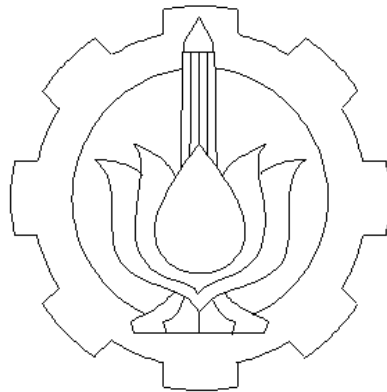


**PERANCANGAN KONTROL OPTIMAL ADAPTIF MELALUI
OBSERVER BEBAN PADA SISTEM PEMBANGKIT
TENAGA LISTRIK MESIN TUNGGAL YANG
TER-INTERKONEKSI**

**ISMIT MADO
NRP 2203 202 003**



**PROGRAM STUDI MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
S U R A B A Y A
2 0 0 6**

ABSTRAKSI

PERANCANGAN KONTROL OPTIMAL ADAPTIF MELALUI OBSERVER BEBAN PADA SISTEM PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK MESIN TUNGGAL YANG TER-INTERKONEKSI

Oleh : Ismit Mado / 2203 202 003
Dosen Pembimbing : 1. Dr. Ir. Moch. Rameli
2. Ir. Rusdhianto EAK, MT

Perbaikan performansi sistem dinamik pembangkit tenaga listrik dikarenakan terjadi suatu gangguan atau perubahan beban yang mengakibatkan (*frekuensi dan tegangan*) sistem menjadi tidak stabil yang berarti kehilangan sinkronisasi sistem. Untuk memperbaiki respons sistem dinamik tersebut digunakan metode pendekatan kontrol optimal dengan solusi meminimumkan kriteria indeks performansi kuadratik berbasis observer beban.

Dalam tesis ini akan diajukan metode *Kontrol Optimal Adaptif Berbasis Observer Beban* dengan harapan sistem akan bekerja optimal dalam arti sistem mampu dipertahankan stabil dan beradaptasi pada perubahan beban yang selalu ber-osilasi.

Dari simulasi dengan menerapkan kontrol optimal terlihat bahwa setelah diberi input gangguan yang sifatnya deterministik, sistem mengalami perbaikan respons menuju ke keadaan mantap (*steady state*) pada *range* yang diijinkan.

Kata Kunci : Model Generator, Kontrol Optimal, Kontrol Adaptif Berbasis Observer Beban.

ABSTRACT

AN OPTIMAL ADAPTIVE CONTROL DESIGN THROUGH LOAD OBSERVER ON INTERCONNECTED SINGLE POWER PLANT SYSTEM

By : Imit Mado / 2203 202 003

Counselors : Dr. Ir. Moch. Rameli

: Ir. Rusdhianto EAK, MT

The improvement of power plant dynamic system performance is made if there is a disturbance or load alteration that resulted in instability system, in which it is loss the synchronize system. To improve the response of dynamic system, it is use an optimal control method with the solution to minimum the quadratic performance index criteria that based on the load observer.

This thesis proposes Load Observer-Based Optimal Adaptive Control, in which the system will optimally work. It means that the system able to retain the stability and adapted to load alteration that has always oscillated.

Of simulation that applies the optimal control, it is seen that after gave the disturbance input that has deterministic trait, the system experiences improvement response toward steady state on the permitted range.

Keywords : Generator Model, Optimal Control, and Load Observer-Based Adaptive control.

DAFTAR ISI

Cover	i
Lembar Pengesahan	ii
Abstraksi	iii
Abstract	iv
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar	x
Daftar Tabel	xiii
Daftar Notasi	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	1
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Metode Pemecahan	2
1.5 Ruang Lingkup	3
1.6 Kontribusi Penelitian	3
BAB II MODEL LINIER DINAMIKA SISTEM PEMBANGKIT	
2.1 Pendahuluan	4
2.2 Komponen Utama Sistem Pembangkit	4
2.3 Model Linier Sistem	5
2.3.1 Jaringan Transmisi Tenaga Listrik	6
A. Persamaan Arus	7
B. Persamaan Daya	9
C. Persamaan Tegangan	10
2.3.2 Model Mesin Sinkron	11
A. Persamaan Torsi	12
B. Persamaan Medan	13
2.3.3 Pengaruh Interaksi Dinamik	14

A. Dinamika Mekanik Mesin- <i>i</i>	15
B. Pengaruh Interaksi Dinamik Pada Mesin <i>i</i>	16
C. Dinamika Elektrik/Reaktif Mesin <i>i</i>	18
D. Pengaruh Interaksi Reaktif Pada Mesin <i>i</i>	20
2.3.4 Sistem Eksitasi	22
2.3.5 Model Pembangkit Dan Sistem Pengendalinya (Governor)	23
2.4 Model Sistem Pembangkit Secara Keseluruhan	24
2.5 Pemodelan Beban	26
BAB III TEORI KONTROL OPTIMAL DAN OBSERVER BEBAN	
3.1 Algoritma Sistem	28
3.2 Persamaan Ruang Keadaan Sistem	28
3.3 Sinyal Kontrol	34
3.3.1 Regulator Kuadratik Linier	36
3.3.2 Penentuan Matriks Pembobot	39
3.4 Terkendali Dan Teramati	42
3.4.1 Terkendali (<i>controlability</i>)	42
3.4.2 Teramati (<i>obsevability</i>)	42
3.5 Regulator Problem Dengan Output Feedback	43
3.6 Disturbance Observer	45
3.7 Umpan Balik Estimasi Dalam Bentuk Persamaan Keadaan	47
BAB IV PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK MESIN TUNGGAL YANG TER- INTERKONEKSI	
4.1 Data Dan Analisa Perhitungan Parameter Jaringan	51
4.1.1 Data Jaringan Dan Pembangkit	51
A. Data Saluran Dan Beban Puncak	52
B. Data Generator	52
4.1.2 Perhitungan Aliran Daya	53
4.1.3 Reduksi Matriks Jaringan	54
4.1.4 Perhitungan Parameter Sistem Jaringan	54
4.2 Model Plant Pembangkit Tenaga Listrik	56

4.2.1 Analisa Kestabilan Pada Mesin 1	58
4.2.2 Analisa Kestabilan Pada Mesin 2	59
4.2.3 Analisa Kestabilan Pada Mesin 3	61
4.3 Perancangan Kontroller	63
4.3.1 Penguatan Umpan Balik Linier Kuadratik Regulator	63
4.3.1.1 Perancangan Kontrol Optimal Pada Mesin 1	65
4.3.1.2 Perancangan Kontrol Optimal Pada Mesin 2	67
4.3.1.3 Perancangan Kontrol Optimal Pada Mesin 3	69
4.3.2 Perancangan Gain State Feedback Observer	71
4.3.2.1 Perancangan Gain State Feedback Observer Pada Mesin 1	72
4.3.2.2 Perancangan Gain State Feedback Observer Pada Mesin 2	74
4.3.2.3 Perancangan Gain State Feedback Observer Pada Mesin 3	76
4.4 Perancangan Disturbance Observer Pada Mesin Tunggal	78
BAB V SIMULASI DAN ANALISA SINYAL KONTROL PADA	
PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK MESIN TUNGGAL YANG	
TER-INTERKONEKSI	
5.1 Simulasi DanAnalisa Tanpa Kontroller (open loop)	81
5.1.1 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 1	81
5.1.2 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 2	82
5.1.3 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 3	83
5.2 Simulasi Dan Analisa Perancangan Kontrol Optimal	84
5.2.1 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 1	84
5.2.2 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 2	85
5.2.3 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 3	86
5.3 Simulasi Dan Analisa Perancangan Kontrol Optimal Gain State Feedback Observer	87
5.3.1 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 1	87
5.3.2 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 2	88
5.3.3 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 3	89
5.4 Simulasi Dan Analisa Perancangan KOnترول Optimal Gain State Feedback Observer Dengan Disturbance Observer Pada Mesin 1	

(Mesin Tunggal)	90
5.5 Simulasi Dan Analisa Plant Tanpa Kontroller Yang Ter-interkoneksi	92
5.5.1 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 1	92
5.5.2 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 2	93
5.5.3 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 3	94
5.6 Simulasi Dan Analisa Plant Dengan Kontrol Optimal Pada Jaringan Pembangkit Tenaga Listrik Yang Ter-interkoneksi	95
5.6.1 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 1	96
5.6.2 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 2	97
5.6.3 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 3	97
5.7 Simulasi Dan Analisa Plant Dengan Kontrol Optimal Gain State Feedback Observer Pada Jaringan Pembangkit Tenaga Listrik Ter- interkoneksi	98
5.7.1 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 1	98
5.7.2 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 1	100
5.7.3 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 1	101
5.8 Simulasi Dan Analisa Perancangan Kontrol Optimal Gain State Feedback Observer Dengan Disturbance Observer Pada Mesin 1 (Mesin Tunggal) Ter-interkoneksi	102
5.8.1 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 1	102
5.8.2 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 2	103
5.8.3 Simulasi DanAnalisa Pada Mesin 3	104
BAB VI KESIMPULAN	
6.1. Kesimpulan	106
6.2. Saran	107
DAFTAR PUSTAKA	108
LAMPIRAN I	
LAMPIRAN II	

Contents

Cover	i
Approval Page	ii
Abstraksi	iii
Abstract	iv
Preface	v
Contents	vi
List of Figures	x
List of Tables	xiii
List of Notations	xiv

CHAPTER I INTRODUCTION

1.1 Background	1
1.2 Problems Formulation	1
1.3 Purposes of Study	2
1.4 Resolving Methods	2
1.5 Scope	3
1.6 Contribution	3

CHAPTER II DYNAMIC LINEAR MODEL OF GENERATOR SYSTEM

2.1 Introduction	4
2.2 Generating System's Primary Components	4
2.3 System Linear Model	5
2.3.1 Power Transmission Network	6
A. Current Equation	7
B. Force Equation	9
C. Voltage Equation	10
2.3.2 Synchronic Engine Model	11
A. Torque Equation	12
B. Field Equation	13
2.3.3 Dynamic Interaction Effects	14
A. Mechanical Dynamic <i>i</i> -Engine	15

B. Dynamic Interaction Effects on <i>i</i> -Engine	16
C. Electrical/Reactive Dynamic of <i>i</i> -Engine	18
D. Dynamic Reactive Effects on <i>i</i> -Engine	20
2.3.4 Excitation System	22
2.3.5 Generator Model and Its Governor	23
2.4 Entire Generator System Model	24
2.5 Load Modeling	26
CHAPTER III OPTIMAL CONTROL THEORY AND LOAD OBSERVER	
3.1 System Algorithm	28
3.2 Space Equation of System State	28
3.3 Control Signal	34
3.3.1 Linear Quadratic Regulator	36
3.3.2 Determination of Weighting Matrix	39
3.4 Controllability and Observability	42
3.4.1 Controllability	42
3.4.2 Observability	42
3.5 Problem Regulator with Output Feedback	43
3.6 Disturbance Observer	45
3.7 Estimation Feedback by the Means of State Space	47
CHAPTER IV CONTROL SYSTEM DESIGN ON SINGLE ENGINE	
INTERCONNECTED POWER GENERATOR	
4.1 Data and Measurement Analysis on Network Parameter	51
4.1.1 Generator and Network Data	51
A. Peak Load and Channel Data	52
B. Generator Data	52
4.1.2 Force Flow Calculation	53
4.1.3 Reduction of Matrix Network	54
4.1.4 Measurement on Network System Parameters	54
4.2 Plant Model of Power Generator	56
4.2.1 Stability Analysis on Engine-1	58
4.2.2 Stability Analysis on Engine-2	59
4.2.3 Stability Analysis on Engine-3	61

4.3	Controller Design	63
4.3.1	Amplification on Linear Quadratic Feedback Regulator's	63
4.3.1.1	Optimal Control Design on Engine-1	65
4.3.1.2	Optimal Control Design on Engine-2	67
4.3.1.3	Optimal Control Design on Engine-3	69
4.3.2	Gain State Feedback Observer Design	71
4.3.2.1	Gain State Feedback Observer Design on Engine-1	72
4.3.2.2	Gain State Feedback Observer Design on Engine-2	74
4.3.2.3	Gain State Feedback Observer Design on Engine-3	76
4.4	Disturbance Observer Design on Single Engine	78

CHAPTER V SIMULATION AND ANALYSIS OF SIGNAL'S CONTROL ON INTERCONNECTED SINGLE POWER PLANT SYSTEM

5.1	Simulation and Analysis without Controller (open loop)	
5.1.1	Simulation and Analysis on Engine-1	81
5.1.2	Simulation and Analysis on Engine-2	81
5.1.3	Simulation and Analysis on Engine-3	82
5.2	Simulation and Analysis of Optimal Control Design	83
5.2.1	Simulation and Analysis on Engine-1	84
5.2.2	Simulation and Analysis on Engine-2	84
5.2.3	Simulation and Analysis on Engine-3	85
5.3	Simulation and Analysis on Optimal Control Design of Optimal Gain State Feedback Observer	86
5.3.1	Simulation and Analysis on Engine-1	87
5.3.2	Simulation and Analysis on Engine-2	87
5.3.3	Simulation and Analysis on Engine-3	88
5.4	Simulation and Analysis on Optimal Control Design of Optimal Gain State Feedback Observer with Disturbance Observer on Engine-1 (Single Engine)	89
5.5	Simulation and Analysis on Plant without Interconnected Controller	90
5.5.1	Simulation and Analysis on Engine-1	92
5.5.2	Simulation and Analysis on Engine-2	92

5.5.3 Simulation and Analysis on Engine-3	93
5.6 Simulation and Analysis on Plant with Optimal Control on Interconnected Power Generator Network	94
5.6.1 Simulation and Analysis on Engine-1	95
5.6.2 Simulation and Analysis on Engine-2	96
5.6.3 Simulation and Analysis on Engine-3	97
5.7 Simulation and Analysis on Plant with Optimal Control of Gain State Feedback Observer on Interconnected Power Generator Network	97
5.7.1 Simulation and Analysis on Engine-1	98
5.7.2 Simulation and Analysis on Engine-2	98
5.7.3 Simulation and Analysis on Engine-3	100
5.8 Simulation and Analysis on Optimal Control of Gain State Feedback Observer Design with Disturbance Observer on Interconnected Engine 1 (Single Engine)	101
5.8.1 Simulation and Analysis on Engine-1	102
5.8.2 Simulation and Analysis on Engine-2	102
5.8.3 Simulation and Analysis on Engine-3	103
CHAPTER VI CONCLUSIONS	104
6.1. Conclusions	
6.2. Suggestions	106
REFERENCES	107
APPENDIX I	108
APPENDIX II	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejalan dengan perkembangan dan kemajuan teknologi dewasa ini, dalam merencanakan, menyediakan dan mengoperasikan sistem pembangkit tenaga listrik dituntut tidak saja efisiensi yang tinggi, tetapi juga tingkat kestabilan sistem yang tinggi. Salah satu yang harus dipenuhi untuk mendapatkan sistem pembangkit tenaga listrik yang berkualitas tinggi adalah mempertahankan tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan oleh pusat-pusat beban supaya tetap stabil. Kestabilan sistem pembangkit tenaga listrik adalah bila suatu mesin dapat bekerja secara normal pada besar perubahan beban yang terjadi. Dengan adanya perubahan beban berakibat terjadinya perubahan frekuensi dan tegangan, sehingga kestabilan sistem akan terganggu.

Di mana dalam sistem ketenagalistrikan, dikenal adanya gangguan yang bersifat transien (seperti: putus jaringan atau hubungan singkat), dan ada juga yang bersifat dinamik dimana adanya gangguan berupa perubahan beban yang kecil^[2].

1.2 Perumusan Masalah

Tujuan studi perbaikan penampilan dinamik ini untuk mengetahui kinerja sistem maupun respon dinamik sistem bila terjadi gangguan yang bersifat dinamik, dalam arti mempelajari sifat variabel keadaan sistem di daerah titik kerjanya, dan dalam kenyataannya nilai variabel tersebut selalu berubah di sekitar titik kerjanya.

Usaha-usaha untuk memperbaiki kinerja dinamik mesin tunggal akibat perubahan beban telah dilakukan^[3,4]. Dalam studi ini dibicarakan penerapan teori kontrol optimal yang ber kriteria indeks kinerja minimum dari penyimpangan variabel keadaan. Kendali optimal yang dibangun sebagai sebuah pengembangan perbaikan kinerja dinamik, menerapkan konsep umpan balik observability (*optimal state feedback observer*) terhadap perubahan dinamik variabel keadaan berbasis observer beban, dimana karakteristik pengontrol dapat dipertahankan pada kinerja optimalnya.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang controller umpan balik optimal dengan state observer melalui pendekatan keadaan mantap (*steady state*) pada sisi turbin dan sisi eksitasi berbasis observer beban. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan alternatif perbaikan kinerja dinamik sistem jaringan tenaga listrik terhadap perubahan gangguan dinamik.

1.4 Metode Pemecahan

Metode pemecahan yang ditempuh dalam melakukan penelitian ini adalah :

1. Membentuk model matematik sistem pembangkit yang meliputi turbin dan pengendaliannya, mesin sinkron, jaringan dan sistem eksitasi.
2. Menyusun model dalam bentuk persamaan keadaan sistem
3. Mencari penguatan umpan balik optimal dan penguatan optimal state feedback observer.
4. Mengidentifikasi perubahan parameter *plant* nominal pada sisi eksitasi dan sisi turbin akibat perubahan beban berbasis observer beban (*disturbance observer*).

1.5 Ruang Lingkup Masalah

Karena persoalan perbaikan penampilan dinamik sistem tenaga adalah sangat luas, sangat perlu membatasi persoalan dalam penelitian ini. Batasan permasalahan diberikan sebagai berikut :

1. Model sistem mengacu pada model mesin tunggal, dimana dalam suatu pembangkit dengan mesin yang lebih dari satu diambil satu unit generator identik untuk mewakili satu pembangkit. Sehingga multimesin dimaksudkan sebagai interkoneksi beberapa pembangkit.
2. Perubahan beban adalah perubahan dinamik gangguan kecil berupa variasi beban dari kondisi dasar beban puncak.
3. Mesin yang dihubungkan bus tak hingga mempunyai frekuensi konstan.
4. Tidak memperhatikan unsur *noise*, yaitu gangguan-gangguan yang terjadi diluar sistem, misalnya gangguan pengukuran dan penambahan beban permanen.
5. Variabel-variabel mesin diperhitungkan berdasarkan beban puncak sistem.
6. Simulasi dilakukan dengan menggunakan program bantu Matlab.

1.6 Kontribusi Penelitian

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam perbaikan kinerja sistem tenaga listrik mesin tunggal dengan penerapan umpan balik optimal dalam arti sistem mampu adaptasi terhadap perubahan tegangan dan frekuensi akibat perubahan beban.

BAB II
MODEL LINIER DINAMIKA
SISTEM PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK

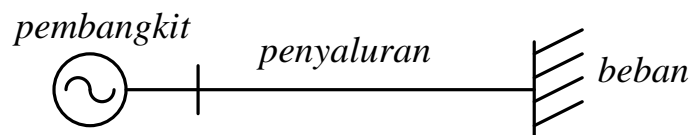
2.1 Pendahuluan

Dalam analisa sistem tenaga listrik mesin tunggal yang ter-interkoneksi akibat perubahan dinamik beban akan berpengaruh terhadap mesin lainnya. Hal ini terjadi karena adanya interaksi antara mesin yang satu dengan mesin lainnya terhubung secara elektrik melalui suatu jaringan.

Untuk pemodelan sistem tenaga listrik mesin tunggal ini dapat diturunkan melalui persamaan arus, daya elektrik, torsi, medan, regulator tegangan dan sistem eksitasi. Selanjutnya untuk studi interaksi dinamik akan dipelajari melalui interaksi mesin-mesin sinkron dalam sistem tersebut.

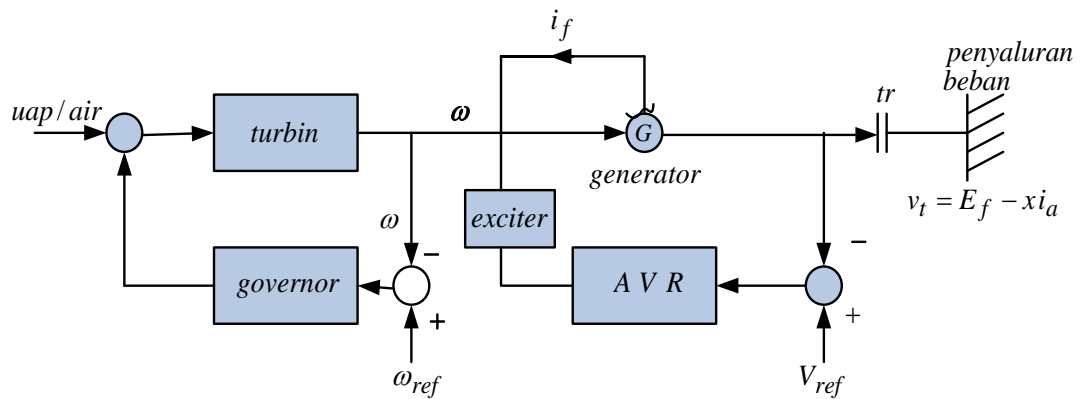
2.2 Komponen Utama Sistem Pembangkit

Secara garis besar sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3 bagian utama, sisi sistem pembangkit, penyaluran dan beban sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.1 berikut ini.



