent Developments on Generator Excitation Control System – Introduction of Digital AVR and Power System Stabilization, *Hitachi Review, Vol. 49, No. 2, August 2000,pp. 66-70*

[2] M. Mišković, M. Mirošević, M. Milković: Analiza kutne stabilnosti sinkronog generatora u ovisnosti o izboru sustava uzbude, *Energija, god.58, br. 4, 2009, pp.430-445*

[3] I. Erceg, G. Erceg, D. Sumina: Development and Implementation of Control Algorithms for Synchronous Generator, *Automatika, god.52, br2, 2011, pp.95-106*

[4] IEEE Power Engineering Society: IEEE Recomanded Practice for Excitation System Models for Power System Stability studies, *IEE Std. 421-5-2005, IEEE New York, NY, USA, 2006.*

[5] V. Jerković, Ž. Špoljarić, D. Šljivac: Stability Testing of a Small Biogas Plant in Electric Power System, *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*, *Vol.2, No.2, 2011 , pp. 49-54*

[6] J.M. Ramirez, F.V. Arroyave, R.E.C. Gutierrez: Transient Stability Improvement by Nonlinear Controllers Based on Tracking, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol.33, No.2, February 2011, pp. 315-321*

[7] Q. Cheng, Y. Cheng, Y. Xue, X. Hu: Development and Prospects of Excitation Control Methods for Synchronous Generator, *Electric Power Automation Equipment, Vol. 32, No. 5, May 2012, pp. 108-117.*

[8] L. Ren, G. W. Irwin, D. Flynn: Nonlinear Identification and Control of a Turbogenerator – An On-Line Scheduled Multiple Model/Controller Approach, *IEE Transections on Energy Conversion, Vol. 20, No. 1, March 2005, Pages 237-245*

[9] W. Qiao, Q. Hui: Energy-Based Hybrid Excitation Control for Synchronous Generators, *Power and Energy Society General Meeting, 2010, IEEE, ISSN 1944-9925*

[10] T. Shen; S. Mei, Q. Lu, W. Hu, K. Tamura: Adaptive nonlinear excitation control with L_2 disturbance attenuation for power systems, *Automatica, Vol. 39, No.1, January 2003, pp. 81-89*

[11] S. Mei, M. Jin, T. Shen: Adaptive nonlinear excitation control with L_2 disturbance attenuation for multi-machine power systems, *Tsinghua Science and Technology, Vol. 9, No. 2, April 2004, pp. 197-201*

[12] R. Marino, T. Shen, C.M. Verrelli: Robust adaptive transient stabilisation of a synchronous generator with parameter uncertainty, *European Journal of Control, Vol. 2, No. 2, 2006, pp. 135-148*

[13] G. Kenné, R. Goma, H. Nkwawo, F. Lamnabhi-Lagarrigue, A. Arzandé, J.C. Vannier: Real-time transient stabilization and voltage regulation of power generators with unknown mechanical power input, *Energy Conversion and Management, Vol.51, No.1, January 2010, pp.218-224*

[14] M.A. Mahmud, H.R. Pota, M.J. Hossain: Full-order nonlinear observer-based excitation controller design for interconnected power systems via exact linearization approach, *International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 41, No. 1, October 2012, pp. 54-62*

[15] D. Gan, Z. Qu, H. Cai: Multi machine power system excitation control design via theories of feedback linearization control and nonlinear robust control, *International Journal of Systems Science, Vol. 31, No. 4, April 2000, pp. 519-527*

[16] A. Kazemi, M.R.J. Motlagh, A.H. Naghshbandy: Application of a new multi-variable feedback linearisation method for improvement of power systems tranzient stability, *International Journal of Power and Energy Systems, Vol. 29, No. 4, April 2007, pp. 322-328*

[17] A. Abdel-Khalik, A. Elserougi, A. Massoud, S. Ahmed: A power control strategy for flywheel doubly-fed induction machine storage system using artificial neural network, *Electric Power System Research, Vol. 96, 2013, pp. 267-276*

[18] L. Ren, G.W. Irwin D. Flynn: Nonlinear Identification and Control of a Turbogenerator – An On-Line Scheduled Multiple Model/Controller Approach, *IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 1, March 2005, pp. 237-245*

[19] H. Sayeghi, H.A. Sayanfar, A. Safari, R. Aghmasheh: A robust PSSs design using PSO in a multi-machine enviroment, *Energy Conversion and Management, Vol. 51, 2010, pp. 696-702*