Gambar 2.1 Bagian utama Sistem Tenaga Listrik

Jika pada sisi beban terjadi perubahan permintaan (perubahan kecil) maka pada sistem juga akan terjadi perubahan pada tegangan dan/atau frekuensi. Perubahan ini harus diantisipasi oleh sistem kontrol untuk mengembalikan pada keadaan kestabilan yang baru. Sistem kontrol ini terdapat pada sisi pembangkit. Secara garis besar sistem kontrol dari pembangkit adalah seperti gambar 2.2^[5] berikut :



Gambar 2.2 Sistem kontrol dari pembangkit

Governor adalah kontrol nilai torsi mekanik yang merupakan input bagi generator dan AVR (*Automatic Voltage Generator*) pada eksitasi adalah kontrol keluaran generator yang akhirnya sampai pada beban. Jika terjadi perubahan kecil pada beban maka kontrol eksitasi ini akan berfungsi sebagai umpan balik untuk mencapai keseimbangan yang baru.

Dinamika sistem tenaga listrik diartikan bila terjadinya perubahan-perubahan kecil pada beban, yang akan menyebabkan perubahan kecepatan sudut pada rotor generator dan tegangan terminal generator. Kecepatan sudut rotor generator akan berkisar pada kecepatan sinkron generator dan tegangan generator akan berkisar pada tegangan nominalnya.

Suatu pembangkit/generator dikatakan stabil, jika saat terjadi perubahan beban kecepatan rotor akan kembali pada kecepatan sinkron dan tegangannya berada pada tegangan nominal yang diijinkan.

2.3 Model Linier Sistem

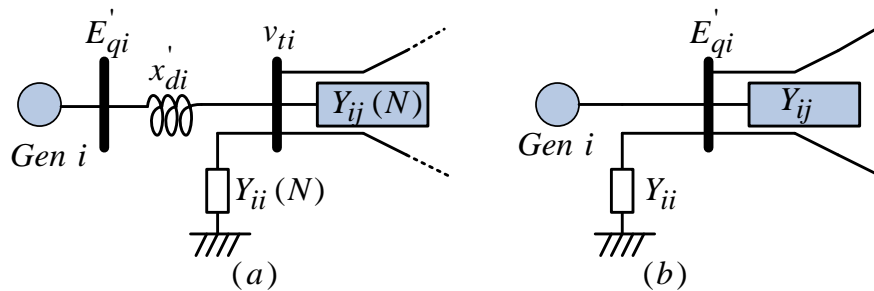
Model linier sistem pembangkit listrik berbasis pemodelan Park^[2] dengan asumsi-asumsi sebagai berikut :

1. Tahanan stator diabaikan.

2. Kondisi sistem dianggap seimbang dan kejenuhan inti pada generator diabaikan.
3. Beban dianggap sebagai beban statik dalam arti beban tenaga listrik baik yang berupa beban lokal maupun beban bukan lokal yang harga impedansinya dianggap tetap^[2].

2.3.1 Jaringan Transmisi Tenaga Listrik

Disini akan disuguhkan model jaringan energi listrik mesin sinkron, dimana model interaksi dinamik mesin sinkron ini mengacu pada model tunggal dengan bus tak hingga yang diperkenalkan oleh De Mello dan Concordia^[6], yang selanjutnya dikembangkan oleh Hamdy A. M. Mousa dan Y. N. Yu menjadi model multimesin yang telah menjadi standar IEEE.



Gambar 2.3 Jaringan sistem multimesin dan ekivalennya

Dimana gambar (a) menunjukkan hubungan tegangan terminal mesin-*i* ke jaringan. Dan gambar (b) menunjukkan hubungan terminal eliminasi, dalam arti tegangan generator E'_{qi} menjadi tegangan terminal pada bus^[7]. Terminal-terminal mesin-*i* ditunjukkan pada gambar 2.3, E'_{qi} digunakan untuk studi aliran beban sehingga arus dapat dihitung sebagai berikut.

$Y_{ij}(N)$ adalah elemen matrik admitansi jaringan ke ij , E'_{qi} adalah tegangan generator ke- i pada sumbu q (*quadrature*), v_{ti} adalah tegangan pada bus generator ke- i , $Y_{ii}(N)$ adalah admitansi saluran ke tanah (*ground*) pada sisi bus ke- i , dan x'_{di} adalah reaktansi transient generator ke- i . Maka hubungan antar variabel tersebut dapat ditulis dalam bentuk :

A. Persamaan Arus

Dimana arus adalah merupakan elemen persamaan dasar dari interaksi dinamik sistem tenaga listrik, secara matematis sederhana arus mesin sinkron berhubungan dengan tegangan transien E'_{qi} disamping reaktansi transien x'_{di} . Ambil matrik admitansi jaringan Y_N .

$$\begin{aligned} i &= Y_N v \\ E'_{qi} &= v + [jx'_i] i \end{aligned} \quad (2.1)$$

i : arus jaringan, Y_N : matrik admitansi jaringan, v : tegangan bus

Dan
$$i = Y E'_{qi}$$

Dengan
$$Y = [Y_N^{-1} + [jx'_i]]^{-1} \quad (2.2)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & -Y_{1i} & \dots & -Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{i1} & \dots & Y_{ii} & \dots & -Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{n1} & \dots & -Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Dan
$$Y_{ii} = Y_{ii} \angle \theta_{ii} = Y_{1i} + \sum_{j=1} Y_{ij} = G_{ii} + jB_{ii} = y_{ii} \varepsilon^{-j\beta_{ii}}$$

$$Y_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} = y_{ij} \varepsilon^{-j\beta_{ij}} = \frac{1}{(z_{ij} \varepsilon^{j\beta_{ij}})} \quad (2.3)$$

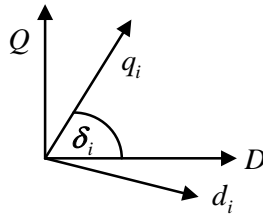
Dimana untuk selanjutnya,

G_{ii} : bagian riil admitansi mesin i

B_{ii} : bagian imajiner admitansi mesin i

i, v, E'_{qi} adalah vektor dan $[j x'_{di}]$ adalah matrik diagonal dengan elemen-elemen $j x'_{d1}, \dots, j x'_{di}$. Selanjutnya dengan konversi ke dalam sumbu bersama

$D-Q$ untuk semua mesin, dan dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.4 Koordinat $d-q$ masing-masing mesin i dan koordinat bersama $D-Q$

Maka arus mesin i didalam koordinat tersebut adalah :

$$i_i = (G_{ii} + jB_{ii}) E'_{qi} \varepsilon^{j\delta_i} - \sum_{j \neq i} y_{ij} \varepsilon^{-\beta_{ij}} E'_{qj} \varepsilon^{j\delta_j} \quad (2.4)$$

Dengan referensi koordinat masing-masing mesin $d-q$, maka komponen arus adalah :

$$\begin{aligned} i_{di} &= \text{Re}(i_i \varepsilon^{j(\frac{\pi}{2} - \delta_i)}) \\ &= B_{ii} E'_{qi} - \sum_{j \neq i} E'_{qj} y_{ij} S_{ij} \\ i_{qi} &= \text{Im}(i_i \varepsilon^{j(\frac{\pi}{2} - \delta_i)}) \\ &= G_{ii} E'_{qi} - \sum_{j \neq i} E'_{qj} y_{ij} C_{ij} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dengan

$$S_{ij} \underline{\Delta} \dots \sin(\beta_{ij} + \delta_{ij})$$

$$C_{ij} \underline{\Delta} \dots \cos(\beta_{ij} + \delta_{ij})$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$$

Bentuk linier menjadi :

$$\Delta i_{di} = - \sum_{j \neq i} E'_{qj} y_{ij} C_{ij} \Delta \delta_{ij} - B_{ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i} y_{ij} S_{ij} \Delta E'_{qj} \quad (2.6)$$

$$\Delta i_{qi} = - \sum_{j \neq i} E'_{qj} y_{ij} S_{ij} \Delta \delta_{ij} + G_{ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i} y_{ij} C_{ij} \Delta E'_{qj} \quad (2.7)$$

Δi_{di} : perubahan arus sumbu d mesin i

Δi_{qi} : perubahan arus sumbu q mesin i

$\Delta \delta_i$: perubahan besaran sudut antara sumbu q mesin i dengan sumbu referensi

D (*direct*)

B. Persamaan Daya

Daya output mesin- i adalah

$$P_i = \text{Re}(i_i^* E'_{qi} \varepsilon^{j\delta_i})$$

$$= G_{ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i} E'_{qi} E'_{qj} y_{ij} C_{ij} \quad (2.8)$$

Dengan menganggap torsi elektrik per unit adalah sama dengan daya per unit maka

$$\Delta T_{ei} = \Delta P_i = K_{1,ii} \Delta \delta_i - \sum_{j \neq i} K_{1,ij} \Delta \delta_j + K_{2,ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i} K_{2,ij} \Delta E'_{qj} \quad (2.9)$$

Dengan :

$$K_{1,ii} = \sum_{j \neq i} K_{1,ij}$$

$$\begin{aligned}
K_{1,ij} &= E'_{qi} E'_{qj} y_{ij} S_{ij} \\
K_{2,ii} &= 2G'_{ii} E'_{qi} - \sum_{j \neq i} E'_{qj} y_{ij} C_{ij} \\
K_{2,ij} &= E'_{qi} E'_{qj} y_{ij} C_{ij}
\end{aligned} \tag{2.10}$$

C. Persamaan Tegangan

Tegangan terminal mesin i pada koordinat d - q dan dalam bentuk linier adalah :

$$v_{ii} \Delta v_{ti} = v_{di} \Delta v_{di} + v_{qi} \Delta v_{qi} \tag{2.11}$$

Dan tegangan pada koordinat d - q dari persamaan (2.11) untuk mesin- i adalah :

$$\begin{aligned}
\Delta v_{di} &= x'_{di} \Delta i_{qi} \\
\Delta v_{qi} &= \Delta E'_{qi} - x'_{di} \Delta i_{qi}
\end{aligned} \tag{2.12}$$

Substitusi persamaan (2.6) dan (2.7) ke dalam persamaan (2.12) dan hasilnya dimasukkan ke dalam persamaan (2.11)

$$\Delta v_{ti} = K_{5,ii} \Delta \delta_i - \sum_{j \neq i} K_{5,ij} \Delta \delta_j + K_{6,ii} \Delta E'_{qi} + \sum_{j \neq i} K_{6,ij} \Delta E'_{qj} \tag{2.13}$$

Dengan
$$K_{5,ii} = \sum_{j \neq i} K_{5,ij}$$

$$K_{5,ij} = E'_{qi} y_{ij} \cos(\beta_{ij} + \delta_{ij} - \gamma_i)$$

$$K_{6,ii} = \cos \gamma_i - x'_i y'_{ii} \sin(\beta_{ii} - \gamma_i)$$

$$K_{6,ij} = x'_i y'_{ij} \sin(\beta_{ij} + \delta_{ij} - \gamma_i)$$

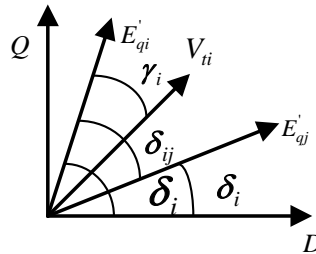
$$\gamma_i = \tan^{-1}(v_{di}/v_{qi})$$

β_{ij} : sudut admitansi antara mesin i dan j

γ_i : besar sudut antara E'_{qi} dan v_{ti}

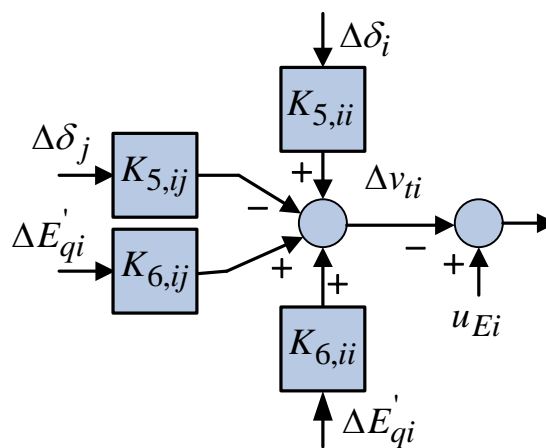
$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$$

Sudut fasa γ_i didefinisikan seperti gambar dibawah ini.



Gambar 2.5 Diagram phasor tegangan

Secara lengkap elemen medan, blok diagram persamaan regulator tegangan sebagai berikut :



Gambar 2.6 Blok diagram interaksi dinamik regulator tegangan mesin i

$$K_{5,ij} \neq K_{5,ji}, \dots \dots K_{5,ij} > 0, \dots \dots K_{5,ii} > 0$$

$$K_{6,ij} \neq K_{6,ji}, \dots \dots K_{6,ij} > 0, \dots \dots K_{6,ii} > 0$$

2.3.2 Model Mesin Sinkron

Sebagaimana yang telah dijelaskan diatas, model mesin sinkron ini mengacu pada model mesin tunggal dengan bus tak hingga yang diperkenalkan oleh De Mello dan Concordia^[6].

A. Persamaan Torsi

Persamaan linier torsi mesin- i adalah :

$$\begin{aligned}\Delta \dot{\delta}_i &= \omega_o \Delta \omega_i \\ \Delta \dot{\omega}_i &= \frac{i}{M_i} (\Delta T_{mi} - \Delta T_{ei} - D_i \Delta \omega_i)\end{aligned}\quad (2.14)$$

ΔT_{mi} , ΔT_{ei} , $\Delta \omega_i$, D_i , $\Delta \omega_o$ dan M_i , secara berurutan masing-masing adalah perubahan torsi mekanik, perubahan torsi elektrik, perubahan kecepatan sudut, kontanta peredaman, kecepatan sinkron dan konstanta inersia pada mesin i . Dari persamaan (2.9) diperoleh :

$$\Delta T_{ei} = K_{1,ii} \Delta \delta_i + K_{2,ii} \Delta E'_{qi} - \sum_{j \neq i} K_{1,ij} \Delta \delta_j - \sum_{j \neq i} K_{2,ij} \Delta E'_{qj} \quad (2.15)$$

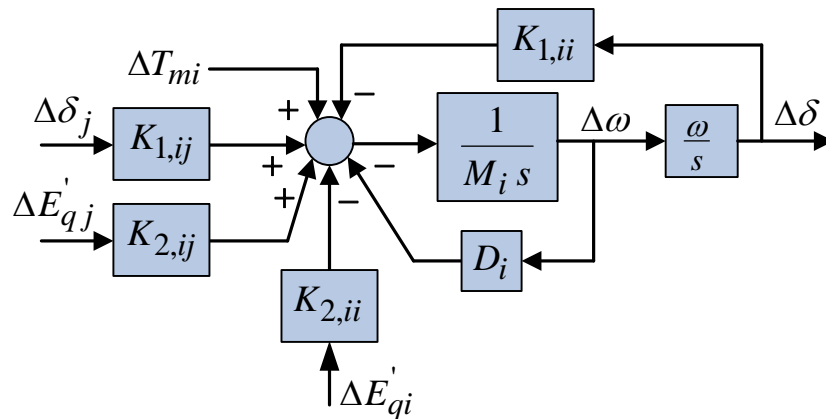
Dengan
$$K_{1,ii} = \sum_{j \neq i} K_{1,ij}$$

$$K_{1,ij} = E'_{qi} E'_{qj} y_{ij} \sin(\beta_{ij} + \gamma_{ij})$$

$$K_{2,ii} = 2 E'_{qi} G_{ii} - \sum_{j \neq i} E'_{qj} y_{ii} \cos(\beta_{ii} + \delta_{ii})$$

$$K_{2,ij} = E'_{qi} E'_{qj} y_{ij} \cos(\beta_{ij} + \gamma_{ij})$$

Blok diagram digambarkan seperti berikut :



Gambar 2.7 Blok diagram interaksi dinamik mekanis mesin- i

$$K_{1,ij} \neq K_{1,ji}, \dots, K_{1,ij} > 0, \dots, K_{1,ii} > 0$$

$$K_{2,ij} \neq K_{2,ji}, \dots, K_{2,ij} > 0, \dots, K_{2,ii} > 0$$

B. Persamaan Medan

Persamaan medan mesin i dalam bentuk linier dapat dituliskan sebagai berikut :

$$T'_{doi} \Delta \dot{E}'_{qi} = \Delta v_{fi} - \Delta E'_{qi} - (x_{di} - x'_{di}) \Delta i_{di} \quad (2.16)$$

x_{di} : reaktansi sumbu d mesin i

Δi_{di} : perubahan arus sumbu d mesin i

T'_{doi} : konstanta waktu transien mesin i

Δv_{fi} : perubahan tegangan eksitasi mesin i

Substitusi persamaan (2.6) ke dalam persamaan (2.16) memberikan :

$$T'_{doi} \Delta \dot{E}'_{qi} = \Delta v_{fi} - C_{3,ii} \Delta E'_{qi} + K_{4,ii} \Delta \delta_i + \sum_{j \neq i} C_{3,ij} \Delta E'_{qj} - \sum_{j \neq i} K_{4,ij} \Delta \delta_j \quad (2.17)$$

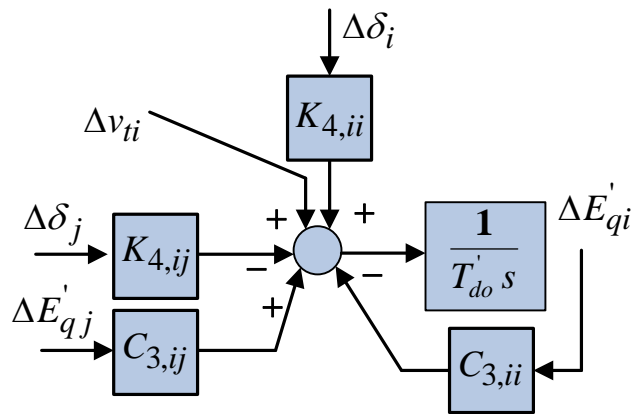
Dengan $C_{3,ii} = 1 - (x_{di} - x'_{di}) B_{ii}$

$$C_{3,ij} = (x_{di} - x'_{di}) y_{ij} S_{ij} \quad (2.18)$$

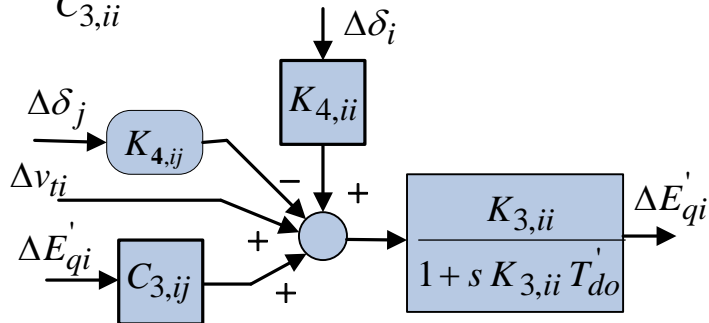
$$K_{4,ii} = \sum_{j \neq 1} K_{4,ij}$$

$$K_{4,ij} = (x_{di} - x'_{di}) E'_{qi} y_{ij} C_{ij}$$

Blok diagram interaksi dinamik mesin- i elemen persamaan medan adalah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.8 berikut ini :



Dengan $K_{3,ii} = \frac{1}{C_{3,ii}}$, maka gambar dapat disederhanakan menjadi,



Gambar 2.8 Blok diagram interaksi dinamik mesin i elemen persamaan medan

2.3.3 Pengaruh Interaksi Dinamik

Dinamika mesin tunggal karena adanya pengaruh perubahan dinamik yang diakibatkan oleh beban dan adanya pengaruh interaksi dengan mesin lain (mesin j) terhadap mesin i , pada dasarnya menyebabkan terjadinya proses dinamika mesin yang dibagi menjadi 2 (dua) keadaan, yaitu :

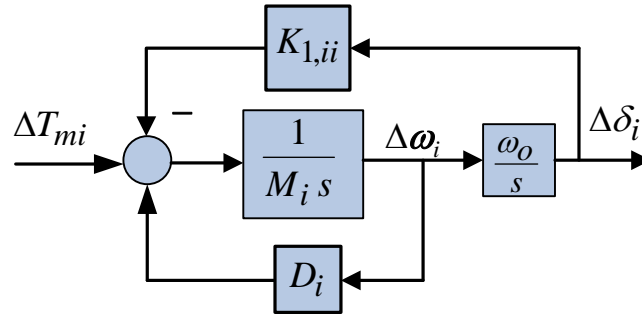
- dinamika mekanik
- dinamika elektrik

kedua dinamika itu saling berpengaruh antara satu dan lainnya. Sedang dinamika elektrik pada dasarnya terbagi menjadi 2 (dua)^[10] yaitu :

- adanya reaksi jangkar
- perubahan tegangan terminal generator

A. Dinamika Mekanik Mesin-i

Fungsi transfer loop mekanik mesin-i tanpa memperhatikan interaksi dinamik mesin yang lain, diberikan :



Gambar 2.9 Loop mekanik mesin-i

$$\frac{\Delta\delta_i}{\Delta T_{mi}} = \frac{\omega_o}{M_i s^2 + D_i s + K_{1,ii} \omega_o} \quad (2.19)$$

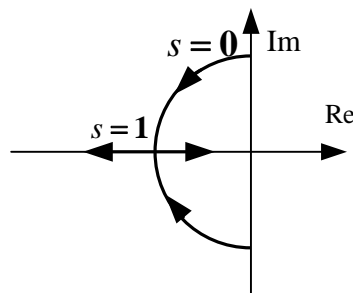
Persamaan karakteristik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$s^2 + 2\xi_{ni} \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2 = 0$$

Dimana $\omega_{ni}^2 = \omega_o \frac{K_{1,ii}}{M_i}$, $\xi_{ni} = \frac{D_i}{2\omega_{ni} M_i}$ (2.20)

Maka fungsi transfernya dapat ditulis sebagai berikut :

$$\frac{\Delta\delta_i}{\Delta T_{mi}} = \frac{1}{K_{1,ii}} \frac{\omega_{ni}^2}{s^2 + 2\xi_{ni} \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2} \quad (2.21)$$



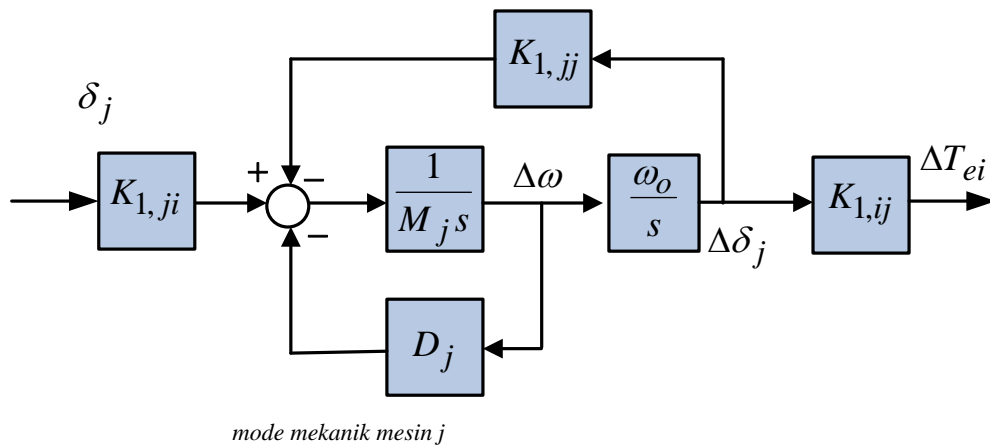
Gambar 2.10 Root locus loop mekanik mesin i dengan ω_{ni} konstan

Persamaan ini dikenal dengan persamaan karakteristik yang selalu mempunyai 2 (dua) akar kompleks sekawan, yang mempunyai tempat kedudukan setengah lingkaran untuk ω_{ni} konstan, yaitu :

B. Pengaruh Interaksi Dinamik Pada Mesin i

Pada dasarnya dinamika mekanik dengan adanya perubahan beban terjadi perubahan kecepatan dan sudut daya rotor. Dan dengan memperhatikan pengaruh mesin j terhadap mesin i , proses perhitungan dapat dilakukan dengan cara yang sama dengan perancangan konvensional kontrol eksitasi dan mengambil $s = j \omega_{ni}$, yang menyatakan sebagai frekuensi osilasi tanpa teredam pada frekuensi tersebut.

Fungsi alih loop mekanik mesin i dengan adanya pengaruh dinamik mesin j adalah :



Gambar 2.11 Interaksi antara mode-mode mekanik

Dari gambar 2.11 di atas fungsi alih loop interaksi adalah :

$$\frac{\Delta T_{ei}}{\Delta \delta_i} = - \frac{K_{1,ij} K_{1,ji}}{K_{1,jj}} \frac{\omega_{nj}^2}{s^2 + 2 \xi_{nj} \omega_{nj} s + \omega_{nj}^2} \quad (2.22)$$

Persamaan karakteristik dapat dituliskan sebagai berikut :

$$s^2 + 2 \xi_{ni} \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2 = 0$$

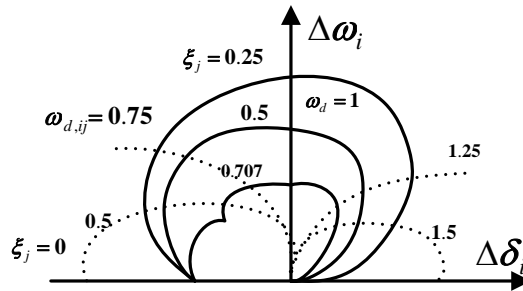
Dengan :
$$\omega_{nj}^2 = \frac{\omega_o K_{1,jj}}{M_j} \quad ; \xi_{nj} = \frac{1}{2 \omega_{nj}} \frac{D_j}{M_j}$$

Rasio frekuensi natural mode mekanik adalah :

$$\omega_d \underline{\underline{=}} \omega_{ni} / \omega_{nj}$$

Substitusi ke dalam persamaan (2.20) menjadi,

$$\frac{\Delta T_{ei}}{\Delta \delta_i} = - \frac{K_{1,ij} K_{1,ji}}{K_{1,jj}} \frac{1}{(1 - \omega_{ij}^2) + j 2 \omega_{ij} \xi_{nj}} \quad (2.23)$$



Gambar 2.12 Tempat kedudukan perubahan torsi elektrik interaksi dinamik mode mekanik mesin-j.

Gambar 2.12 menunjukkan tempat kedudukan perubahan torsi elektrik mode mekanik interaksi dinamik mesin-j yang digambarkan pada bidang $\Delta \delta_i - \Delta \omega_i$ dan gambar di atas sudah dinormalisasikan dengan $K_{1,ij} K_{1,ji} / K_{1,jj} = 1$.

Dari gambar 2.11 terlihat bahwa pada saat mesin i mempunyai redaman dimana redaman mesin-j positif akan berakibat munculnya redaman positif mesin- i dan redaman merupakan fungsi ω_d .

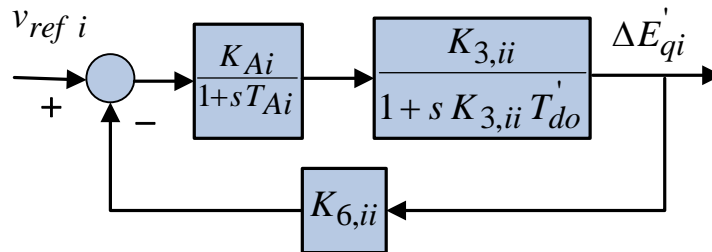
- Jika koefisien redaman mesin- j adalah kecil, baik positif maupun negatif, kontribusi torsi sinkronisasi mesin- j terhadap mesin- i akan positif jika $\omega_d > 1$ dan negatif jika $\omega_d < 1$.
- Koefisien kopling

$$K_{1,ij} K_{1,ji} = \frac{1}{2} (E'_{qi} E'_{qj} y_{ij})^2 [\cos 2\delta_{ij} - \cos 2\beta_{ij}] \quad (2.24)$$

Interaksi dinamik akan mempunyai harga maksimum saat $\delta_{ij} = 0$, dan proposional terhadap kuadrat jaringan y_{ij} .

C. Dinamika Elektrik/Reaktif

Dalam hal ini terdapat 2 (dua) mode yaitu mode regulator tegangan (perubahan tegangan terminal) dan exciter (perubahan reaksi jangkar) sebagai dinamika reaktif yang menyebabkan pengaruh $\Delta v_{ref \rightarrow i}$ pada $\Delta E'_{qi}$.



Gambar 2.13 Loop elektrik mesin- i

Fungsi transfer loop elektrik mesin- i adalah :

$$\frac{\Delta E'_{qi}}{\Delta v_{ref \rightarrow i}} = \frac{K_{3,ii} K_{Ai}}{(1 + s K_{3,ii} T'_{do})(1 + s T_{Ai}) + K_{3,ii} K_{6,ii} K_{Ai}} \quad (2.25)$$

Persamaan karakteristik dapat dituliskan sbagai berikut :

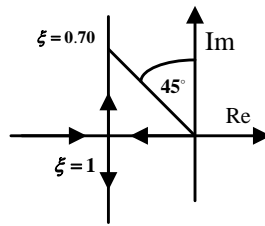
$$s^2 + 2 \xi_{ri} \omega_{ri} s + \omega_{ri}^2 = 0$$

Dimana ω_{ri} adalah frekuensi alamiah dari model elektrik/reaktif.

$$\omega_{ri} = \frac{1 + K_{3,ii} K_{6,ii} K_{Ai}}{K_{3,ii} T'_{do} T_{Ai}}, \quad \xi_{ri} = \frac{1}{2\omega_{ri}} \left(\frac{1}{T_{Ai}} + \frac{1}{K_{3,ii} T'_{doi}} \right)$$

Fungsi transfer dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\frac{\Delta E'_{qi}}{\Delta v_{ref\ i}} = \frac{1}{K_{6,ii}} \frac{\omega_{ri}^2}{s^2 + 2\xi_{ri}\omega_{ri}s + \omega_{ri}^2}$$



Gambar 2.14 Root locus model reaktif dengan adanya variabel K_{Ai} .

Persamaan karakteristik ini mempunyai 2 (dua) akar persamaan sebagai berikut :

$$s_{ri} = \left(-\xi_{ri} \pm j\sqrt{1 - \xi_{ri}^2} \right) \omega_{ri}$$

Dimana $\xi_{ri} = \frac{1}{2\omega_{ri} T_{Ai}}, \quad \omega_{ri}^2 = \frac{K_{6,ii} K_{Ai}}{T'_{doi} T_{Ai}}$

Untuk $T'_{doi} \gg T_{Ai}$ dan $K_{Ai} \gg \frac{1}{K_{3,ii} K_{6,ii}}$

Dalam beberapa kasus :

$$s_{ri} = \frac{1}{2T_{Ai}} \pm j \sqrt{\frac{K_{6,ii} K_{Ai}}{T'_{doi} T_{Ai}} - \left(\frac{1}{2T_{Ai}} \right)^2}$$

Dan tempat kedudukan akar ini berbanding lurus dengan variabel K_{Ai} . Akar-

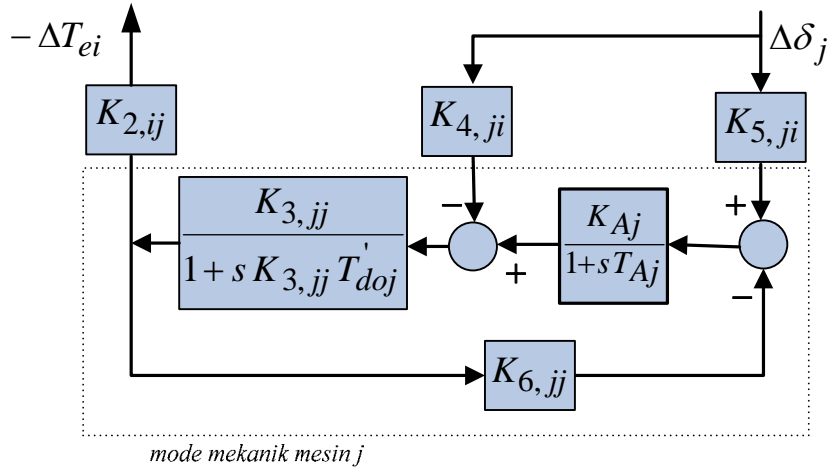
akar ini akan berada pada sumbu nyata jika :

$$K_{Ai} < \frac{T'_{doi}}{(4 K_{6,ii} T_{Ai})}, \quad \text{untuk } \xi_{ri} > 1$$

Dalam praktek diberikan :

$$K_{Ai} = \frac{T'_{doi}}{2 K_{6,ii} T_{Ai}}, \text{ untuk } \xi_{ri} = 0.707$$

D. Pengaruh Interaksi Reaktif Pada Mesin *i*



Gambar 2.15 Interaksi mode reaktif mesin-j terhadap mode mekanik mesin-i

Loop interaksi ini terdapat 2 (dua) buah input : $K_{4,ji}$, $K_{5,ji}$

Loop $K_{4,ji}$, dengan fungsi alih dari blok diagram pada gambar 2.15 :

$$\frac{\Delta T_{ei}}{\Delta \delta_i} = \frac{K_{2,ij} K_{3,jj} K_{4,ji} (1 + s T_{A,j})}{(1 + s K_{3,jj} T'_{doj})(1 + s T_{A,j}) + K_{3,jj} K_{6,jj} K_{A,j}} \quad (2.26)$$

Dengan pendekatan diperoleh :

$$\frac{\Delta T_{ei}}{\Delta \delta_i} = \frac{K_{2,ij} K_{4,ji}}{K_{6,jj} K_{A,j}} \frac{1}{1 + s (T'_{doj} / K_{6,ji} K_{A,j})} \quad (2.27)$$

Untuk : $T'_{doj} \gg T_{A,j}$

Selama $K_{3,ij}$ dan $K_{6,jj}$ positif dan koefisien kopling :

$$K_{2,ij} K_{4,ji} = \frac{1}{2} (x_{dj} - x'_j) E_{qi}^2 y_{ij}^2 [\cos 2\delta_{ij} + \cos 2\beta_{ij}] \quad (2.28)$$

Adalah selalu berharga negatif kecuali jika $|\delta_{ij}| < |\beta_{ij} - 90^\circ|$, sehingga mode reaktif mesin j akan memberikan kontribusi redaman positif dan torsi sinkronisasi negatif kecuali jika $K_{2,ij} K_{4,ji} > 0$. Selain itu regulator tegangan bukan hanya mempengaruhi konstanta waktu efektif tetapi juga mereduksi pengaruh interaksi dinamik $1/K_{3,jj} K_{6,jj} K_{Aj}$ dari nilai aslinya.

Loop $K_{5,ji}$ dengan fungsi alih dari blok diagram pada gambar 2.15 dalam dinamika interaksi mode reaktif mesin-j terhadap mode mekanik mesin-i :

$$\frac{\Delta T_{ei}}{\Delta \delta_i} = \frac{K_{2,ij} K_{5,ji}}{K_{6,jj}} \frac{\omega_{rj}^2}{s^2 + 2 \xi_{rj} \omega_{rj} s + \omega_{rj}^2}$$

Dengan : $\omega_{rj}^2 = \frac{K_{6,jj} K_{Aj}}{T'_{doj}}$; $\xi_{rj} = \frac{1}{2 \omega_{rj}} \left(\frac{1}{T_{Aj}} + \frac{1}{K_{3,jj} T'_{doj}} \right)$

Untuk $K_{3,jj} K_{6,jj} K_{Aj} \gg 1$ dan selama $K_{6,jj} > 0$, redaman dan torsi sinkronisasi pada loop $K_{5,ji}$ dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Redaman

Positif jika $K_{2,ij} K_{5,ji} > 0$

Negatif jika $K_{2,ij} K_{5,ji} < 0$

2. Sinkronisasi

Positif jika $K_{2,ij} K_{5,ji} > 0$ dan $\omega_{ni} > \omega_{ri}$

Positif jika $K_{2,ij} K_{5,ji} < 0$ dan $\omega_{ni} < \omega_{ri}$

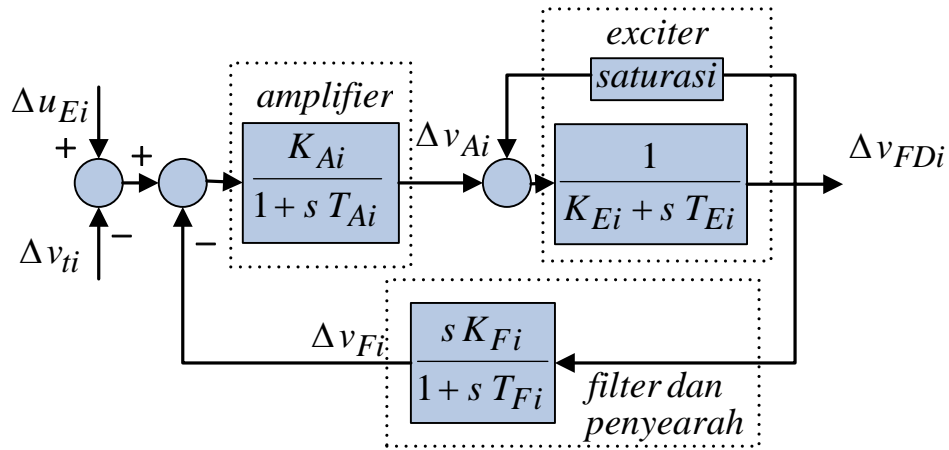
Negatif jika $K_{2,ij} K_{5,ji} > 0$ dan $\omega_{ni} < \omega_{ri}$

Negatif jika $K_{2,ij} K_{5,ji} < 0$ dan $\omega_{ni} > \omega_{ri}$

Analisa yang sama dapat diterapkan untuk mesin- j terhadap mesin- i . selama harga $K_{2,ii}$ adalah selalu positif terhadap pengaruh interaksi antar mode dan hanya dipengaruhi oleh variabel $K_{5,ii}$.

2.3.4 Sistem Eksitasi

Model sistem eksitasi dan pengaturan tegangan mengacu pada model IEEE type 1^[13], seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.16 :



Gambar 2.16 Sistem eksitasi Type-1

Dengan K_{Ai} , K_{Fi} , K_{Ei} , T_{Ai} , T_{Fi} , T_{Ei} , Δu_{Ei} berturut-turut merupakan konstanta penguatan amplifier, konstanta penguatan filter, konstanta penguatan exciter, waktu tanggap amplifier, waktu tanggap filter, waktu tanggap exciter dan perubahan sinyal kontrol mesin ke- i . Dengan mengabaikan efek saturasi, maka gambar 2.16 di atas dapat dijabarkan menjadi,

$$\Delta \dot{v}_{FDi} = \frac{\Delta v_{Ai}}{T_{Ei}} - \frac{K_{Ei} \Delta v_{FDi}}{T_{Ei}} \quad (2.29)$$

$$\Delta \dot{v}_{Fi} = \frac{K_{Fi} \Delta v_{Ai}}{T_{Ei} T_{Fi}} - \frac{K_{Ei} K_{Fi} \Delta v_{FDi}}{T_{Ei} T_{Fi}} - \frac{\Delta v_{Fi}}{T_{Ei}} - \frac{\Delta v_{Ai}}{T_{Ai}} \quad (2.30)$$

$$T_{Ai} \Delta \dot{v}_{Ai} = \Delta u_{Ei} K_{Ai} - \Delta v_i K_{Ai} - \Delta v_{Fi} K_{Ai} - \Delta v_{Ai} \quad (2.31)$$

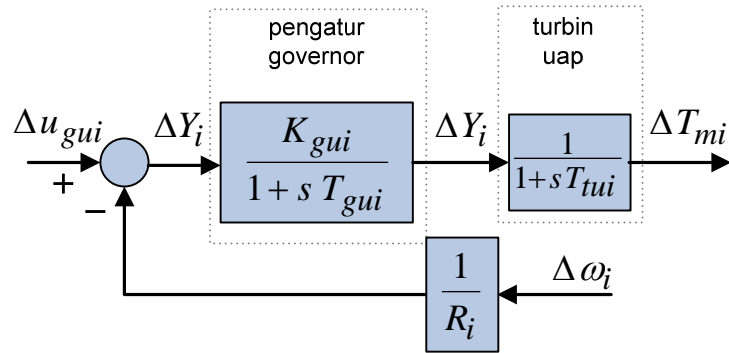
Dimana : Δv_{Ai} : perubahan tegangan amplifier mesin i

Δv_{Fi} : perubahan tegangan keluaran penyearah mesin i

2.3.5 Model Pembangkit Dan Sistem Pengendalinya (Governor)

Model turbin dan sistem pengaturannya yang akan diberikan di sini mengacu pada model IEEE^[11].