[20] A. Cjatterjee, V. Mukherjee, S.P. Ghoshal: Velocity relaxed and craziness-based swarm optimized intelligent PID and PSS controlled AVR system, *Electrical Power and Energy Systems, Vol. 31, 2009, pp. 323-333*

[21] H. Shayeghi, H.A. Shayanfar, S. Jalilzadeh, A. Safari: Multi-machine power system stabilizers design using chaotic optimization algorithm, *Energy Conversion and Management, Vol. 51, 2010, pp. 1572-1580*

[22] H. Huerta, A.G. Loukianov, J.M. Canedo: Decentralized sliding mode block control of multimachine power systems, *Interntaional Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32,No.1, January 2010, pp. 1-11*

[23] A. Colbia-Vega, J. de Leon Morales, L. Fridman, O. Salas – Pena, M.T. Mata – Jiménez: Robust excitation control design using sliding – mode technique for multimachine power systems, *Electric Power System Research, Vol. 78, No. 9, September 2008, pp. 1627-1634*

[24] Y.Z. Sun, X. Li, M. Zhao, Y. H. Song, New Lyapunov function for transient stability analysis and control of power systems with excitation control, *Electric Power Systems Research, Vol. 57, 2001, pp. 123-131*

[25] J. Machowski, S. Robak, J.W. Bialek, J.R. Bumby, Decentralized Lyapunov-Based Power System Stabiliser, *International Conference of Electric Utility Deregulation and Restricturing and Power Technologies, London: IEEE, London, England, April 4-7, 2000, pp. 431-435*

[26] I. Erceg: Regulator uzbude sinkronog generatora zasnovan na teoriji Lyapunova, *doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2010.*

[27] R. Ortega, M. Galaz-Larios, A.S. Bazanella, A.Stankovic: Excitation Control of Synchronous Generators via Total Energy Shaping, *Proceedings oft he American Control Conference, Arlington, June 25-27, 2001, 2001, pp. 817-822*

[28] M. Galaz, R. Ortega, A.S. Bazanella, A. M. Stankovic: An energy-shaping approach to the design of excitation control of synchronous generators, *Automtaica, Vol. 39, 2003, pp. 111-119*

[29] A.S. Bazanella, C.L. da Conceiçao: Transient stability improvement through excitation control, *International Journal of Robust and Nonlinear Control, Vol.14, No. 9-10, 2004, pp. 891-910*

[30] J. Hao, J. Wang, C. Chen, L. Shi: Nonlinear excitation control of multi-machine power systems with structure preserving models based on Hamiltonian system theory, *Electric Power System Rrsearch, Vol.4, No.3, June 2005, pp. 401-408*

[31] J. Hao, C. Chen, L. Shi, J. Wang: Nonlinear Decentralized Disturbance Attenuation Excitation Control for Power Systems With Nonlinear Loads Based on Hamiltonian Theory, *IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.22, No.2, June 2007, pp. 316-324*

[32] K. Wang, M. L. Crow: Hamiltonian Theory Based Coordinated Nonlinear Control of Generator Excitation and STATCOMs, *North American Power Symposium (NAPS) 2010, Arlington, Texas, USA, Conference Publications, November 2010, pp. 1-5*

[33] J. Kasać: Analiza stabilnosti nelinearnih sustava vođenih analitičkim neizrazitim regulatorom, *doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.*

[34] P. Maya-Ortiz, G. E. Pérez: Observer-based IDA Control of Synchronous Generators, *Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, December 2003, pp. 344-349*

[35] Y. Wang, D. Cheng, Y. Hong: Stabilization of synchronous generators with the Hamiltonian function approach, *International Journal of Systems Science, Vol.32, No.8, 2001, pp. 971-978*

[36] M. Jadrić, B. Frančić: Dinamika električnih strojeva, *Graphis, Zagreb, 1995.*

[37] M. Mehmedović: Identifikacija parametara sustava regulacije uzbude sinkronih strojeva, *doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 1995.*

[38] J. Machowski, J.W. Bialek, J.R. Bumby: Power System Dynamics: Stability and Control, *Wiley, 2008.*

[39] P. Kundur: Pwer System Stability and Control, *McGraw-Hill, 1994.*

[40] N.Perić: Automatsko upravljanje, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 1998.

[41] B. Novaković: Regulacijski sistemi, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1985.