MODEL PEMBANGKIT TURBIN UAP



Gambar 2.17 Pembangkit Turbin Uap & Pengendalinya

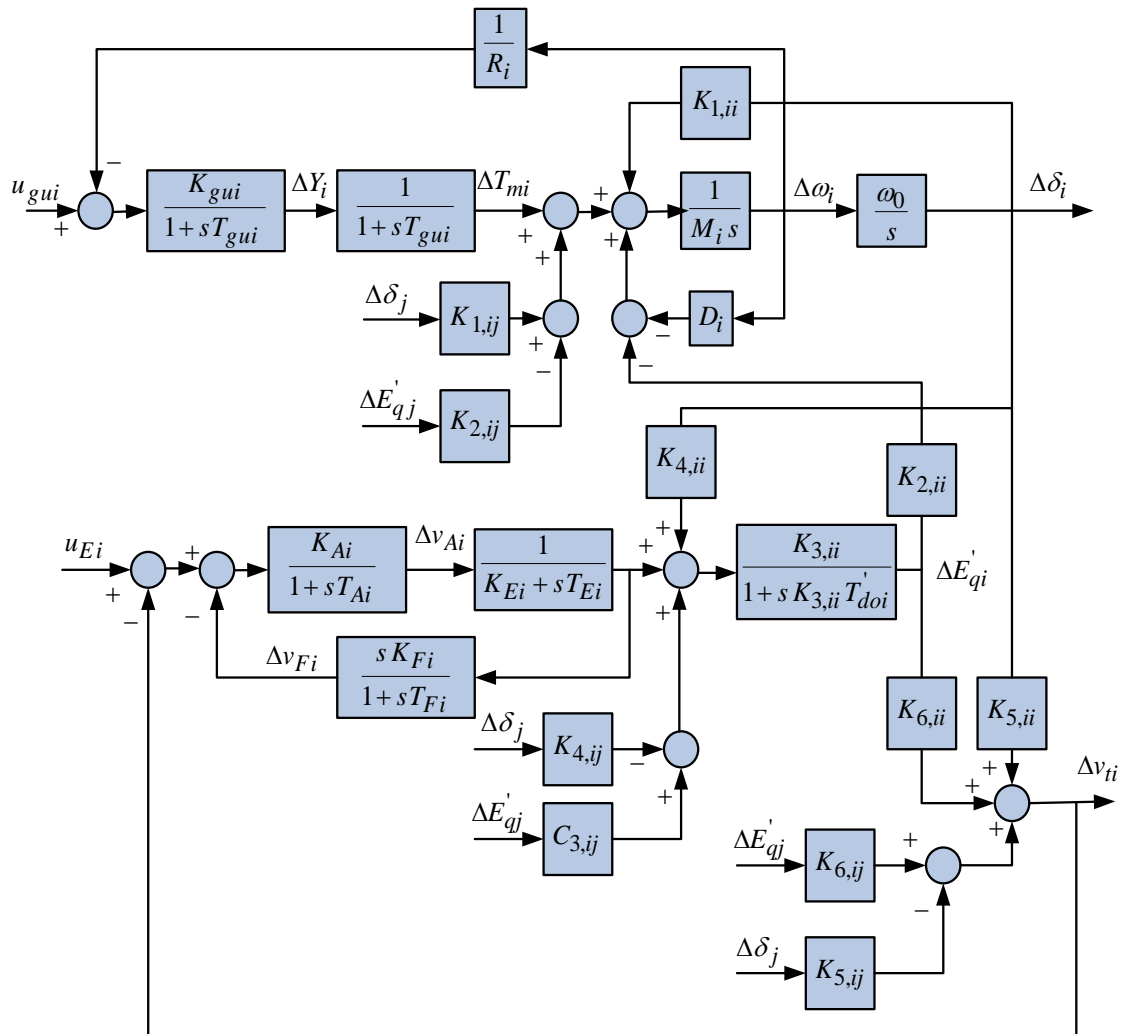
Dengan K_{gui} , T_{gui} , T_{tui} , R_i masing-masing merupakan konstanta penguatan pengatur turbin uap, waktu tanggap pengatur turbin uap, waktu tanggap turbin uap dan konstanta pengaturan turbin. Dari gambar 2.17 dapat dijabarkan menjadi,

$$\Delta \dot{T}_{mi} = \frac{\Delta Y_i}{T_{tui}} - \frac{\Delta T_{mi}}{T_{tui}} \quad (2.32)$$

$$\Delta \dot{Y}_i = \frac{K_{gui} \Delta u_{gui}}{T_{gui}} - \frac{K_{gui} \Delta \omega_i}{T_{gui} R_i} - \frac{\Delta Y_i}{T_{gui}} \quad (2.33)$$

2.4 Model Sistem Pembangkit Secara Keseluruhan

Gabungan dari bagian-bagian yang telah dibahas pada subbab-subbab sebelum akan membentuk blok diagram dinamik keseluruhan seperti gambar 2.18 berikut ini.



Gambar 2.18 Model mesin tunggal ter-interkoneksi dengan pembangkit turbin uap

Gambar di atas merupakan dinamika gerak mesin i dengan memasukkan pengaruh perubahan $\Delta \delta$ dan $\Delta E'_q$ dari mesin j . Variabel K seperti dijelaskan sebelumnya pada dinamika mesin i tanpa memperhatikan pengaruh mesin lain, merupakan besar pengaruh masing-masing persamaan elemen pendukung.

Kemudian akan dibahas variabel K dengan adanya pengaruh mesin j terhadap mesin i , dengan uraian sebagai berikut :

$K_{1,ij}$ merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan sudut rotor mesin j ($\Delta\delta_j$) terhadap perubahan torsi elektrik mesin i (ΔT_e), torsi elektrik yang ditimbulkan dapat berharga positif atau negatif bergantung pada nilai variabel-variabel K_{ii} dan K_{ij} pada suatu kondisi pembebanan.

$K_{2,ij}$ merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan flux linkage mesin j ($\Delta E'_{qj}$) terhadap torsi elektrik mesin i (ΔT_e), torsi elektrik yang ditimbulkan dapat berharga positif atau negatif bergantung pada nilai variabel-variabel K_{ii} dan K_{ij} pada suatu kondisi pembebanan.

$C_{3,ij}$ merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan flux linkage mesin j ($\Delta E'_{qj}$) terhadap perubahan tegangan medan (Δv_f) mesin i . Pengaruh yang terjadi dapat berupa penambahan atau pengurangan tegangan tergantung dari kondisi pembebanan.

$K_{4,ij}$ merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan sudut rotor mesin j ($\Delta\delta_j$) terhadap perubahan tegangan medan (Δv_f) mesin i . Pengaruh yang ditimbulkan bisa berharga positif atau negatif tergantung kondisi pembebanan.

$K_{5,ij}$ merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan sudut rotor mesin j ($\Delta\delta_j$) terhadap perubahan tegangan terminal (Δv_t) mesin i .

Pengaruh bisa berupa penambahan atau pengurangan tergantung dari kondisi pembebanan.

$K_{6,ij}$ merupakan variabel kopling yang menyatakan pengaruh perubahan flux linkage mesin j ($\Delta E'_{qj}$) terhadap perubahan tegangan terminal (Δv_t) mesin i .

Pengaruh ini dapat berupa penambahan atau pengurangan tergantung pada kondisi pembebanan.

2.5 Pemodelan Beban

Diagram skema jaringan gambar 2.19 yaitu suatu jaringan sistem tenaga yang mempunyai n admitansi (1,2, ... n) dan m bus yang merupakan titik beban ($n+1, n+2, \dots, n+m$), sehingga matrik admitansi yang terkandung pada jaringan mempunyai titik sebanyak $n+m$.

Beban digambarkan sebagai beban nyata dan beban reaktif. Dengan n titik terminal generator dan m bus beban sehingga diambil Y sebagai matrik admitansi jaringan dengan elemen-elemen Y_{ii} dan Y_{ij} sebagai elemen admitansi transfer antara titik i dan titik j .

Admitansi pada titik i adalah :

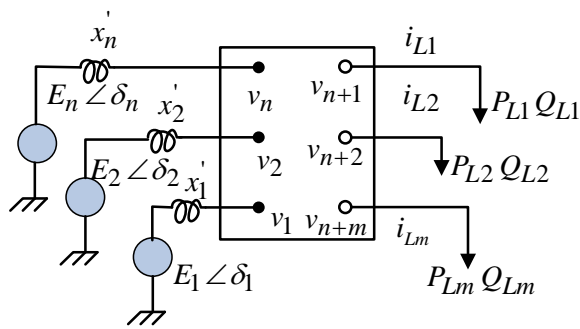
$$\bar{Y}_{ii} = Y_{ii} \angle \theta_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \text{ dan } \bar{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.34)$$

Arus yang mengalir pada generator-generator adalah :

$$\bar{i} = \bar{Y} \bar{E} \quad (2.35)$$

Misal diambil titik beban di bus k , kondisi di titik k pada saat beban puncak adalah

v_k , beban nyata P_{Lk} dan beban reaktif Q_{Lk} seperti pada gambar 2.19 berikut :



Gambar 2.19 Skema diagram jaringan sistem tenaga

Ekivalensi admitansi beban adalah :

$$P_{Lk} + jQ_{Lk} = v_k^2 (G_{Lk} - jB_{Lk})$$

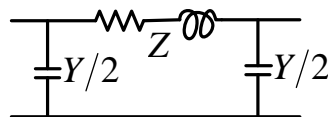
$$S_{Lk} = P_{Lk} + jQ_{Lk} = v_k i_{Lk}^* = v_k (v_k Y_{Lk})^* = v_k^2 Y_{Lk}^* = v_k^2 (G_{Lk} - jB_{Lk}) \quad (2.36)$$

Dengan : $G_{Lk} = P_{Lk} / v_k^2$; $B_{Lk} = Q_{Lk} / v_k^2$

MVA (dalam penelitian ini diambil kondisi beban puncak),

$$P_{Lk} + jQ_{Lk} = v \angle \Psi_k \text{ atau } \bar{i}_{Lk} = \frac{P_{Lk} - jQ_{Lk}}{v_k \angle -\Psi_k}$$

Saluran transmisi sesuai dengan kondisi di lapangan, diambil saluran transmisi jarak menengah, dimana admitansi shunt yang biasanya merupakan kapasitansi murni dimasukkan dalam perhitungan dan keseluruhan admitansi shunt saluran dibagi menjadi 2 (dua) sama besar dan ditempatkan masing-masing pada ujung pengiriman dan ujung penerimaan atau dikenal sebagai π nominal.



Gambar 2.20 Rangkaian π nominal pada saluran transmisi jarak menengah.

BAB III
TEORI KONTROL OPTIMAL
DAN OBSERVER BEBAN

3.1 Algoritma Sistem

Dalam membuat simulasi sistem ini harus diketahui algoritma sistem yaitu dengan menghitung parameter-parameter sistem. Parameter-parameter tersebut yaitu variabel-variabel K_1 s/d K_6 mesin tunggal pada pembangkit serta pengaruh parameter tersebut terhadap mesin lain yang dihubungkan dengan sistem interkoneksi. Didalam memperhitungkan variabel-variabel tersebut didasarkan pada parameter-parameter mesin serta kondisi pembebanan tertentu pada sistem interkoneksi, yang mana dalam penulisan ini diambil pada kondisi variasi beban puncak dari kondisi beban dasar sistem dengan maksud untuk mengantisipasi adanya penambahan kondisi beban puncak sistem pada saat tertentu. Dimana pengambilan beban puncak ini dimaksudkan untuk mengetahui besarnya pengaruh satu mesin terhadap mesin lainnya.

3.2 Persamaan Ruang Keadaan Sistem

Sistem jaringan yang tersusun pada sebuah unit pembangkit dalam hal ini dinamik pembangkit turbin uap dengan generator terhubung bus tak hingga. Dari gambar 2.18 dapat dibentuk dalam persamaan keadaan (*state space*) berikut :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A x(t) + B u(t) \\ y(t) &= C x(t)\end{aligned}\tag{3.1}$$

Dimana : $x(t)$ = vektor variabel keadaan, $n \times 1$

$$\begin{aligned}
u(t) &= \text{variabel masukan, } m \times 1 \\
A &= \text{matrik konstanta, } n \times n \\
B &= \text{matrik konstanta, } n \times m \\
y(t) &= \text{vektor keluaran, } r \times 1 \\
C &= \text{matrik konstanta, } n \times m
\end{aligned}$$

Variabel-variabel dalam blok diagram sistem secara keseluruhan pada gambar 2.18 dapat dibentuk ke dalam persamaan *state space* pada masing-masing sistem. Namun persamaan ini akan dihitung berdasar 2 (dua) kondisi, pertama kondisi tanpa memperhatikan pengaruh variabel mesin lain, dimaksudkan untuk menghitung besar umpan balik optimal yang diberikan pada mesin tersebut, walaupun dalam hal ini sebenarnya pengaruh mesin lain sudah diperhitungkan dalam menentukan variabel-variabel K_1 s/d K_6 dari satu mesin dalam sistem. Kedua, persamaan *state* sistem dengan memperhitungkan pengaruh mesin satu terhadap mesin lainnya. Hal ini dimaksudkan untuk melihat pengaruh adanya umpan balik optimal yang diberikan pada satu mesin terhadap mesin tersebut maupun terhadap mesin-mesin lainnya dalam sistem. Persamaan *state* dapat dituliskan sebagai berikut :

Persamaan perubahan ketinggian katup dan mekanik torsi pada turbin :

$$\begin{aligned}
\Delta \dot{Y}_i &= \frac{K_{gui} \Delta u_{gui}}{T_{gui}} - \frac{K_{gui} \Delta \omega_i}{T_{gui} R_i} - \frac{\Delta Y_i}{T_{gui}} \\
\Delta \dot{T}_m &= \frac{\Delta Y_i}{T_{tu}} - \frac{\Delta T_m}{T_{tu}}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Persamaan dinamik mesin i

$$\Delta\delta_i = \frac{\omega_o}{s} \Delta\omega_i \quad (3.3)$$

$$\Delta\omega_i = -\frac{\Delta T_e}{sM} \quad (3.4)$$

$$\Delta E'_{qi} = \frac{K_3}{1 + sT'_{doi} K_3} (\Delta v_{Fi} - K_4 \Delta\delta_i) \quad (3.5)$$

$$\Delta v_F = -\frac{K_A}{1 + sT_A} (\Delta v_{ti} - u_{Ei}) \quad (3.6)$$

$$\Delta v_{ti} = K_6 \Delta E'_{qi} + K_5 \Delta\delta_i \quad (3.7)$$

$$\Delta T_{ei} = K_1 \Delta\delta_i + K_2 \Delta E'_{qi} + D \Delta\omega_i \quad (3.8)$$

Dengan eliminasi ΔT_{ei} dan Δv_{ti} maka akan diperoleh persamaan dalam bentuk ruang keadaan (*state space*), dengan variabel keadaan x adalah didefinisikan sebagai

$x = \left[\Delta Y_i \quad \Delta T_m \quad \Delta\delta_i \quad \Delta\omega_i \quad \Delta E'_{qi} \quad \Delta v_{Fi} \right]^T$ dan variabel keluaran (output) y

didefinisikan sebagai $y = \left[\Delta Y \quad \Delta T_m \quad \Delta P \quad \Delta\omega_i \quad \Delta v_{ti} \quad \Delta v_{Fi} \right]^T$,

$$A_{ii} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{gui}} & 0 & 0 & -\frac{K_{gui}}{T_{gui} R_i} & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{tu}} & -\frac{1}{T_{tu}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 377 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{1,ii}}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_{2,ii}}{M} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{4,ii}}{T'_{doi}} & 0 & -\frac{1}{K_{3,ii} T'_{doi}} & -\frac{1}{T'_{doi}} \\ 0 & 0 & -\frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} K_{5,ii} & 0 & -\frac{K_{Ai} K_{6,ii}}{T_{Ai}} & -\frac{1}{T_{Ai}} \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{K_{gui}}{T_{gui}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} \end{bmatrix}$$

Dan untuk state variabel keluaran dari persamaan yang memenuhi :

$$\Delta P_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q + D \Delta \omega$$

$$\Delta v_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q$$

$$\text{Matrik } C_{ii} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{1,ii} & D & K_{2,ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{5,ii} & 0 & K_{6,ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Persamaan *state* kedua, dengan memperhatikan pengaruh variabel-variabel mesin lain maka berdasar blok diagram gambar 2.18, berlaku pula persamaan *state* sebagai berikut :

Persamaan dinamik mesin *i* dengan pengaruh mesin *j*

Persamaan perubahan ketinggian katup turbin :

$$\Delta \dot{Y}_i = \frac{K_{guj}}{T_{guj}} \Delta u_j - \frac{K_{guj}}{T_{guj} R_j} \Delta \omega_j - \frac{\Delta Y_j}{T_{guj}} \quad (3.9)$$

$$\Delta \dot{T}_{mj} = \frac{\Delta Y_j}{T_{tuj}} - \frac{\Delta T_{mj}}{T_{tuj}}$$

Persamaan dinamik mesin i dengan pengaruh mesin j :

$$\Delta \delta_i = \frac{\omega_o}{s} \Delta \omega_i \quad (3.10)$$

$$\Delta \omega_i = -\frac{\Delta T_e}{s M_j} \quad (3.11)$$

$$\Delta E'_{qi} = \frac{K_3}{1 + s T_{doi} K_3} (\Delta v_{Fi} + K_{4,ii} \Delta \delta_i - K_{4,ij} \Delta \delta_j + C_{3,ij} \Delta E'_{qj}) \quad (3.12)$$

$$\Delta v_{Fi} = -\frac{K_{Ai}}{1 + s T_{Ai}} (\Delta v_{ti} - u_{Ei}) \quad (3.13)$$

$$\Delta v_{ti} = K_{6,ii} \Delta E'_{qi} + K_{6,ij} \Delta E'_{qj} + K_{5,ii} \Delta \delta_i - K_{5,ij} \Delta \delta_j \quad (3.14)$$

$$\Delta T_{ei} = K_{1,ii} \Delta \delta_i + K_{2,ii} \Delta E'_{qi} + D \Delta \omega_i - K_{1,ij} \Delta \delta_j - K_{2,ij} \Delta E'_{qj} \quad (3.15)$$

Dengan eliminasi ΔT_{ei} dan Δv_{ti} maka akan diperoleh persamaan dalam bentuk ruang keadaan (*state space*), dengan variabel keadaan x adalah didefinisikan sebagai

$$x = \left[\Delta Y_{ij} \quad \Delta T_{mij} \quad \Delta \delta_{ij} \quad \Delta \omega_{ij} \quad \Delta E'_{qij} \quad \Delta v_{Fij} \right]^T \text{ dan variabel keluaran}$$

(output) y didefinisikan sebagai

$$y = \left[\Delta Y_{ij} \quad \Delta T_{mij} \quad \Delta P_{eij} \quad \Delta \omega_{ij} \quad \Delta v_{tij} \quad \Delta v_{Fij} \right]^T, \text{ maka di dapat matrik}$$

state selanjutnya untuk memenuhi persamaan state dengan adanya pengaruh mesin lain dalam jaringan interkoneksi, berikut :

$$\text{Matrik } A_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{1,ij}}{M_i} & 0 & -\frac{K_{2,ij}}{M_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{4,ij}}{T_{doi}} & 0 & -\frac{C_{3,ij}}{T_{doi}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} K_{5,ij} & 0 & \frac{K_{Ai}}{T_{Ai}} K_{6,ii} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_j = \begin{bmatrix} \frac{K_{gij}}{T_{gij}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_{Aj}}{T_{Aj}} \end{bmatrix}$$

Dan untuk state variabel keluaran dari persamaan yang memenuhi :

$$\Delta P_e = K_{1,ij} \Delta \delta_{ij} + K_{2,ij} \Delta E'_{qij} + D_j \Delta \omega_{ij}$$

$$\Delta v_t = K_{5,ij} \Delta \delta_{ij} + K_{6,ij} \Delta E'_{qij}$$

$$\text{Matrik } C_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{1,ij} & 0 & -K_{2,ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{5,ij} & 0 & K_{6,ii} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

- Ket :
- ΔY = perubahan ketinggian katup turbin
 - ΔT_m = perubahan torsi mekanik turbin
 - $\Delta \delta$ = perubahan sudut rotor mesin
 - $\Delta \omega$ = perubahan kecepatan mesin
 - $\Delta E'_q$ = perubahan tegangan transient generator
 - Δv_F = perubahan tegangan keluaran penyearah sisi eksitasi
 - u_{gui} = sinyal kontrol sisi turbin
 - u_{Ei} = sinyal kontrol sisi eksitasi
 - ΔP_e = perubahan daya elektrik mesin
 - Δv_{ti} = perubahan tegangan terminal

Dengan bentuk persamaan sistem secara keseluruhan dengan melihat pengaruh mesin satu terhadap lainnya dapat diterapkan suatu metode kontrol optimal, yaitu dengan memberikan indek kriteria tampilan minimum yang akan dibahas dalam subbab selanjutnya.

3.3 Sinyal Kontrol Optimal

Menentukan parameter-parameter dalam perancangan sistem pembangkit mesin tunggal sebagaimana yang diperlihatkan blok diagram gambar 2.18 bisa menggunakan metode-metode sistem kontrol konvensional yang akan merancang suatu sistem berdasar pada karakteristik dasar seperti kestabilan, respon sistem (*transien*), ketelitian/galat (*error*) saat mencapai keseimbangan dan kepekaan sistem.

Untuk meningkatkan karakteristik dinamika sistem maka sistem harus dapat dirancang pada suatu fungsi kriteria tertentu baik maksimum atau minimum secara

total pada sistem. Metode yang dapat merealisasikan perancangan ini adalah metode kontrol optimal, yaitu dengan menambahkan karakteristik dasar tersebut dengan suatu indeks performansi.

Indeks performansi ini didasarkan pada variabel input dan variabel keadaan, maka persamaan sistem harus dinyatakan dalam bentuk variabel keadaan (*state space*). Permasalahan kontrol optimal tidak hanya sistem harus mempunyai solusi dan dapat dikontrol, tetapi sistem juga harus memenuhi suatu kriteria performansi dan memenuhi syarat optimal, dalam arti sistem kontrol optimal yang dirancang perlu diformulasikan indeks kriteria tampilan dan perlu menentukan variabel input $u(t)$ yang dapat menghasilkan indeks kriteria tampilan optimal.

Permasalahan kontrol optimal adalah untuk mendapatkan matrik K melalui sinyal input optimal yang dihasilkan sistem, dalam bentuk :

$$u(t) = -K x(t) \quad (3.16)$$

Dimana K adalah matrik konstanta umpan balik.

Perancangan sistem kontrol optimal untuk sistem pembangkit ini dengan indek kinerja kuadratik disebut Regulator Kuadratik Linier (Linier Quadratic Regulator). Perancangan regulator optimal adalah untuk menentukan hukum kontrol optimal $u(x, t)$ agar dapat memindahkan sistem dari keadaan awal (*initial state*) ke keadaan akhir (*final state*) sedemikian sehingga memberikan indek kinerja minimal.

Indek kinerja secara luas digunakan dalam perancangan kontrol optimal dan dikenal sebagai *quadratic performance index* yang didasarkan pada kriteria minimum

error dari penyimpangan pada variabel keadaan dan minimum energi pada variabel input.

3.3.1 Regulator Kuadratik Linier^[1]

Pada perancangan kontrol optimal ini, indeks performansi dapat dirumuskan sebagai minimum energi dengan variabel sinyal input dan minimum penyimpangan dengan variabel keadaan.

$$J = \int_{t_0}^{t_1} [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (3.17)$$

Dimana : Q = matriks bobot, $n \times n$, semidefinit positif

R = matriks bobot, $m \times m$, definit positif

Indek kriteria ini mempunyai bentuk kuadrat dari sinyal input dan variabel keadaan, sehingga indek kinerja ini disebut indek kriteria kuadratik.

Adapun formulasi minimum energi sinyal input adalah :

$$J = \int_{t_0}^{t_1} u^T(t) R u(t) dt \quad (3.18)$$

J energi yang digunakan oleh input dan $u^T(t) R u(t)$ adalah menyatakan daya yang digunakan sinyal input dan mempunyai bentuk kuadratik.

Adapun formulasi penyimpangan minimum dari variabel keadaan adalah :

$$J = \int_{t_0}^{t_1} x^T(t) Q x(t) dt \quad (3.19)$$

Untuk menyelesaikan persamaan (3.17) digunakan metode *Lagrange* multiplier :

$$(x, \lambda, u, t) = [x^T Q x + u^T R u] + \lambda^T [A x + B u - x] \quad (3.20)$$

Harga optimal (ditunjukkan dengan tanda*) berikut ini, diperoleh dengan menyamakan turunan parsial sama dengan nol :

$$\frac{\partial \mathfrak{J}}{\partial \lambda} = A x^* + B u^* - x^* = 0 \quad \Rightarrow \quad x^* = A x^* + B u^* \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial \mathfrak{J}}{\partial u} = 2 R u^* + \lambda^T B = 0 \quad \Rightarrow \quad u^* = -\frac{1}{2} R^{-1} \lambda^T B \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial \mathfrak{J}}{\partial x} = 2 x^{T*} Q + \lambda^T + \lambda^T A = 0 \quad \Rightarrow \quad \lambda = -2 Q x^* - A^T \lambda \quad (3.23)$$

Asumsi bahwa *matrix time-variant definite positif* $p(t)$ memenuhi

$$\lambda = 2 p(t) x^* \quad (3.24)$$

Dengan menggunakan persamaan (3.16) ke dalam persamaan (3.21) memberikan sinyal input optimal loop-tertutup sebagai berikut :

$$u^*(t) = -R^{-1} B^T p(t) x^* \quad (3.25)$$

Dengan mendefferensiasikan persamaan (3.24), akan diperoleh :

$$\lambda = 2(p x^* + \dot{p} x^*) \quad (3.26)$$

Dengan menyamakan persamaan (3.22) dengan (3.25), akan diperoleh :

$$p(t) = -p(t) A - A^T p(t) - Q + p(t) B R^{-1} B^T p(t) \quad (3.27)$$

Dan persamaan (3.27) disebut persamaan differensial *Riccati*.

Solusi persamaan Riccati sangat rumit, maka harus disederhanakan menjadi kasus suboptimal, yaitu $t_f = \infty$ dan menghasilkan $x(t_f) \cong 0$, sehingga persamaannya menjadi :

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (3.28)$$

Dengan : $Q \geq 0$ dan $R > 0$

Matrik p akan mencapai keadaan mantap (*steady-state*), maka harga $p(t)$ akan menuju ke satu titik sehingga pada kondisi tersebut $p(t)$ sama dengan Nol, dan persamaan (3.27) menjadi persamaan aljabar *Riccati*,

$$p A + A^T p + Q - p B R^{-1} B^T p = 0 \quad (3.29)$$

Dari persamaan (3.29), matrik p menuju ke harga yang konstan, oleh karenanya penyelesaian dari matrik p pada persamaan (3.29) adalah konstan, maka harga K pada persamaan (3.29) juga konstan, yaitu :

$$K = R^{-1} B^T p \quad (3.30)$$

Persamaan nilai indeks performansi optimal diberikan :

$$J^* = x^T(0) p x(0) \quad (3.31)$$

Dengan adanya umpan balik optimal K , persamaan dengan variabel keadaan dari sistem diatas akan berubah menjadi persamaan :

$$\dot{x}(t) = (A - B K) x(t) \quad (3.32)$$

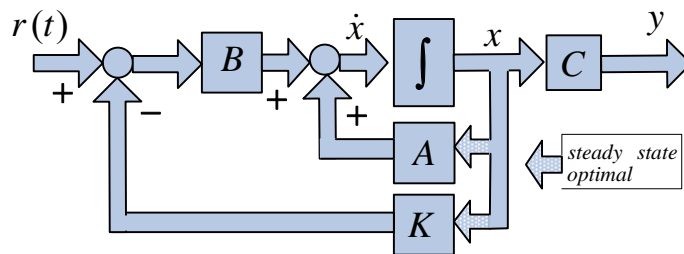
Sistem ini akan mempunyai akar-akar karakteristik persamaan yang berbeda dengan akar-akar karakteristik persamaan sebelum adanya umpan balik K , akar-akar persamaan karakteristik ini dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$|sI - (A - BK)| = 0 \quad (3.33)$$

Dengan akar-akar persamaan karakteristik ini adalah $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$.

Dengan menentukan matrik bobot Q dan R , maka matrik p , nilai indeks kriteria J^* serta umpan balik dapat dihitung.

Desain kontrol optimal dapat disajikan dalam bentuk blok diagram sebagai berikut :



Gambar 3.1 Blok diagram sistem kontrol optimal

3.3.2 Penentuan Matriks Pembobot

Matriks pembobot pada indeks kinerja dipilih untuk menentukan sifat kinerja desain kontrol. Sudah banyak metode untuk menentukan besarnya matrik pembobot Q dan R . Di sini akan disuguhkan beberapa cara untuk menentukan besarnya matriks bobot, antara lain :

- a. Metode try and error

metode ini dilakukan dengan memilih komponen matrik pembobot sesuai dengan variabel keluaran yang diinginkan relatif terhadap keluaran yang lain. Metode ini sangat sederhana dan bersifat praktis.

b. Metode Bryson

asumsi bahwa matrik pembobot $Q \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ dan $R \in \mathfrak{R}^{n \times m}$ adalah diagonal.

$$Q = \text{diag} \{q_1, \dots, q_n\}, \quad R = \text{diag} \{r_1, \dots, r_m\}$$

q_1, \dots, q_n : komponen diagonal matrik Q

r_1, \dots, r_m : kpmponen diagonal matrik R

Algoritma

(i) menentukan deviasi maksimal yang diijinkan

x_i (maks), $i = 1, \dots, n$

u_j (maks), $j = 1, \dots, m$

(ii) menentukan komponen matrik pembobot

$$q_i = \frac{\mathbf{1}}{x_1^2 (\text{maks})} \Big|_{i=1}^n \tag{3.34a}$$

$$r_j = \frac{\mathbf{1}}{u_1^2 (\text{maks})} \Big|_{j=1}^m \tag{3.34b}$$

c. Metode eksak

metode ini dikembangkan dari metode pemindahan pole dengan menentukan nilai eigen sistem lingkaran tertutup.

Algoritma

Inisialisasi, $Q = Q_0$, $K = K_0$, $k = \text{indeks iterasi} = 0$, $R > 0$

(i) memperbaiki matrik sistem

$$A_k = A - B K \quad (3.35)$$

(ii) menghitung nilai eigen / vektor eigen

$$A_k = \text{diag} \{ \lambda_1, \dots, \lambda_n \}$$

$\lambda_1, \dots, \lambda_n$: nilai eigen

$$T_k = [t_1, \dots, t_n], \in \mathfrak{R}^{n \times m}$$

t_1, \dots, t_n : vektor eigen

$$\text{Dan } \bar{H} = T_k^{-1} B R^{-1} B^T [T_k^{-1}]^T \quad (3.36)$$

(iii) $k := k + 1$

(iv) menggeser λ_i ke lokasi s_i

$$\bar{q}_i^k = \frac{s_i^2 - \lambda_i^k}{h_{ii}^{k-1}} \quad (3.37)$$

h_{ii} : harga komponen diagonal matrik H

(v) $\bar{Q}_k = \text{diag} \{ 0, 0, \dots, q_i^k, 0, \dots, 0 \}$

$$\bar{P}_k A_{k-1} + A_{k-1} \bar{P}_k - \bar{P}_k \bar{B}_k R^{-1} (\bar{B}_k)^T \bar{P}_k + \bar{Q}_k = 0 \quad (3.38)$$

$$K_k = \bar{K}_k T_k^{-1} (\bar{K}_k = R^{-1} (\bar{B}_k)^T \bar{P}_k) \quad (3.39)$$

(vi) $K := K + K_k \quad (3.40)$

$$Q_k = T_k^{-T} \bar{Q}_k T_k^{-1} \quad (3.41)$$

$$Q := Q + Q_k \quad (3.42)$$

3.4 Terkendali dan Teramati^[12]

Syarat agar memenuhi performansi penguatan optimal, sistem harus terkendali (*controlability*) dan teramati (*observability*). Tinjau sistem linier dari persamaan 3.1 diatas, diberikan :

3.4.1 Terkendali (*controllability*)

Terkendali dapat diartikan, bila sistem dengan semua variabel keadaannya dapat dibawa dari keadaan awal ke keadaan akhir yang diinginkan dalam waktu yang berhingga dan dengan masukan yang berhingga pula. Hal ini terpenuhi jika dan hanya jika matrik $n \times nm$ dipenuhi :

$$\text{rank} (\Theta_c) = [B \quad AB \quad A^2 B \quad \dots \quad A^{n-1} B] = n \quad (3.43)$$

atau

$$\det (\Theta_c) = [B \quad AB \quad A^2 B \quad \dots \quad A^{n-1} B] = \text{non singular} \quad (3.44)$$

3.4.2 Teramati (*observability*)

Teramati dapat diartikan, bila setiap variabel keadaannya dapat ditentukan dari keluaran sistem, artinya dengan melihat keluaran sistem, dapat ditentukan setiap variabel statusnya. Hal ini terpenuhi jika dan hanya jika matrik $n \times nm$ dipenuhi :

$$\text{rank} (\Theta_o) = [C^T \quad A^T C^T \quad \dots \quad (A^{n-1})^T C^T] = n \quad (3.45)$$

atau

$$\det (\Theta_o) = [C^T \quad A^T C^T \quad \dots \quad (A^{n-1})^T C^T] = \text{non singular} \quad (3.46)$$

3.5 Regulator Problem Dengan Output Feedback

Pada umumnya formulasi kontrol optimal dirumuskan dengan state feedback, akan tetapi pada implementasi hal ini tidak mungkin mudah diwujudkan karena selain tidak semua state terukur. Cara ini juga menjadi mahal (dalam arti dibutuhkan banyak instrumen pengukuran).

Permasalahan ini dapat diatasi dengan cara :

- Membuat suatu mekanisme untuk menentukan nilai state lain dari state yang terukur (state estimator \approx observer).
- Merubah formulasi state feedback menjadi formulasi output feedback.

State Observer^[11]

Dalam perancangan feedback optimal kontrol, diasumsikan bahwa semua *state variabel* tersedia untuk persamaan kontrol persamaan 3.16 untuk sebuah regulator,

$$u(t) = -K x(t) \quad (3.47)$$

Persamaan 3.47 dibangun untuk semua *state variabel* yang terukur. Namun sebagaimana penjelasan diatas bahwa dalam praktek ini tidak mungkin terjadi untuk sejumlah alasan yang mencakup biaya, atau *state* yang secara phisik tidak mungkin terukur. Sehingga diperlukan suatu *umpan balik state*, untuk mengamati, atau *mengestimasi* semua *state variabel* itu.

Selanjutnya teknik perancangan *state observer regulator* dapat diberikan melalui penyelesaian deterministik dengan menggunakan metode penempatan kutub (*pole placement*) yang diinginkan.^[16]

Tinjau persamaan keadaan berikut :

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

Dengan besaran sinyal kontrol u diberikan melalui persamaan 3.47 yang merupakan matriks gain optimal, persamaan ruang keadaan menjadi,

$$\dot{x}(t) = (A - BK)x(t) \quad (3.48)$$

Dimana $(A - BK)$ sebagai nilai eigen yang diinginkan yang dinyatakan sebagai $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ adalah kutub-kutub loop tertutup yang diinginkan (*desired pole placement*).

Tinjau rank matriks mampukontrol dengan rank matriks lebih kecil dari n jika dianggap bahwa sistem bukan keadaan yang lengkap dikontrol.

$$\text{rank}(\Theta_c) = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots \quad A^{n-1}B] = q < n \quad (3.49)$$

Ini berarti terdapat q vektor kolom yang secara linier tidak tergantung pada matriks mampukontrol. Jika kita definisikan q bebas secara linier sedemikian rupa sehingga vektor kolomnya menjadi f_1, f_2, \dots, f_q . Demikian juga, jika kita pilih $n-q$ sebagai tambahan n -vektor $v_{q+1}, v_{q+2}, \dots, v_n$ sedemikian rupa sehingga

$$P = [f_1 \mid f_2 \mid \dots \mid f_q \mid v_{q+1} \mid v_{q+2} \mid \dots \mid v_n] \quad (3.50)$$

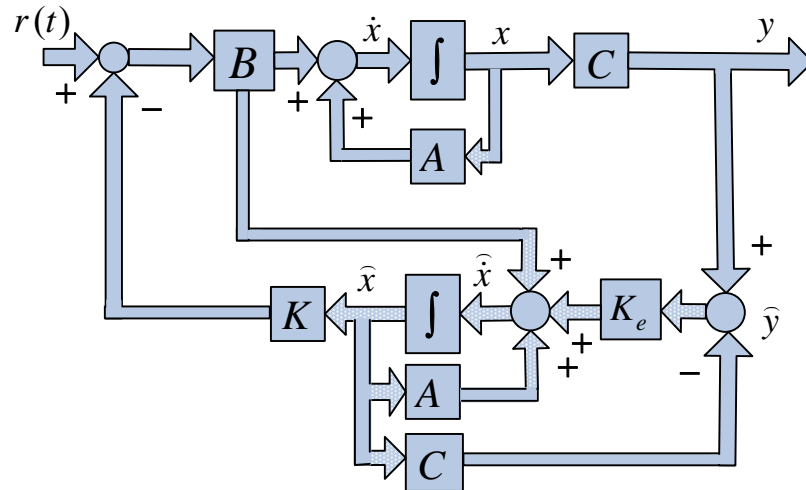
Adalah rank n . Dengan menggunakan matriks P sebagai matriks transformasi, didefinisikan

$$\hat{A} = P^{-1}AP = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = P^{-1}B = \begin{bmatrix} B_{11} \\ 0 \end{bmatrix}$$

(Penjelasan selanjutnya lihat lampiran III), sehingga dapat ditentukan besaran matriks gain observer berdasarkan nilai kutub-kutub yang diinginkan, sebagai berikut :

$$K_e = K P = [K_{e1} \quad K_{e2}] \quad (3.51)$$

Dimana dalam bentuk diagram blok dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.2 Blok diagram optimal state feedback dengan state observer

Dimana :

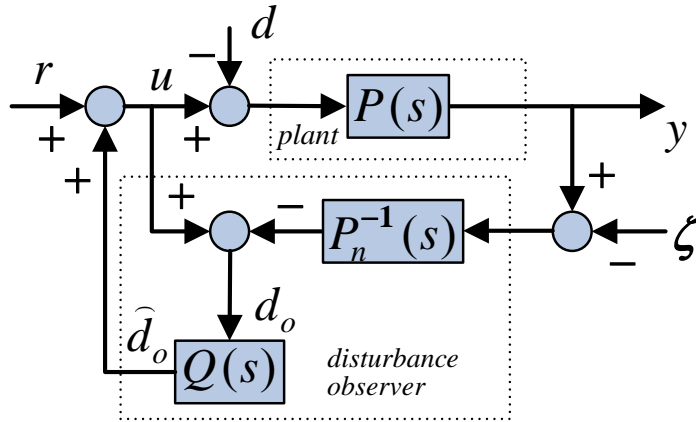
K : optimal state feedback

K_e : optimal gain state observer

3.6 Disturbance Observer

Disturbance observer digunakan untuk mengestimasi dan mengeleminir pengaruh gangguan dari luar. Estimasi gangguan dengan segera dikirim ke sistem mesin, sedemikian sehingga sistem pembangkit tidak terpengaruh oleh gangguan. Konsep dasar dari *disturbance observer* dapat dilihat pada blok diagram gambar 3.3 diatas untuk sistem linier time invariant.

Dengan diagram blok sebagai berikut :



Gambar 3.3 Blok diagram kontroller berbasis *Disturbance Observer*^[15]

Pada gambar, u merepresentasikan input kontrol, d merupakan gangguan yang tidak diketahui, r adalah input referensi, ζ noise sensor, y adalah *output plant* dan P berupa *plant* nominal. Dalam bagian observer, P_n merupakan *invers plant* nominal dan $Q(s)$ sebagai *low-pass filter*.

Perencanaan filter $Q(s)$ adalah salah satu bagian penting dalam struktur *disturbance observer* dan untuk memenuhi kekausalasan, dengan derajat LPF relatif lebih besar atau sama besar terhadap fungsi transfer *plant* nominal untuk meredam noise dari akibat pengukuran.

Pada gambar 3.3 didapatkan persamaan closed loop sebagai berikut :

$$Y(s) = \left\{ Q(s)P_n^{-1}(s) + [I - Q(s)]P^{-1}(s) \right\}^{-1} \left\{ r - Q(s)P_n^{-1}(s)\zeta - [I - Q(s)]d \right\} \quad (3.52)$$

Dimana s merupakan operator Laplace dengan gangguan ekuivalen d_o dari gambar 3.3 diberikan rumusan sebagai berikut :

$$d_o = u - P_n^{-1}(s)(y - \zeta) \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned}
&= [P^{-1}(s) - P_n^{-1}(s)] y + d - P_n^{-1}(s) \zeta \\
&= \Delta P(s) y + d + P_n^{-1}(s) \zeta
\end{aligned}$$

Disini $\Delta P(s)$ diterminologikan sebagai pertubation (kekacuan) pada plant riil dari plant nominal. Oleh karena itu *disturbance observer* mengestimasi bukan hanya gangguan (dari luar) tetapi juga gangguan (*pertubation*) pada *plant* riil dari *plant* nominal. Ketika *invers plant* nominal $P_n^{-1}(s)$ termasuk beberapa turunannya, *disturbance observer* mengestimasi gangguan d_o melalui suatu *low-pass* filter $Q(s)$ sebagai berikut :

$$\hat{d}_o = Q(s) d_o \quad (3.54)$$

3.7 Umpan Balik Estimasi Dalam Bentuk Persamaan Keadaan

Perancangan ini bertujuan untuk mencari harga variabel estimasi input kontrol \hat{u} sebagai selisih input kontrol u yang diakibatkan oleh adanya gangguan dari luar, dimana plant nominal pada bagian observer dikenali melalui *invers* plant nominal termasuk beberapa turunannya yang diumpanbalikkan sehingga mampu mengestimasi gangguan d .