[42] H. Agahi, M. Karrari, A. Mahmoodzadeh: Two New Methods for Synchronous Generator Parameter Estimation, *Power Tech Conference Publications, 2007, IEEE Lausanne, pp. 1061-1066*

[43] M.A. Arjona, R. Escarela-Perez, G. Espinoza-Perez, J. Alvarez-RAmirez: Validity testing of third-order nonlinear models for synchronous generators, *Electric Power Sytems Research, Vol.79, 2009, pp. 953-958*

[44] M. Dehghani, S.K.Y. Nikravesh: Nonlinear state space model identification of synchronous generators, *Electric Power Systems Research, Vol. 78, 2008, pp. 926-940*

[45] K.R. Padiyar: Power System Dynamics Stability and Control, *BS Publications,Andhra Pradesh, India, 2008.*

[46] R. Ortega, A. J. van der Schaft, B. M. Maschke: Stabilisation of port-controlled Hamiltonian systems via energy balancing, *Stability and Stabilization of Nonlinear Systems Lecture Notes in Control and Information Sciences Volume 246, 1999, pp. 239-260*

[47] A.J. van der Schaft: Port-controlled Hamiltonian systems: towards the theory for control and design of nonlinar physical systems, *Journal of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), Vol.39, No.2, pp. 91-98, 2000.*

[48] R. Ortega, A. Loria, P.J. Nicklasson, H. Sira-Ramirez: Passivity-based Control of Euler-Lagrange Systems, Mechanical, Electrical and Electromechanical Applications, *Springer-Verlag London Limited 1998.*

[49] Dinamičko programiranje, Hamilton-Jacobi-Bellmanova jednadžba, *prezentacija s predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb: http://zrno.fsb.hr/katedra/download/materijali/278.pdf*

[50] Lecture 18: Hamiltonian Equations of Motion, *prezentacija s predavanja, http://www.hepl.harvard.edu/~morii/phys151/lectures/Lecture18.pdf*

[51] Lecture 4: Hamilton's Principle, *prezentacija s predavanja, http://www.hepl.harvard.edu/~morii/phys151/lectures/Lecture04.pdf*

[52] $\mathcal{L}_p$ stabilnost i pasivnost dinamičkih sustava, Opća teorija sustava, *prezentacija s predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb http://zrno.fsb.hr/katedra/download/materijali/492.pdf*

[53] P. Cvitanović, R. Artuso, R. Mainieri, G. Tanner, G. Vattay: Chaos: Classical and Quantum, *ChaosBook.org, Niels Bohr Institute, Copenhagen 2012.*

[54] K. Höffner: Geometric Aspects of Interconnection and Damping Assigment – Passivity Based Control, *doktorska disertacija, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 2011.*

[55] A.E. Leon, J.A. Salsona, M.I. Valla: Comparison among nonlinear excitation control strategies used for damping power system oscillations, *Energy Conversion and Management, No. 53, 2012, pp. 55-67.*

[56] F. Gomez Estern, A.J. van der Schaft: Physical damping in IDA-PBC controlled underactuated mechanical systems, *European Journal of Control, No. 10, 2004, pp. 451-468.*

[57] R. Ortega, E. Garcia-Canseco: Interconnection and Damping Assigment Passivity- Based Control: A Survey, *European Journal of Control, No.10, 2004, pp. 432-450.*

[58] L. Cai, Y. He,M. Wu: Asymtotical stabilisation of time invariant and time varying port-Hamiltonian systems via a new kinetic energy-shaping, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control, No. 8, Vol. 8, 2012, pp.5513-5522.*

[59] A.S. Bazanella, P.V. Kokotović, A.S. e Silva: A Dynamic Exstension for L_gV Controllers, *IEEE Transactions on Automatic Control, No. 33, Vol.44, March 1999, pp. 588-592*

[60] Y. Wang, D. Cheng, Y. Liu, C. Li: Adaptive H_∞ excitation control of multimachine power systems via the Hamiltonian function method, *International Journal of Control, Taylor and Francis Ltd, No. 4, Vol. 77, March 2004, pp. 336-350*

[61] M. Houde: Lagrangian Dynamics, *prezentacija s predavanja, Department of Physics and Astronomy, The University of Western Ontario, Canada, 2005*
http://www.astro.uwo.ca/~houde/courses/PDFfiles/physics350/Lagrange.pdf

[62] Lecture notes: Aerospace Dynamics, Lecture 10: Friction in Lagnange's Formulation, *prezentacija s predavanja, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, 2003*
http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-61-aerospace-dynamics-spring-2003/lecture-notes/lecture10.pdf

[63] Marko Šešlija: Discrete Geometry Approach to Structure-Preserving Discretization of Port-Hamiltonian Systems, *Mathematics Colloquium at Johann Bernuulli Institute of RuG, University of Groningen, 2013*
http://markoseslija.net/seslija/Publications_files/RuG-JB-PhD-Seminar.pdf

[64] A. van der Schaft, D. Jeltsema: Port Hamiltonian Systems: From Geometric Network Modeling to Control, *prezentacija s predavanja, European Embedded Control Institute, 2009*
http://www.eeci-institute.eu/pdf/M013/EECI_lecture1.pdf

[65] I. Petrović: Primjenjene tehnike estimacije, *prezentacja s predavanja, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2011.*
https://www.fer.unizg.hr/_download/repository/PTE_Poglavlja02_2010-11_v01.pdf

[66] A. van der Schaft, D. Jeltsema: Hamiltonian Control Systems: From modeling to analysis and control, *prezentacija s predavanja, Elgersburg School, March, 2012*
www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/math/Tagungen/ElgSchool2012/Elgersburg2012.pdf

[67] B. Maschke, R. Ortega, A. van der Schaft : Energy-Based Lyapunov Functions for Forced Hamiltonian Systems with Dissipation, *IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 45, No. 8, August, 2000*

[68] M. Mehmedović: Popis ispravljenih parametara sinkronog generatora 83 kVA FER, *interna skripta, Zagreb, rujan 2013.*

[69] D. Sumina: Trodimenzionalni stabilizator elektromehaničkih oscilacija sinkronog generatora, *doktorska disertacija, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2009.*

[70] A. Loria: Passivity in Control Systems, *C.N.R.S, UMR 5228, Laboratorie d'Automatique de Grenoble, ENSIEG, St. Martin d'Heres, France http://www.l2s.supelec.fr/sites/lss.supelec.fr/files/users/loria/plenary-passivity.pdf*

[71] S-S. Lee, S-H. Kang, G-S. Jang, S-Y. Li, J-K. Park, S-I. Moon, Y-T. Yoon: Damping Analysis using IEEEST PS and PSS2A PSS, *Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol.1, No. 3, 2006, pp. 271-278*

[72] M. Mehmedović, D. Nemec: Analiza Mjerenih Signala u elektroenergetskom sustavu Pronyevim postupkom, *Hrvatski komitet međunarodnog vijeća za velike električne sisteme, Četvrto savjetovanje HK Cigre, Cavtat, 1999.*

[73] R. Brandalik: Analiza spektralnih svojstava mjerenih signala u elektroenergetskom sustavu Pronyevom metodom*, diplomski rad, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2013.*

[74] M. Mehmedovićm, R. Brandalik: pronyan2013.m, *Matlab skripta, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2013.*

[75] M. Mehmedović: Granica naponske stabilnosti, prijelazna i dinamička stabilnost nereguliranoga i reguliranog sinkronog generatora, *Elektrotehnički fakultet Osijek, Zagreb-Osijek, 2013.*

[76] A. van der Schaft: Port-Hamiltonian systems: An introductory survey, *Proceedings of the International Congres of Mathematicians, Madrid, 2006 http://www.icm2006.org/proceedings/Vol_III/contents/ICM_Vol_3_65.pdf*

POPIS OZNAKA

B	magnetska indukcija
e	regulacijska pogreška
e_{fd}	supstituirani napon uzbude
e_q'	tranzijentna elektromotorna sila
$\mathbf{g}$	ulazni vektor u PCH sustavu
H	konstanta tromosti
$\mathcal{H}$	Hamiltonijan
$\mathcal{H}_c$	Hamiltonijan regulatora
$\mathcal{H}_d$	željeni Hamiltonijan zatvorenog regulacijskog kruga
$\mathbf{i}$	matrica struja
$\mathbf{I}$	jedinična matrica
i_a,i_b,i_c	struje statora po fazama
I_{an}	fazna struja statora
i_D, i_Q	struje prigušnog namota
$\mathbf{i_{dq0}}$	vektor struja statora u rotorskom koordinatnom sustavu
i_{fd}	struja uzbude
i_n	struja nulvodiča
$\mathbf{i_R}$	vektor struja rotora
$\mathbf{i_S}$	vektor struja statora
I_{SB}	bazna struja relativnog sustava jedinica
J	moment inercije generatora
$\mathbf{J}$	Poissonova strukturna matrica
$\mathbf{J_c}$	strukturna matrica regulatora
$\mathbf{J_d}$	željena strukturna matrica zatvorenog regulacijskog kruga
k	parametar prigušenja stabilizatora elektromehaničkih njihanja
$\mathbf{L}$	matrica induktiviteta
$\mathcal{L}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$	Lagrangeova funkcijsa sustava
l_{0s}, l_{2s}	induktivitet faze statora kao posljedica nultog odnosno drugog harmonika električnog kuta zakreta rotora
L_a,L_b, L_c	induktiviteti statora po fazama
$\mathbf{L_{abc}}$	matrica induktiviteta i međuinduktiviteta statora
$\mathbf{L_{abcR}}$	matrica međuinduktiviteta statora i rotora
l_{ad}, l_{aq}	međuinduktiviteti u d odnosno q osi rotora
L_B	bazni induktivitet relativnog sustava jedinica
l_d	uzdužna komponenta statorskog induktiviteta u rotorskom koordinatnom sustavu