Tinjau persamaan keadaan (state space) sistem berikut ini :

$$\dot{x} = A x + B u$$

Dapat dituliskan persamaan dalam bentuk berikut :

$$B u = (\dot{x} - A x)$$

Untuk memenuhi syarat perkalian matriks, dapat ditulis :

$$B^T B u = B^T (\dot{x} - A x)$$

Persamaan sinyal kontrol dapat dituliskan, sebagai berikut :

$$u = (B^T B)^{-1} B^T (\dot{x} - A x)$$

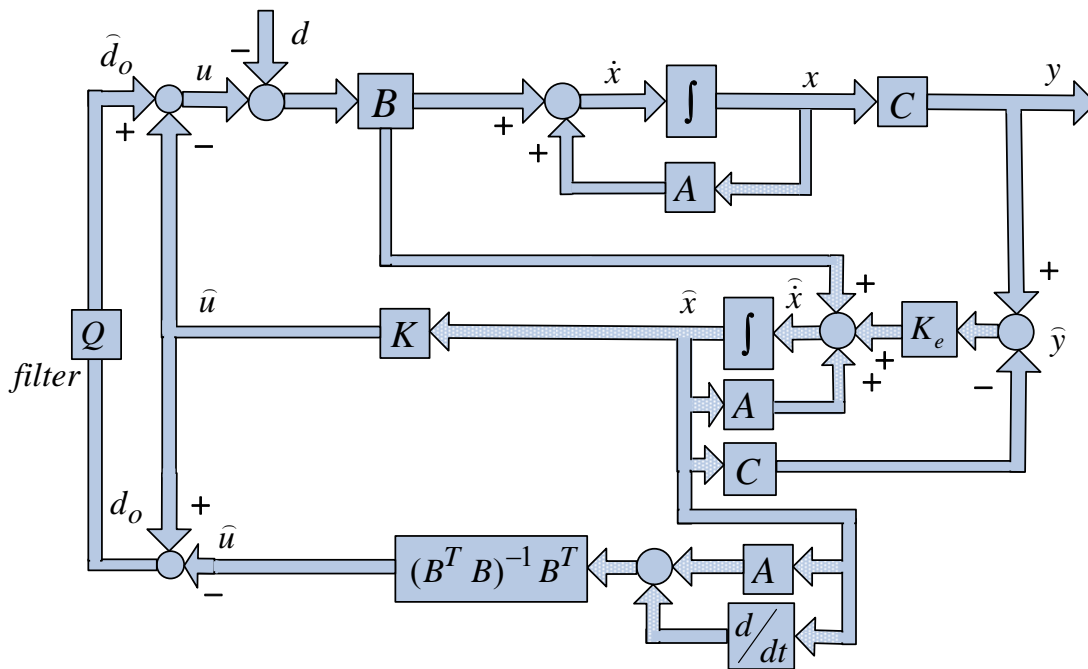
Persamaan dapat diturunkan menjadi persamaan input kontrol estimasi, menjadi :

$$\hat{u} = (B^T B)^{-1} B^T (\hat{\dot{x}} - A \hat{x})$$

Dimana *invers* plant nominal merupakan representasi input kontrol estimasi \hat{u} .

Sedangkan untuk perancangan *low pass* filter Q , dalam penelitian ini metode pendekatan bersifat deterministik, dengan asumsi bahwa sistem dianggap tidak memperkirakan unsur *noise* pengukuran. sehingga LPF ber-orde 0.

Selanjutnya perancangan disturbance observer dapat disajikan dalam bentuk diagram blok pada perancangan mesin tunggal yang ter-interkoneksi, sebagai berikut :



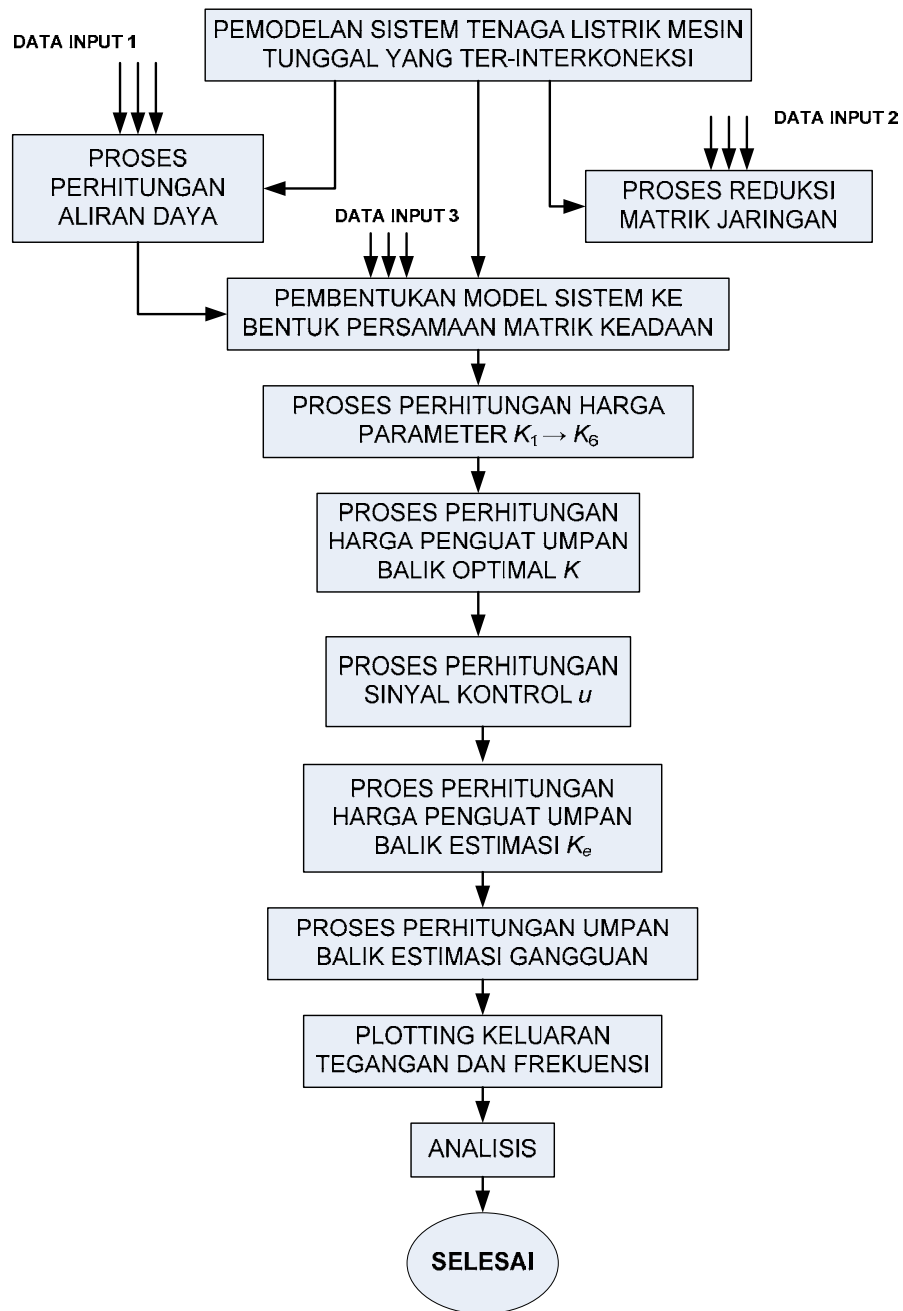
Gambar 3.4 Blok diagram gain optimal menggunakan state observer berbasis Disturbance Observer

BAB IV

PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK MESIN TUNGGAL YANG TER-INTERKONEKSI

Untuk keperluan perancangan penelitian ini dilakukan melalui beberapa tahap. Dimana tahap *pertama* dalam simulasi dan analisa ini adalah membentuk model jaringan tenaga listrik mesin tunggal yang ter-interkoneksi. Tahap *kedua* adalah mencari data yang dikelompokkan menjadi 3 data yaitu : data untuk keperluan perhitungan aliran daya (pada kasus ini digunakan data asumsi beban puncak pada suatu keadaan tertentu di bus jaringan 500 kV), data untuk keperluan proses reduksi matriks jaringan, dan data untuk proses perhitungan parameter-parameter mesin tunggal yang ter-interkoneksi. Tahap *ketiga* adalah proses perhitungan aliran daya, proses reduksi matriks jaringan, dan proses perhitungan parameter sistem mesin tunggal yang ter-interkoneksi. Tahap *keempat* adalah proses penerapan umpan balik optimal Linier Quadratic Regulator (LQR) pada sistem mesin tunggal yang ter-interkoneksi. Dimana tujuan dari tahap ini adalah menentukan sinyal umpan balik optimal pada sisi eksitasi dan sisi turbin pada masing-masing pembangkit. Tahap *kelima* adalah perancangan state feedback observer pada pembangkit mesin tunggal yang ter-interkoneksi dimana perkiraan semua variabel keadaan dapat diamati. Tahap *keenam* adalah proses mengestimasi dan mengeleminir pengaruh gangguan yang bersifat dinamik (gangguan kecil) berupa gangguan perubahan pembebanan selama tahapan proses penyaluran dan distribusi. Dalam hal ini dinamika sistem pembangkit akan ber-adaptasi terhadap perubahan beban yang terjadi. Proses estimasi ini dalam penerapan pengamatan gangguan dikenal dengan metode Disturbance Observer.

Dalam bentuk diagram blok dapat diperlihatkan sebagai berikut :



Gambar 4.1 Tahapan Penelitian

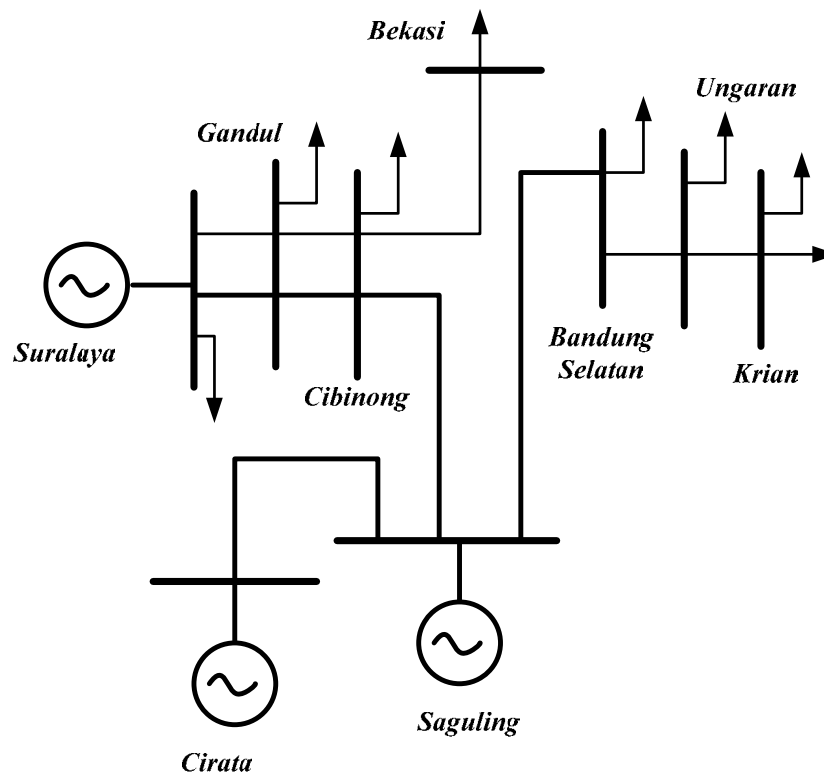
4.1 Data Dan Analisa Perhitungan Parameter Jaringan

Berdasarkan data jaringan yang disajikan berikut penelitian ini, model dan perhitungan parameter jaringan pembangkit dapat dipenuhi untuk perhitungan aliran daya, reduksi matriks jaringan dan parameter-parameter jaringan.

4.1.1 Data Jaringan Dan Pembangkit

Data-data teknis jaringan sistem tenaga listrik Jawa-Bali tegangan 500 kV tahun 1990, sebagai sistem yang dibahas dalam penelitian ini.

Sistem jaringan dimaksud diberikan sebagaimana gambar berikut^[14] :



Gambar 4.2 Sistem Jaringan Tenaga Listrik Jawa-Bali 500 kV

Sistem terdiri atas :

1. Bus *Suralaya*, *Saguling* dan *Cirata* adalah Bus Pembangkit
2. Bus *Gandul*, *Cibinong*, *Bekasi*, *Bandung*, *Ungaran*, dan *Krian* adalah Bus Beban

A. Data Saluran Dan Beban Puncak

Tabel 4.1 Data Saluran Sistem 9 Bus

Nama Bus	Impedansi (Ω /Km/phase)	Jarak Antar BusBar (Km)
Suralaya – Gandul	0.01260 + j 0.41820	110.890
Gandul – Cibinong	0.01260 + j 0.41820	21.275
Cibinong – Bekasi	0.01260 + j 0.41820	37.920
Cibinong – Saguling	0.02109 + j 0.83190	80.340
Saguling – Cirata	0.02520 + j 0.83640	25.160
Saguling – Bandung Selatan	0.01054 + j 0.41595	37.510
Bandung Selatan – Ungaran	0.02520 + j 0.83640	342.867
Ungaran – Krian	0.02520 + j 0.83640	251.100

Tabel 4.2 Data Beban Puncak Maret 1990

Nama BusBar	MW	MVAR
Suralaya	130.0	-65.0
Saguling	0.0	0.0
Cirata	0.0	0.0
Gandul	580.0	170.0
Cibinong	0.0	-60.0
Bekasi	410.0	90.0
Bandung Selatan	350.0	241.0
Ungaran	140.0	380.0
Krian	170.0	140.0

B. Data Generator

Tabel 4.3 Data Eksitasi Masing-masing Generator

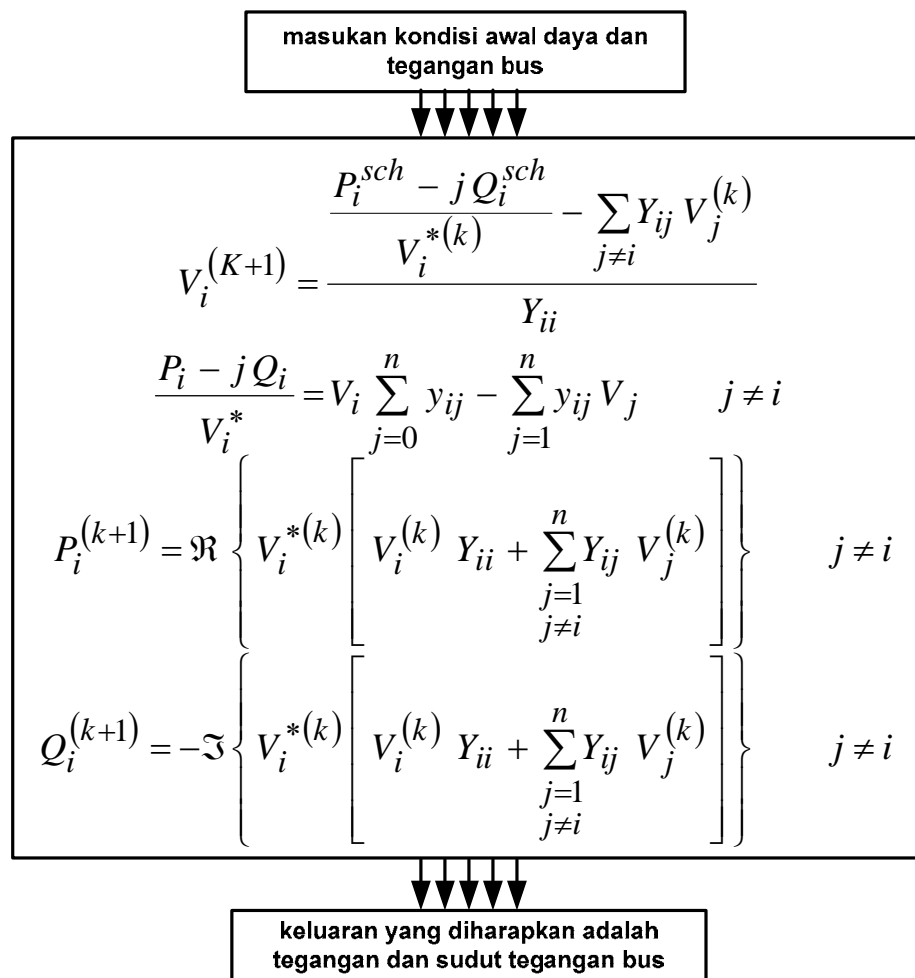
Pembangkit	K_A	T_A	K_F	T_F	K_e	T_e
Suralaya	400.0	0.05	0.04	0.5	1.0	0.98
Saguling	100.0	0.02	0.0	0.0	1.0	0.1
Cirata	400.0	0.05	1.0	1.0	1.0	0.95

Tabel 4.4 Data Parameter Generator

Pembangkit	M	x_q	x'_d	x_d	T'_{do}	D	K_{gui}	T_{tui}	T_t	R
Suralaya	6.9	2.19	0.297	2.0	7.9	0.6	1	0.2	0.1	5
Saguling	8.0	0.568	0.22	1.11	15.0	0.6	1	0.2	0.1	4
Cirata	8.0	0.573	0.3	0.9	10.8	0.6	1	0.2	0.1	4

4.1.2 Perhitungan Aliran Daya

Tujuan dari perhitungan daya dalam kasus ini adalah untuk mencari harga tegangan dan sudut pada masing-masing bus yang dilakukan secara iterasi dengan menggunakan metode *Gauss Seidel*.



Gambar 4.3 Diagram blok perhitungan aliran daya

Keterangan :

N : Jumlah Bus, $i : 1 \dots N$, $n : 1 \dots N$

Q_i : Daya reaktif bus ke i , P_i : Daya aktif bus ke i

V_i : Tegangan bus ke i , Y_{ii} : Admitansi bus

4.1.3 Reduksi Matriks Jaringan

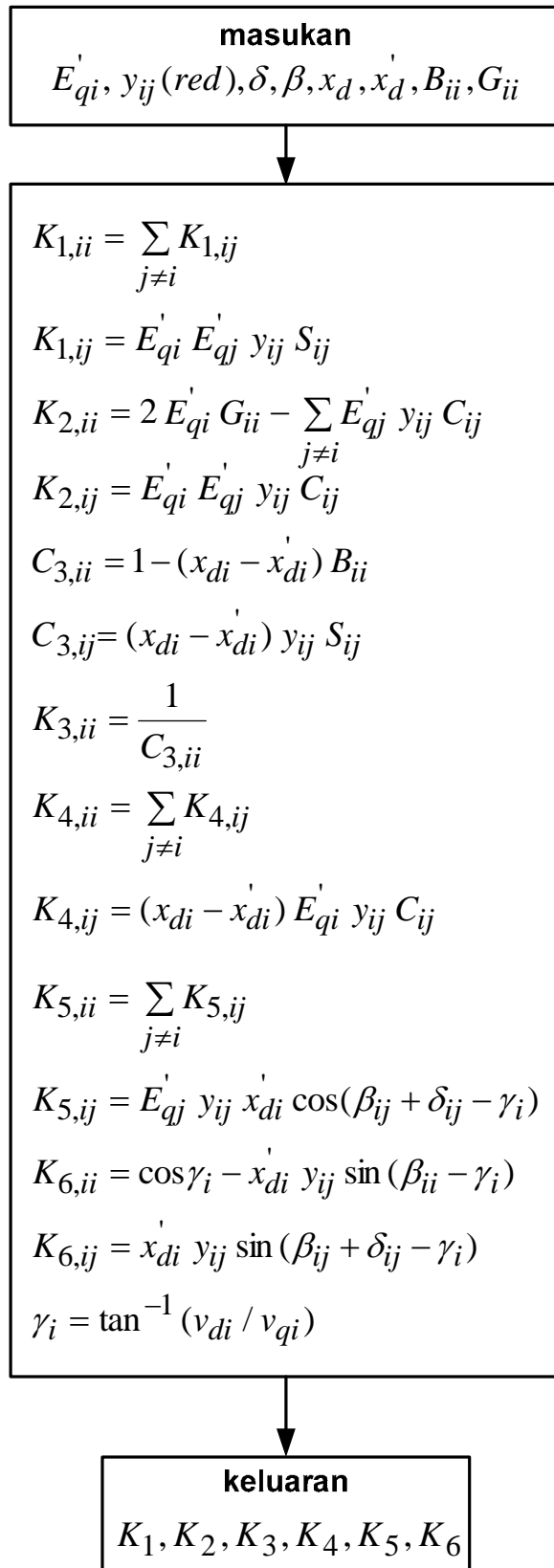
Matriks reduksi jaringan dilakukan dalam mencari parameter jaringan pembangkit tenaga listrik yang ter-interkoneksi. Dalam kasus ini akan direduksi matriks jaringan berukuran 9×9 (terdiri dari 9 bus) menjadi matriks jaringan 3×3 (yang terdiri atas 3 pembangkit). Metode yang digunakan dalam reduksi ini adalah *Kron Reduction Formula* sebagaimana proses reduksi ini uraian selengkapnya dapat diperlihatkan pada Lampiran II.



Gambar 4.4 Proses Reduksi Matriks Jaringan

4.1.4 Perhitungan Parameter Sistem Jaringan

Di dalam jaringan pembangkit tenaga listrik yang ter-interkoneksi terdapat parameter yang sudah tetap (terbawa dari sifat mesin) juga ada parameter yang muncul akibat kondisi sistem. Di sini akan disajikan perhitungan parameter akibat kondisi sistem.



Gambar 4.5 Proses Perhitungan Parameter Jaringan

4.2 Pemodelan Plant Pembangkit Tenaga Listrik

Hasil dari perhitungan aliran daya digunakan sebagai data masukan untuk menghitung harga parameter-parameter $K_1 \rightarrow K_6$. Berikut ini adalah hasil perhitungan variable-variabel $K_1 \rightarrow K_6^*$.

Nilai parameter-parameter mesin $K_1 \rightarrow K_6$ pada kondisi beban puncak

Mesin 1

$K_{1.11} = 0.0787$	$K_{1.12} = 0.0545$	$K_{1.13} = 0.0242$
$K_{2.11} = 0.0131$	$K_{2.12} = 0.0231$	$K_{2.13} = 0.0142$
$K_{3.11} = 0.9768$	$K_{3.12} = 0.0000$	$K_{3.13} = 0.0000$
$C_{3.11} = 1.0238$	$C_{3.12} = 0.0117$	$C_{3.13} = 0.0054$
$K_{4.11} = 0.0074$	$K_{4.12} = 0.0046$	$K_{4.13} = 0.0028$
$K_{5.11} = 0.0001$	$K_{5.12} = 0.0001$	$K_{5.13} = 0.0000$
$K_{6.11} = 1.0004$	$K_{6.12} = 0.0002$	$K_{6.13} = 0.0001$

Mesin 2

$K_{1.21} = 0.0536$	$K_{1.22} = 0.0885$	$K_{1.23} = 0.0349$
$K_{2.21} = 0.0257$	$K_{2.22} = 0.0117$	$K_{2.23} = 0.0174$
$K_{3.21} = 0.0000$	$K_{3.22} = 0.9856$	$K_{3.23} = 0.0000$
$C_{3.21} = 0.0063$	$C_{3.22} = 1.0146$	$C_{3.23} = 0.0042$
$K_{4.21} = 0.0027$	$K_{4.22} = 0.0005$	$K_{4.23} = 0.0001$
$K_{5.21} = 0.0002$	$K_{5.22} = 0.0001$	$K_{5.23} = 1.4143$
$K_{6.21} = 0.0002$	$K_{6.22} = 1.0004$	$K_{6.23} = 0.0001$

Mesin 3

$K_{1.31} = 0.0262$	$K_{1.32} = 0.0377$	$K_{1.33} = 0.0639$
$K_{2.31} = 0.0089$	$K_{2.32} = 0.0082$	$K_{2.33} = -0.0052$
$K_{3.31} = 0.0000$	$K_{3.32} = 0.0000$	$K_{3.33} = 0.9281$
$C_{3.31} = 0.0265$	$C_{3.32} = 0.0375$	$C_{3.33} = 1.0775$
$K_{4.31} = 0.0082$	$K_{4.32} = 0.0076$	$K_{4.33} = 0.0158$
$K_{5.31} = 0.0000$	$K_{5.32} = 0.0000$	$K_{5.33} = 0.0001$
$K_{6.31} = 0.0001$	$K_{6.32} = 0.0001$	$K_{6.33} = 0.9976$

*) Dimana nilai parameter-parameter ini dihitung berdasarkan data [Adi Supriyanto, Basuki Rahmat, Seminar PSDC PLN-ITB], bahwa dengan adanya reduksi matriks, matriks system menjadi 3×3 .^[14]

Berdasarkan data variabel dan parameter masing-masing mesin, persamaan dalam bentuk state space masing-masing mesin dan persamaan state space sistem dapat ditentukan.

Didalam analisa ini akan dilakukan dengan tiga cara, yakni :

Pertama, masing-masing mesin dilihat kestabilan serta respon tanpa adanya kontrol optimal state feedback. Jika pada salah satu mesin tidak stabil maka pada mesin tersebut dilakukan penempatan pole agar sistem stabil. Selanjutnya dirancangkan kontrol optimal menuju indeks kinerja performansi sistem. Namun dalam kenyataan implementatif tidak semua parameter sistem terukur, sehingga dibangun suatu rancang pengamatan atau dikenal dengan state feedback observer pada masing-masing mesin, dengan dasar mampu kontrol dan teramati pada sistem diharapkan pemenuhan keinginan perancangan terpenuhi.

Kedua, sebagai pembanding dan pemenuhan analisa perancangan tipe mesin tunggal yang ter-interkoneksi dalam suatu jaringan sistem tenaga listrik. Perancangan disturbance observer pada mesin tunggal (dalam hal ini perancangan dimaksud dilakukan pada pembangkit Suralaya). Bertujuan untuk mengestimasi dan mengeleminir pengaruh gangguan dari luar dalam proses adaptasi sistem.

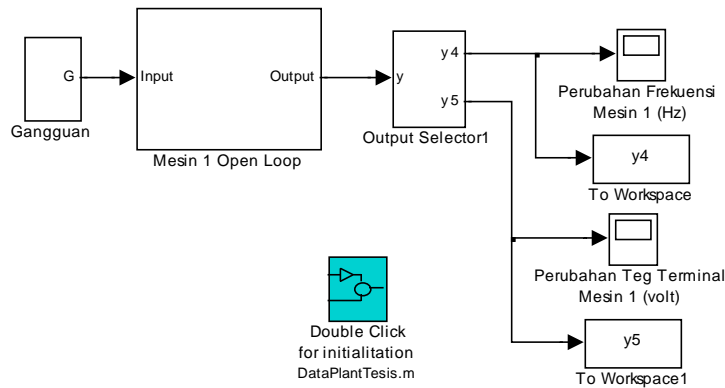
Ketiga, memberikan gangguan pada masing-masing mesin untuk selanjutnya dianalisa pengaruh gangguan tersebut terhadap masing-masing mesin maupun sistem, dalam bentuk variasi gangguan dinamik.

Untuk selanjutnya pembangkit Suralaya disebut mesin 1, pembangkit Saguling disebut mesin 2 dan pembangkit Cirata disebut mesin 3. Analisa kestabilan masing-masing mesin diberikan sebagai berikut :

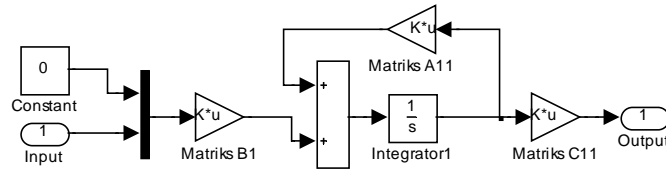
4.2.1 Analisa Kestabilan Pada Mesin 1

Didalam analisa kestabilan ini, mesin 1 dalam keadaan open loop tanpa memasukkan pengaruh atau interaksi mesin 2 dan mesin 3. namun seperti telah disebutkan dalam uraian sebelumnya bahwa didalam menghitung parameter-parameter K_1 s/d K_6 sudah diperhitungkan adanya interaksi dari mesin lain.

Dalam bentuk diagram blok dapat disajikan persamaan ruang keadaan (state space) mesin 1 sebagai berikut :



Dengan subsistem mesin 1 sebagai berikut :



Gambar 4.6 Diagram Blok Simulink Ruang Keadaan Mesin 1

Dimana melalui persamaan ruang keadaan yang dibangun, matriks variabel keadaan mesin 1 diberikan sebagai berikut :

$$A_{11} = 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -0.0050 & 0 & 0 & -0.0010 & 0 & 0 \\ 0.0050 & -0.0050 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3770 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0000 & -0.0001 & -0.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0000 & 0 & -0.0001 & 0.0001 \\ 0 & 0 & 0.0008 & 0 & -8.0032 & -0.0200 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 8000 \end{bmatrix}$$

$$C_{11} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0787 & 0.6000 & 0.0131 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0001 & 0 & 1.0004 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Untuk memenuhi kriteria perancangan, kestabilan mesin 1 terpenuhi dengan mensyaratkan nilai eigen dari matriks A berada pada sisi kiri bidang imajiner. Dan dengan menggunakan program Bantu simulasi Matlab maka diperoleh respon mesin 1 dengan nilai eigen yang memenuhi syarat kestabilan.

Nilai eigen Matriks $A_{11} =$

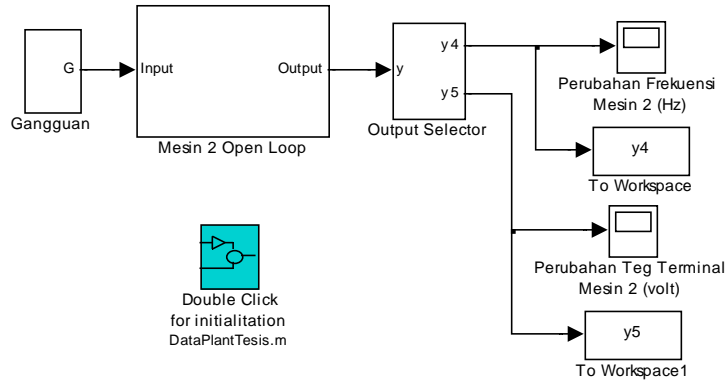
- 5.0000
- 5.0000
- 10.0648 +30.2383i
- 10.0648 -30.2383i
- 0.0435 + 2.0732i
- 0.0435 - 2.0732i

4.2.2 Analisa Kestabilan Pada Mesin 2

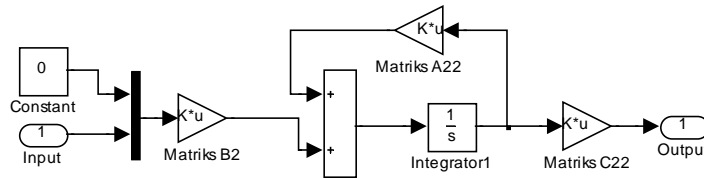
Didalam analisa kestabilan ini, mesin dalam keadaan open loop tanpa memasukkan pengaruh atau interaksi mesin 1 dan mesin 3. namun seperti telah disebutkan dalam uraian sebelumnya bahwa didalam menghitung parameter-parameter K_1 s/d K_6 sudah diperhitungkan adanya interaksi dari mesin lain.

Dalam bentuk diagram blok dapat disajikan persamaan ruang keadaan

(state space) mesin 2 sebagai berikut :



Dengan subsistem mesin 2 sebagai berikut :



Gambar 4.7 Diagram Blok Simulink Ruang Keadaan Mesin 2

Dimana melalui persamaan ruang keadaan yang dibangun, matriks variabel keadaan mesin 2 diberikan sebagai berikut :

$$A_{22} = 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -0.0050 & 0 & 0 & -0.0013 & 0 & 0 \\ 0.0050 & -0.0050 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3770 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0000 & -0.0001 & -0.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0000 & 0 & -0.0001 & 0.0001 \\ 0 & 0 & 0.0008 & 0 & -5.0020 & -0.0500 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 5000 \end{bmatrix}$$

$$C_{22} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0885 & 0.6000 & 0.0117 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0001 & 0 & 1.0004 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Untuk memenuhi kriteria perancangan, kestabilan mesin 2 terpenuhi dengan mensyaratkan nilai eigen dari matriks A berada pada sisi kiri bidang imajiner. Dan dengan menggunakan program Bantu simulasi Matlab maka diperoleh respon mesin 2 dengan nilai eigen yang memenuhi syarat kestabilan.

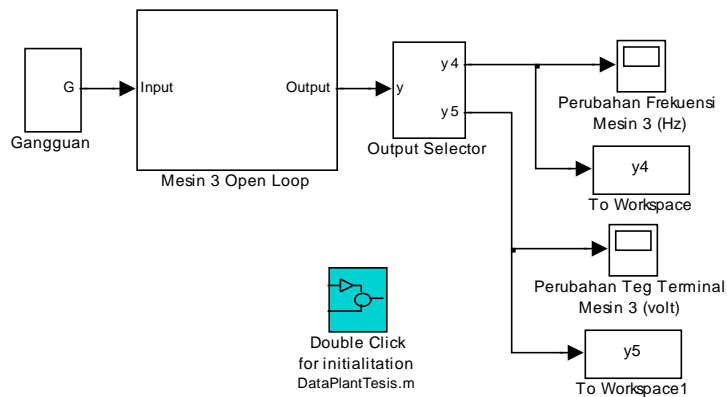
Nilai eigen Matriks $A_{22} =$

- 5.0000
- 5.0000
- 42.0586
- 0.0375 + 2.0419i
- 0.0375 - 2.0419i
- 8.0090

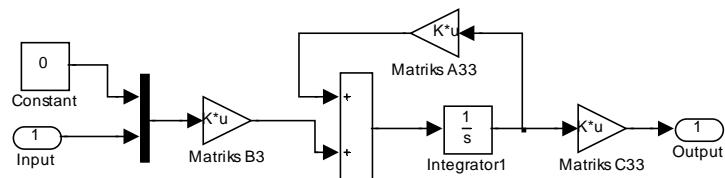
4.2.3 Analisa Ketabilan Pada Mesin 3

Didalam analisa kestabilan ini, mesin 3 dalam keadaan open loop tanpa memasukkan pengaruh atau interaksi mesin 1 dan mesin 2. namun seperti telah disebutkan dalam uraian sebelumnya bahwa didalam menghitung parameter-parameter K_1 s/d K_6 sudah diperhitungkan adanya interaksi dari mesin lain.

Dalam bentuk diagram blok dapat disajikan persamaan ruang keadaan (state space) mesin 3 sebagai berikut :



Dengan subsistem mesin 3 sebagai berikut :



Gambar 4.8 Diagram Blok Simulink Ruang Keadaan Mesin 3

Dimana melalui persamaan ruang keadaan yang dibangun, matriks variabel keadaan mesin 3 diberikan sebagai berikut :

$$A_{33} = 1.0e + 003 * \begin{bmatrix} -0.0050 & 0 & 0 & -0.0013 & 0 & 0 \\ 0.0050 & -0.0050 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3770 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0000 & -0.0001 & -0.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0000 & 0 & -0.0001 & 0.0001 \\ 0 & 0 & 0.0008 & 0 & -7.9808 & -0.0200 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 8000 \end{bmatrix}$$

$$C_{33} = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0639 & 0.6000 & -0.0052 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0001 & 0 & 0.9976 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Untuk memenuhi kriteria perancangan, kestabilan mesin 3 terpenuhi dengan mensyaratkan nilai eigen dari matriks A berada pada sisi kiri bidang imajiner. Dan dengan menggunakan program Bantu simulasi Matlab maka diperoleh respon mesin 3 dengan nilai eigen yang memenuhi syarat kestabilan.

Nilai eigen Matriks $A_{33} =$

- 5.0000
- 5.0000
- 0.0375 + 1.7349i
- 0.0375 - 1.7349i
- 10.0499 +25.2974i
- 10.0499 -25.2974i

4.3. Perancangan Kontroller

Proses ini bertujuan mencari umpan balik optimal gain K melalui penguatan umpan balik linier kuadratik regulator dan gain K_e state feedback observer, dimana perancangan kontroller ini memenuhi syarat kestabilan sistem, syarat mampukontrol (*controlability*) dan keteramatan (*observability*).

4.3.1 Penguatan Umpan Balik Linier Kuadratik Regulator

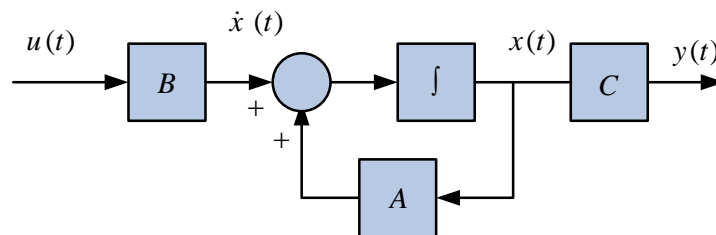
Desain penguatan umpan balik optimal linier quadratik regulator berupa matriks gain penguatan K , dimana sistem dicek dahulu kestabilan dan mampu kontrol.

Sehingga memenuhi syarat kontrol optimal dalam perancangan sistem dan dengan menentukan harga matrik pembobot dengan syarat $Q \geq 0$, dan $R > 0$ maka penguatan umpan balik optimal pada sistem dapat ditentukan.

Tinjau persamaan keadaan (*state space*) sistem berikut ini :

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t)$$

Dalam bentuk diagram blok diberikan,



Gambar 4.9 Diagram blok variabel keadaan

Dengan adanya umpan balik K , persamaan dengan variabel keadaan dari sistem diatas melalui solusi persamaan Aljabar Riccati, mempunyai akar-akar persamaan karakteristik sebagai berikut :

$$\left| s I - (A - B K^T) \right| = 0$$

Sebagaimana telah disinggung pada diatas, perancangan gain optimal umpan balik yang dikenakan pada sistem harus memenuhi syarat kestabilan melalui akar-akar persamaan karakteristik sistem dalam bidang imajiner sumbu S , dalam hal ini karakteristik nilai eigen matriks A dari masing-masing mesin telah terpenuhi.

Selanjutnya dengan memberikan kontrol optimal linier kuadratik regulator yaitu dengan memilih matriks pembobot Q yang menyatakan penyimpangan minimum dari variabel keadaan dan matriks pembobot R yang menyatakan formulasi minimum energi sinyal input, dan melalui metode *try and error* yaitu dengan

memilih komponen matriks pembobot sesuai dengan variabel keluaran yang diinginkan relatif terhadap keluaran yang lain, diperoleh :

$$Q = 0.1 * \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 120000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 120000 & 1 \end{bmatrix}; \quad R = 5 * \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Dengan program Matlab dan simulasi dimana listening program inisialisasi gain optimal diberikan dalam bentuk function program Matlab, berikut :

```
function [a]=HitungKOpt(matA,matB,matR,matQ);
X = ARE(matA, matB*matB', matQ);
K = inv(matR)*matB'*X;
a = K;
```

Dan dengan melakukan perhitungan dengan program bantu Matlab, diberikan gain umpan balik optimal dan solusi persamaan matrik Riccati pada masing-masing mesin sebagai berikut :

4.3.1.1 Perancangan Kontrol Optimal Pada Mesin 1

Dalam hal ini perancangan telah memenuhi kestabilan sistem melalui nilai eigen Matriks A_{11} pada penjelasan diatas. Selanjutnya sistem diperiksa syarat mampukontrol (*controllability*) melalui sinyal masukan sisi eksitasi (u_{E1}) sebagai input gangguan yang diberikan. Dimana listening program Matlab diberikan sebagai berikut :

```
>> ctrb (A11,B1(:,2))
```

$$\Theta_{c1} = 1.0e + 011 * \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0000 & -0.0000 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0 & 0 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 \\ 0 & 0 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0003 & -0.0004 \\ 0 & 0 & -0.0000 & 0.0026 & -0.0028 & -2.5974 \end{bmatrix}$$

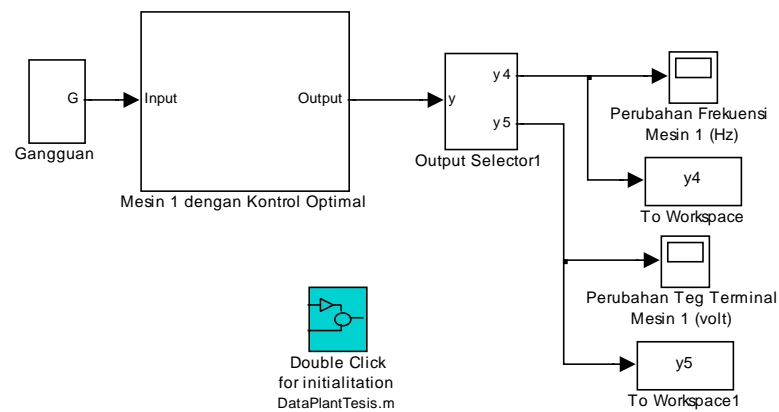
```
>> rank (ctrb (A11,B1(:,2)))
```

ans =

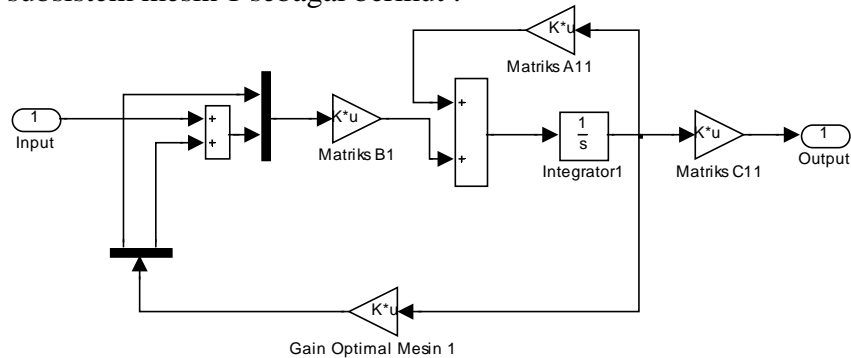
6

Dalam bentuk diagram blok dapat disajikan persamaan ruang keadaan

(*state space*) mesin 1 dengan perancangan kontrol optimal, sebagai berikut :



Dengan subsistem mesin 1 sebagai berikut :



Gambar 4.10 Diagram Blok Simulink Ruang Keadaan Mesin 1 Dengan Kontrol Optimal

Dimana listing program Matlab diberikan sebagai berikut :

```
%Mesin 1
% Harga gain Kalman
K1 = HitungKOpt(A11,B1,R,Q)
```

```
% Solusi Aljabar Riccati Equation
Ri1 = ARE(A11, B1*transpose(B1), Q);
```

Diperoleh matriks gain umpan balik optimal $K_1 =$

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0.5202 & 2.1834 & 0.0000 & -0.0285 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0075 & -0.1451 & 31.0427 & 0.0635 \end{bmatrix}$$

Matriks solusi persamaan Riccati $Ri1 =$

$$Ri1 = 1.0e + 004 \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0002 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0001 & 0.0004 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.0004 & 1.9022 & -0.0001 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0002 & -0.0000 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

4.3.1.2 Perancangan Kontrol Optimal Pada Mesin 2

Dalam hal ini perancangan telah memenuhi kestabilan sistem melalui nilai eigen Matriks A_{22} pada penjelasan diatas. Selanjutnya sistem diperiksa syarat mampukontrol (*controllability*) melalui sinyal masukan sisi eksitasi (u_{E2}) sebagai input gangguan yang diberikan. Dimana listening program Matlab diberikan sebagai berikut :

```
>> ctrb (A22,B2(:,2))
```