l_d'	uzdužni prijelazni induktivitet sinkronog generatora
l_d''	uzdužni početni induktivitet sinkronog generatora
L_D,L_Q	induktiviteti prigušnog namota
l_e	ekvivalentni induktivitet mreže
L_{fd}	induktivitet uzbudnog namota
l_q	poprečna komponenta statorskog induktiviteta u rotorskom koordinatnom sustavu
l_q''	poprečni početni induktivitet sinkronog generatora
$\mathbf{L_R}$	matrica induktiviteta i međuinduktiviteta rotora; matrica rotora u (d,q) koordinatnom sustavu
$\mathbf{L_S}$	matrica statorskih induktiviteta u rotorskom koordinatnom sustavu
$\mathbf{L_S}$	matrica statora u (d,q) koordinatnom sustavu
$\mathbf{L_{SR}}$	matrica međuinduktiviteta u rotorskom koordinatnom sustavu
L_σ	rasipni induktivitet faze statora
l_σ, $l_{\sigma f}$, $l_{\sigma D}$, $l_{\sigma Q}$	rasipni induktiviteti statorskog, rotorskog i pomoćnog namota
l_0	nulti induktivitet
M_B	bazni moment relativnog sustava jedinica
M_{el}	električni moment generatora
M_t	moment turbine
M_u	moment ubrzanja generatora
p	broj parova polova generatora
$\mathbf{p}$	vektor generaliziranih impulsa sustava
$\mathbf{q}$	vektor generaliziranih koordinata sustava
$\mathbf{R}$	Rayleigova disipacijska matrica
$\mathcal{R}$	Rayleigova disipacijska funkcija
R_a,R_b, R_c	otpori statora po fazama
$\mathbf{R_c}$	disipacijska matrica regulatora
$\mathbf{R_d}$	željena disipacijska matrica zatvorenog regulacijskog kruga
R_D, R_Q	otpori prigušnog namota
R_e	ekvivalentni otpor mreže
R_{fd}	otpor uzbudnog namota
R_S	otpor statora
$\boldsymbol{R_S}$	matrica otpora statora
S_B	bazna prividna snaga relativnog sustava jedinica
$\mathrm{T}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})$	kinetička energija sustava
t_B	bazno vrijeme relativnog sustava jedinica
T_d'	prijelazna uzdužna vremenska konstanta uz zatvoreni armaturni krug
T_d''	početna uzdužna vremenska konstanta uz zatvoreni armaturni krug

T_{d0}'	prijelazna uzdužna vremenska konstanta uz otvoreni armaturni krug
T_{d0}''	početna uzdužna vremenska konstanta uz otvoreni armaturni krug
T_q''	početna poprečna vremenska konstanta uz zatvoreni armaturni krug
T_{q0}''	početna poprečna vremenska konstanta uz otvoreni armaturni krug
$\mathbf{u}$	vektor upravljačkih sila
U ($\mathbf{q}$)	potencijalna energija sustava
u_a,u_b,u_c	naponi statora po fazama
U_{an}	fazni napon statora
u_D, u_Q	naponi prigušnog namota
$\mathbf{u_{dq0}}$	vektor napona statora u rotorskom koordinatnom sustavu
u_{fd}	napon uzbude
$\underline{U_m}$	vektor napona mreže u (d,q) koordinatnom sustavu
U_{m0}	vršna vrijednost mrežnog napona
u_{md}, u_{mq}	komponente vektora napona mreže u (d,q) koordinatnom sustavu
$\mathbf{u_R}$	vektor napona rotora
$\mathbf{u_S}$	vektor napona statora
$\underline{U_s}$	vektor napona statora u (d,q) koordinatnom sustavu
U_{SB}	bazni napon relativnog sustava jedinica
X_d	uzdužna reaktancija sinkronog generatora
X_d'	prijelazna uzdužna reaktancija sinkronog generatora
X_d''	početna uzdužna reaktancija sinkronog generatora
X_e	ekvivalentna reaktancija mreže
X_q	poprečna reaktancija sinkronog generatora
X_q''	početna poprečna reaktancija sinkronog generatora
Z_B	bazna impedancija relativnog sustava jedinica
α	strukturni parametar stabilizatora elektromehaničkih njihanja
γ_r	prostorna koordinata rotora
γ_s	prostorna koordinata statora
δ	kut opterećenja generatora
Θ	magnetsko protjecanje
ϑ	električni kut zakreta rotora
λ	magnetska vodljivost
ψ_a,ψ_b,ψ_c	magnetski tokovi statora po fazama
ψ_B	bazni ulančeni magnetski tok relativnog sustava jedinica
ψ_D, ψ_Q,	magnetski tokovi prigušnog namota
$\mathbf{\psi_{dq0}}$	vektor statorskih tokova u rotorskom koordinatnom sustavu
ψ_{fd}	magnetski tok uzbudnog namota

$\boldsymbol{\psi_R}$	vektor magnetskih tokova rotora
$\boldsymbol{\psi_S}$	vektor magnetskih tokova statora
ω	kutna brzina rotora
$\omega_{\boldsymbol{B}}$	bazna kutna brzina relativnog sustava jedinica
ω_m	mehanička kutna brzina generatora
ω_{ms}	mehanička kutna sinkrona brzina generatora
ω_s	sinkrona kutna brzina

POPIS SLIKA

Slika 2. 1. Uzbudni regulacijski krug sinkronog generatora…….. 5

Slika 3.1. Konstrukcija i namoti modeliranog sinkronog generatora…….. 8

Slika 3.2. Sinkroni generator spojen u elektroenergetski sustav……. 19

Slika 3.3. Fazorski dijagrami sinkronog generatora spojenog u elektroenergetski sustav.. 20

Slika 3.4. Statorski tokovi u: a) početnom, b) prijelaznom, c) stacionarnom stanju……... 21

Slika 3.5. Struja rotora (a) i direktna reaktancija statora (b) pri poremećaju…….. 21

Slika 4.1. Diracova struktura fizikalnog sustava [66]…… 33

Slika 4.2. Konzervativni sustav bez upravljačkih ulaza…….. 35

Slika 4.3. PCH regulacijska struktura s IDA regulatorom…….. 39

Slika 5.1. Proširena struktura forsiranog PCH sustava…… 53

Slika 5.2. Prošireni hamiltonijan u svojstvu Lyapunovljeve funkcije…… 57

Slika 6.1. Simulacijski model za ispitivanje kvalitete regulacije IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja……. 64

Slika 6.2. Model linearnog sinkronog stroja sedmog reda…….. 66

Slika 6.3. IDA stabilizator elektromehaničkih njihanja…….. 67

Slika 6.4. Promjena parametra α, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, induktivni režim rada…….. 78

Slika 6.5. Promjena parametra α, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, kapacitivni režim rada……. 79

Slika 6.6. Promjena parametra k, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, induktivni režim rada……... 81

Slika 6.7. Promjena parametra k, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, kapacitivni režim rada……..... 82

Slika 6.8. Promjena parametra β, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, induktivni režim rada…….. 83

Slika 6.9. Promjena parametra β, odziv na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona, kapacitivni režim rada……. 85

Slika 6.10. Odziv napona generatora na povećanje referentne vrijednosti……. 86

Slika 6.11. Odziv napona generatora na smanjenje referentne vrijednosti……. 87
Slika 6.12. Povećanje referentnog napona generatora za 5%..... 88
Slika 6.13. Smanjenje referentnog napona generatora za 5%..... 89
Slika 6.14. Dodavanje sinusnog poremećaja naponu uzbude……. 90
Slika 6.15. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 0,2 Hz……... 91
Slika 6.16. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 0,5 Hz…….. 92
Slika 6.17. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 1 Hz……. 93
Slika 6.18. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 1,5 Hz…….. 94
Slika 6.19. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 2 Hz……. 95
Slika 6.20. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 2,5 Hz……... 96
Slika 6.21. Odziv sustava na poremećaj uzbude frekvencije 3 Hz…….. 97
Slika 6.22. Stabilizator elektromehaničkih njihanja PSS2A [71]…… 99
Slika 6.23. PI regulator napona sa zaštitom od zasićenja integralnog člana…….. 99
Slika 6.24. Simulacijski model PSS2A……... 100
Slika 6.25. Povećanje referentne vrijednosti napona za 5%, induktivni režim rada……... 101
Slika 6.26. Smanjenje referentne vrijednosti napona za 5%, induktivni režim rada……... 102
Slika 6.27. Povećanje referentne vrijednosti napona za 5%, kapacitivni režim rada…….. 103
Slika 6.28. Smanjenje referentne vrijednosti napona za 5%, kapacitivni režim rada……. 104
Slika 6.29. Povećanje mehaničke snage s 0,5 na 0,7 rj, induktivni režim rada……. 106
Slika 6.30. Povećanje mehaničke snage s 0,5 na 0,7 rj, kapacitivni režim rada…… 107
Slika 6.31. Kratki spoj 200 ms na sabirnici generatora, induktivni režim rada…… 109
Slika 6.32. Kratki spoj 200 ms na sabirnici generatora, smirivanje, induktivni režim rada 110
Slika 6.33. Kratki spoj na sabirnici generatora, kapacitivni režim rada…….. 111
Slika 6.34. Kratki spoj na sabirnici generatora, smirivanje, kapacitivni režim rada…….. 112
Slika 6.35. Kratki spoj na sabirnici generatora u trajanju 280 ms, induktivni režim rada.. 113
Slika 6.36. Kratki spoj na sabirnici generatora u trajanju 267 ms, kapacitivni režim rada. 114
Slika 6.37. Odziv sustava na impulsni poremećaj u referentnoj vrijednosti napona…….. 117
Slika 6.38. Pronyeva aproksimacija funkcije brzine vrtnje…… 118
Slika 6.39. Pronyeva aproksimacija funkcije snage……..……. 118

Slika 6.40. Pogonski dijagram i granica stabilnosti nereguliranog generatora……... 120

Slika 6.41. Pogonski dijagram i granica stabilnosti generatora s implementiranim IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja...……... 121

POPIS TABLICA

Tablica 5.1. Podjela stabilnosti elektroenergetskog sustava [38]…… 52

Tablica 6.1. Popis parametara sinkronog generatora SG 83kVA…… 65

Tablica 6.2. Parametri modela sinkronog generatora trećeg reda……... 66

Tablica 6.3. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=1, induktivni režim rada……. 70

Tablica 6.4. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=5, induktivni režim rada…….. 71

Tablica 6.5. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=10, induktivni režim rada…….. 71

Tablica 6.6. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=1, kapacitivni režim rada…….. 72

Tablica 6.7. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=5, kapacitivni režim rada…….. 72

Tablica 6.8. Kvaliteta odziva na impulsnu promjenu referentne vrijednosti napona generatora uz parametar b'=10, kapacitivni režim rada……. 73

Tablica 6.9. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=1, induktivni režim rada……. 73

Tablica 6.10. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=5, induktivni režim rada…… 74

Tablica 6.11. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=10, induktivni režim rada……. 74

Tablica 6.12. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=1, kapacitivni režim rada…… 75

Tablica 6.13. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=5, kapacitivni režim rada…….. 75

Tablica 6.14. Kvaliteta odziva za slučaj pojave kratkog spoja na sabirnici generatora uz parametar b'=10, kapacitivni režim rada……. 76

Tablica 6.15. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.4. 78

Tablica 6.16. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.5. 79

Tablica 6.17. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.6. 81

Tablica 6.18. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.7. 82

Tablica 6.19. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.8. 83

Tablica 6.20. Analiza kvalitete regulacije IDA stabilizatora prema odzivima sa slike 6.9. 84

Tablica 6.21. Parametri IDA stabilizatora korišteni u simulaciji promjene referentne vrijednosti napona generatora ……. 86

Tablica 6.22. Parametri stabilizatora PSS2A i PI regulatora napona [69]…….. 99

Tablica 6.23. Parametri IDA stabilizatora korišteni u simulaciji…… 100

Tablica 6.24. Svojstvene vrijednosti sustava……... 119

SAŽETAK

U doktorskoj disertaciji izvršena je sinteza nelinearnog IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja koji ujedinjuje automatski regulator napona i stabilizator elektromehaničkih njihanja. Polazište za izgradnju nelinearnog IDA stabilizatora elektromehaničkih njihanja je nelinearni model sinkronog generatora s istaknutim polovima trećeg reda čiji je izvod detaljno analiziran. Za sintezu IDA stabilizatora povoljno je matematički model sinkronog generatora zapisati PCH obliku. Osim poznatog postupka sinteze IDA regulatora, koji daje algoritam stabilizatora elektromehaničkih njihanja, implementirana je povratna veza po armaturnom naponu generatora, čime je ostvarena funkcionalnost automatskog regulatora napona. Nakon sinteze IDA stabilizatora dokazana je asiptotska stabilnost sustava koji se sastoji od sinkronog generatora s istaknutim polovima spojenog na električnu mrežu. Simulacije rada sustava s implementiranim IDA stabilizatorom elektromehaničkih njihanja načinjene su u programskom paketu Matlab. Za ispitivanje je korišten model sinkronog generatora s istaknutim polovima sedmog reda, a moguće je ispitati odziv sustava u slučaju promjene referentne veličine napona generatora, zatim u slučaju promjene mehaničke snage na osovini generatora te kratki spoj na generatorskoj sabirnici. Simulacijskim ispitivanjima je dokazano da je uspješno realizirano slijeđenje referentne vrijednosti napona generatora. Ispitivanjem kvalitete regulacije sustava u slučaju velikog poremećaja u smislu kratkog spoja na sabirnici generatora te u slučaju promjene radne točke generatora dokazana je robusnost dobivenog upravljačkog algoritma. Usporedbom kvalitete regulacije IDA stabilizatora i klasičnih linearnih regulatora utvrđeno je da klasični linearni regulatori pokazuju bolju kvalitetu regulacije u slučaju malih poremećaja. U slučaju pojave velikih poremećaja IDA stabilizator daje bolju kvalitetu regulacije u odnosu na klasične linearne regulatore. Također je dokazana stabilnost sustava s implementiranim upravljačkim algoritmom u kapacitivnom režimu rada.

ABSTRACT

In this doctoral thesis synthesis of nonlinear IDA power system stabilizer is made. IDA stabilizer also includes functionality of automatic voltage regulator. The basis for nonlinear IDA power system stabilizer constructing is salient pole synchronous generator nonlinear model of third order, synthesis of which is analyzed in detail. For IDA stabilizer synthesis it is convenient to represent synchronous generator mathematical model as PCH system. Apart from known procedure of IDA regulator synthesis that gives power system stabilizer algorithm, generator voltage feedback is also implemented and functionality of automatic voltage regulator is achieved. After IDA stabilizer synthesis, asymptotical stability of system which consists of salient pole synchronous generator connected to electrical power system is proven. Simulations of system with implemented IDA power system stabilizer are made in Matlab software. In simulations salient pole synchronous generator seventh order model is used for IDA stabilizer testing. Simulation model gives possibility of testing generator voltage reference value change, generator mechanical power change and occurrence of short circuit on generator bus voltage. Simulation results prove that generator voltage reference value tracking is successfully realized. Control algorithm robustness is proven by regulation quality testing in case of large disturbance, such as short circuit on generator bus and generator operating point change. Regulation quality comparison for IDA stabilizer and classical linear regulators show that linear regulators have better regulation quality in case of small disturbances. In case of large disturbances IDA stabilizer gives better regulation quality comparing to classical linear regulators. Stability of system with implemented IDA stabilizer in generator capacitive operating mode is also proven.

ŽIVOTOPIS

Vedrana Jerković Štil rođena je 7. veljače 1985. godine u Osijeku gdje je završila osnovnu školu i Prirodoslovno matematičku gimnaziju. Kao nagradu za odličan uspjeh i zapažene rezultate na natjecanjima iz matematike i fizike dobiva besprijemni upis na Elektrotehnički fakultet Osijek, kojeg upisuje akademske 2003/2004. godine. Na drugoj godini studija odabire smjer Automatizacija i procesno računarstvo. Diplomirala je 19. prosinca 2007. godine. Od 2008. godine zaposlena je na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku u zvanju asistentice. Na Fakultetu održava nastavu laboratorijskih i auditornih vježbi iz više predmeta vezanih uz električne strojeve i pogone. Sudjelovala je na više međunarodnih konferencija te je sumentorica na više završnih i diplomskih radova.