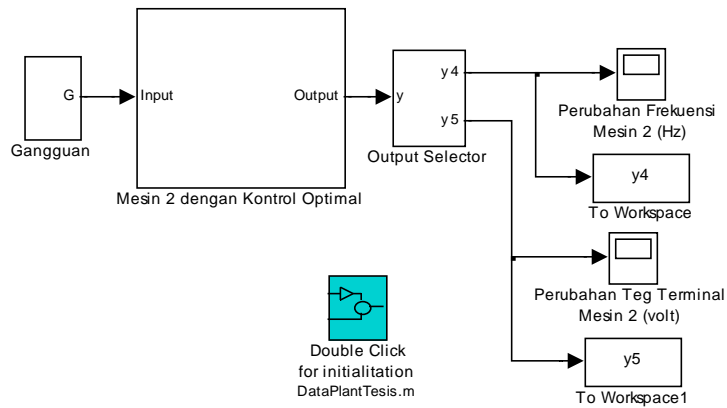
$$\Theta_{c2} = 1.0e + 011 * \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0000 & -0.0000 \\ 0 & 0 & 0 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 \\ 0 & 0 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 \\ 0 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0003 & 0.0129 \\ 0 & -0.0000 & 0.0001 & -0.0046 & 0.1929 & -8.1146 \end{bmatrix}$$

```
>> rank (ctrb (A22,B2(:,2)))
```

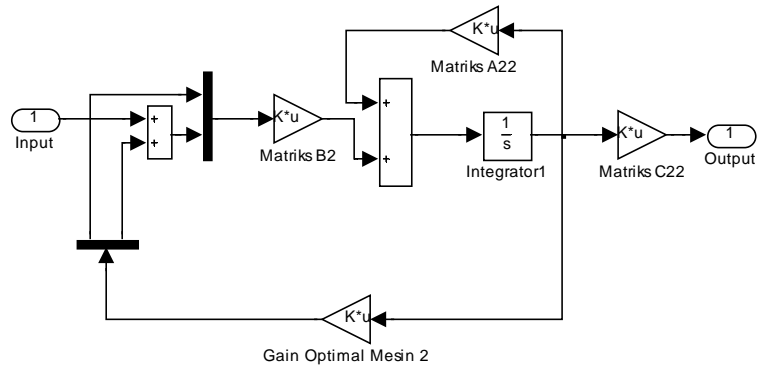
```
ans =
```

```
6
```

Dalam bentuk diagram blok dapat disajikan persamaan ruang keadaan (state space) mesin 2 dengan perancangan kontrol optimal, sebagai berikut :



Dengan subsistem mesin 2 sebagai berikut :



Gambar 4.11 Diagram Blok Simulink Ruang Keadaan Mesin 2 Dengan Kontrol Optimal

Dimana listinging program Matlab diberikan sebagai berikut :

```
%Mesin 2
% Harga gain Kalman
K2 = HitungKOpt(A22,B2,R,Q)
% Solusi Aljabar Riccati Equation
Ri2 = ARE(A22, B2*transpose(B2), Q);
```

Diperoleh matriks gain umpan balik optimal $K_2 =$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 0.5202 & 2.1834 & 0.0000 & -0.0357 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0037 & -0.0475 & 310868 & 0.0619 \end{bmatrix}$$

Matriks solusi persamaan Riccati Ri2 =

$$Ri2 = 1.0e + 004 \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0002 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0001 & 0.0005 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.0005 & 2.2721 & -0.0001 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0001 & -0.0000 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

4.3.1.3 Perancangan Kontrol Optimal Pada Mesin 3

Dalam hal ini perancangan telah memenuhi kestabilan sistem melalui nilai eigen Matriks A_{33} pada penjelasan diatas. Selanjutnya sistem diperiksa syarat mampukontrol (*controlability*) melalui sinyal masukan sisi eksitasi (u_{E3}) sebagai input gangguan tegangan yang diberikan. Dimana listening program Matlab diberikan sebagai berikut :

```
>> ctrb (A33,B3(:,2))
```

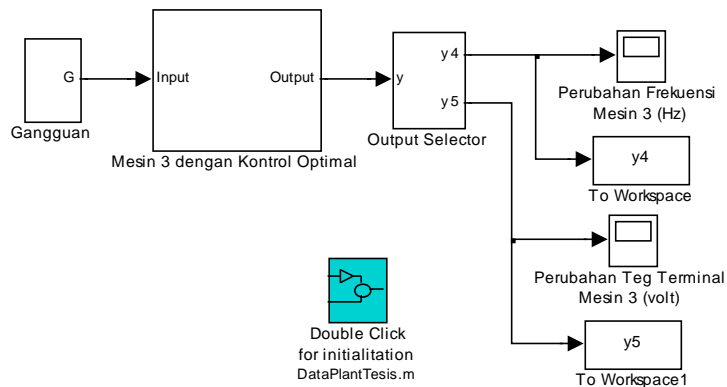
$$\Theta_{c3} = 1.0e + 010 * \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.0000 & 0.0000 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \\ 0 & 0 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 \\ 0 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0016 & -0.0138 \\ 0.0000 & -0.0000 & -0.0003 & 0.0173 & -0.1469 & -9.8699 \end{bmatrix}$$

```
>> rank (ctrb (A33,B3(:,2)))
```

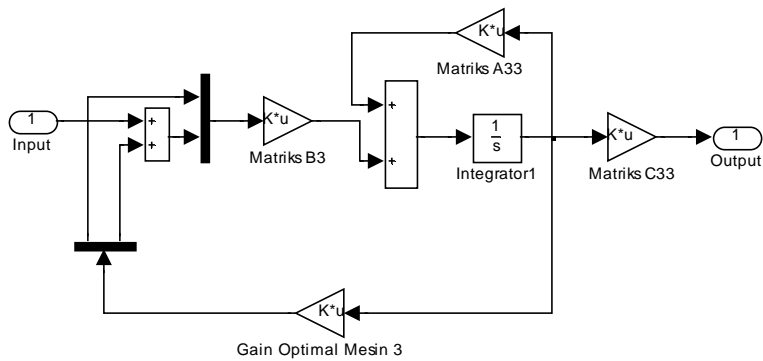
ans =

6

Dalam bentuk diagram blok dapat disajikan persamaan ruang keadaan (state space) mesin 3 dengan perancangan kontrol optimal, sebagai berikut :



Dengan subsistem mesin 3 sebagai berikut :



Gambar 4.12 Diagram Blok Simulink Ruang Keadaan Mesin 3 Dengan Kontrol Optimal

Dimana listing program Matlab diberikan sebagai berikut :

```
%Mesin 3
% Harga gain Kalman
K3 = HitungKOpt(A33,B3,R,Q)
% Solusi Aljabar Riccati Equation
Ri3 = ARE(A33, B3*transpose(B3), Q);
```

Diperoleh matriks gain umpan balik optimal $K_3 =$

$$K_3 = \begin{bmatrix} 0.5202 & 2.1834 & 0.0000 & -0.0358 & -0.0000 & -0.0000 \\ -0.0000 & 0.0000 & -0.0031 & 0.0680 & 31.1431 & 0.0633 \end{bmatrix}$$

Matriks solusi persamaan Riccati Ri3 =

$$Ri3 = 1.0e + 0.004 \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0002 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0001 & 0.0006 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.0006 & 3.1442 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0001 & -0.0000 & -0.0000 \\ -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

4.3.2 Perancangan Gain State Feedback Observer

Proses ini bertujuan untuk mencari harga variabel estimasi penguatan umpan balik (K_e) melalui perancangan pengamat keadaan (state observer).

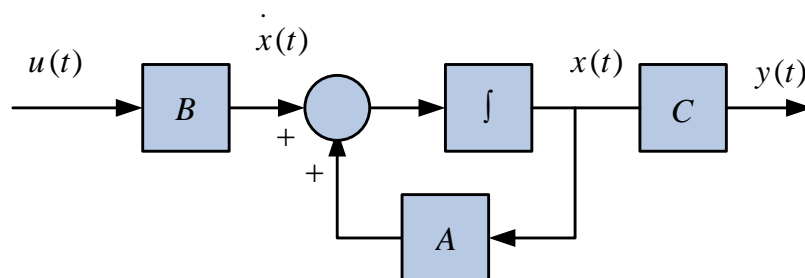
Dimana pengamat keadaan mengobservasi variabel keadaan atas dasar pengukuran variabel keluaran dan variabel kontrol. Dalam hal ini, pengukuran variabel keluaran dilakukan pada perubahan frekuensi melalui perubahan kecepatan sudut rotor ($\Delta \omega_i$) dan perubahan tegangan terminal (Δv_{ti}) mesin i .

Tinjau persamaan keadaan (state space) sistem berikut ini :

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t)$$

$$y(t) = C x(t)$$

Dalam bentuk diagram blok diberikan,



Gambar 4.13 Diagram blok variabel keadaan

Perancangan gain state feedback observer yang dikenakan pada sistem harus memenuhi syarat kestabilan melalui akar-akar persamaan karakteristik sistem

dalam bidang imajiner sumbu S berdasarkan metode penempatan kutub (*pole placement*), dalam hal ini karakteristik nilai eigen matriks A yang diinginkan (*desired pole*) terpenuhi pula untuk syarat kestabilan.

Dengan program Matlab dan simulasi dimana listening program inialisasi gain state feedback observer diberikan dalam bentuk function program Matlab, sebagai berikut :

```
function [a]= HitungKeObs(matA,matC,despoles);
KeTotal = place(matA',matC',despoles);
Ke4 = KeTotal(:,4);
Ke5 = KeTotal(:,5);
Ke = [Ke4 Ke5];
a = Ke;
```

Selanjutnya untuk memenuhi syarat keteramatan (*observability*), sistem harus diuji untuk memenuhi keadaan mampu teramati pada masing-masing mesin.

Dengan bantuan program simulasi Matlab, diberikan gain feedback observer pada masing-masing mesin sebagai berikut :

4.3.2.1 Perancangan Gain State Feedback Observer Pada Mesin 1

Dengan adanya umpan balik optimal maka persamaan state matriks A yang diinginkan untuk pengamat keadaan, diberikan :

$$A' = A_{11} - B_1 * K_1$$

$$A' = 1.0e + 005 * \begin{bmatrix} -0.0001 & -0.0001 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \\ 0.0001 & -0.0001 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0038 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0000 & 0 & -0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & -0.0000 & -0.0006 & 0.0116 & -2.5634 & -0.0053 \end{bmatrix}$$

Nilai eigen A' adalah =

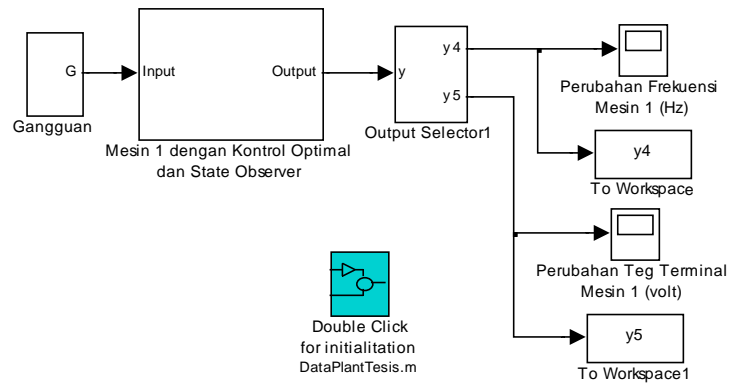
1.0e+002 *

- 457.11

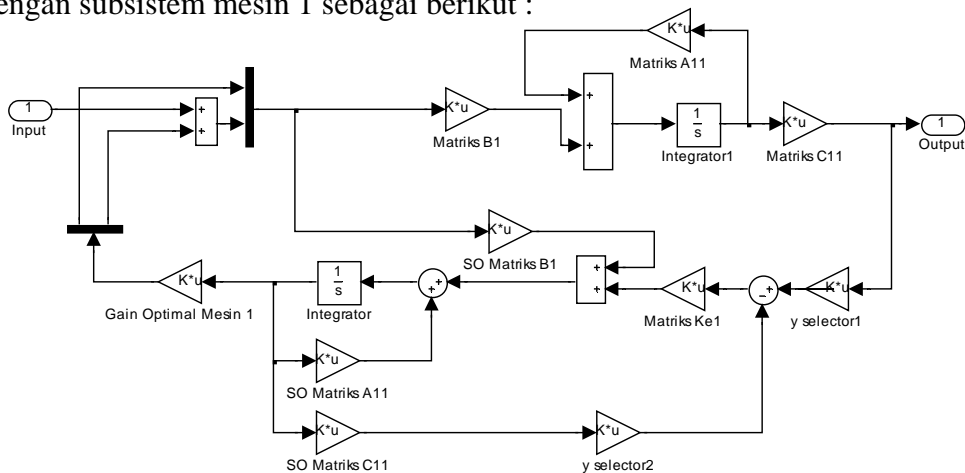
- 6.30 + 7.27i

- 6.30 – 7.27i
- 71.14
- 0.04 + 2.07i
- 0.04 - 2.07i

Dalam bentuk diagram blok dapat disajikan persamaan ruang keadaan (state space) mesin 1 dengan perancangan kontrol optimal gain state feedback observer, sebagai berikut :



Dengan subsistem mesin 1 sebagai berikut :



Gambar 4.14 Diagram Blok Simulink Ruang Keadaan Mesin 1 Dengan Kontrol Optimal Gain State Feedback Observer

Selanjutnya sistem diperiksa syarat mampu teramati (*observability*) melalui variabel matriks A dan C₁₁. Dimana listening program Matlab diberikan sebagai berikut :

```
>> rank (obsv (A',C11))
```

BAB V

SIMULASI DAN ANALISA SINYAL KONTROL PADA PEMBANGKIT TENAGA LISTRIK MESIN TUNGGAL YANG TER-INTERKONEKSI

Dalam bab ini akan disajikan hasil simulasi dan analisa sinyal kontrol yang diberikan pada pembangkit tenaga listrik mesin tunggal yang ter-interkoneksi dalam suatu jaringan pembangkit tenaga listrik.

Adapun simulasi yang disajikan sebagai desain perancangan yang telah dirumuskan pada bab IV, terdiri atas :

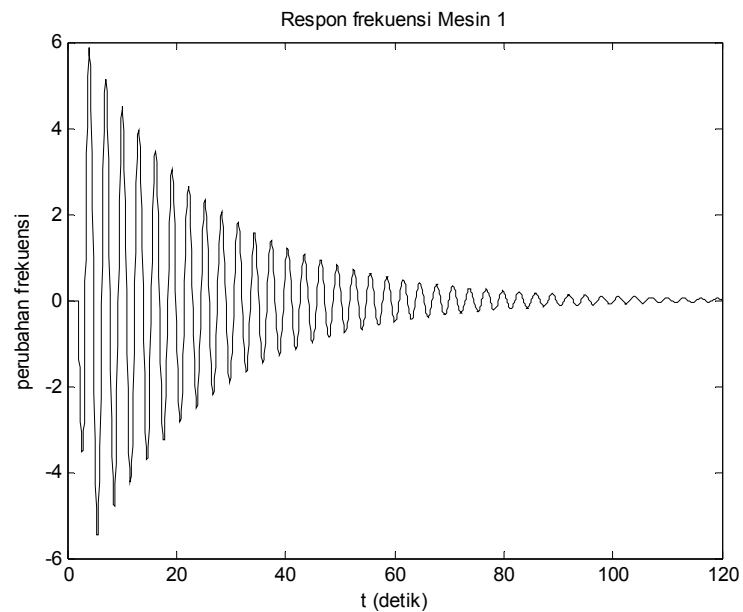
- Kondisi open loop masing-masing mesin
- Perancangan kontrol optimal masing-masing mesin
- Perancangan kontrol optimal gain state feedback observer masing-masing mesin
- Perancangan disturbance observer Mesin 1 (Mesin Tunggal)
- Interkoneksi tanpa controller
- Interkoneksi dengan kontrol optimal
- Interkoneksi dengan kontrol optimal gain state feedback observer
- Interkoneksi Dengan Pengaruh Disturbance Observer Pada Mesin 1 (Mesin Tunggal)

Dengan memberikan input gangguan sebagai simulasi perubahan beban pada jaringan tenaga listrik, yang setara dengan nilai perubahan tegangan dan frekuensi yang diijinkan. Dalam hal ini perubahan tegangan yang diijinkan adalah sebesar 5% atau 25 kV dari besaran tegangan jaringan pada terminal (500 kV) dan

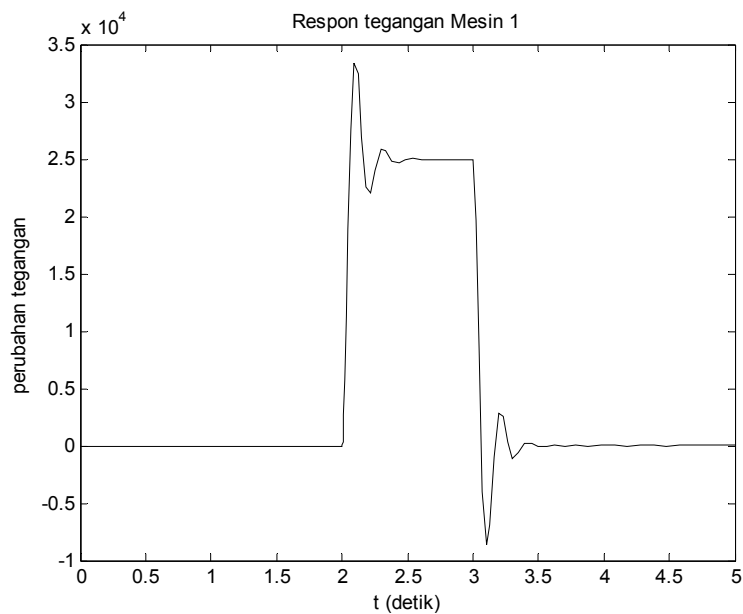
perubahan frekuensi yang diijinkan adalah sebesar 0.5 Hz dari 50 Hz besaran frekuensi pada perubahan kecepatan sudut rotor mesin pada jaringan interkoneksi.

5.1 Simulasi Dan Analisa Tanpa Kontroller (Open Loop)

5.1.1 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 1



(a)

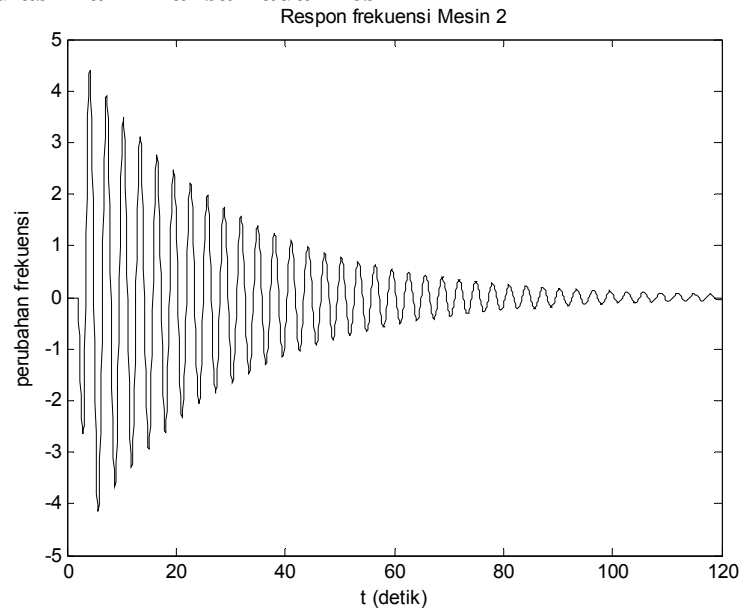


(b)

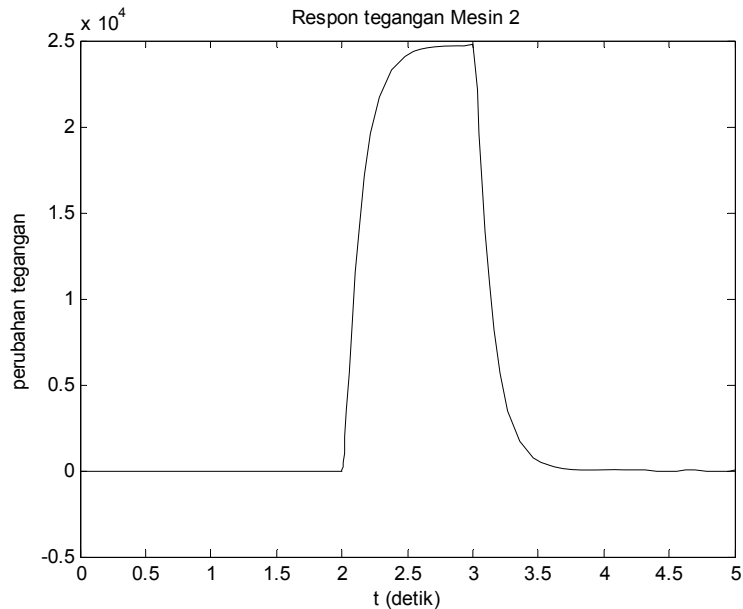
Gambar 5.1 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 1 (open loop), (b) Respon perubahan tegangan Mesin 1 (open loop)

Terlihat sistem stabil pada kondisi eigen matriks A_{11} yang diberikan, namun perubahan frekuensi masih sangat besar, setara dengan ± 6 Hz dan tegangan mengalami *overshoot* diatas perubahan yang diijinkan, setara dengan ≈ 35 kV.

5.1.2 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 2



(a)

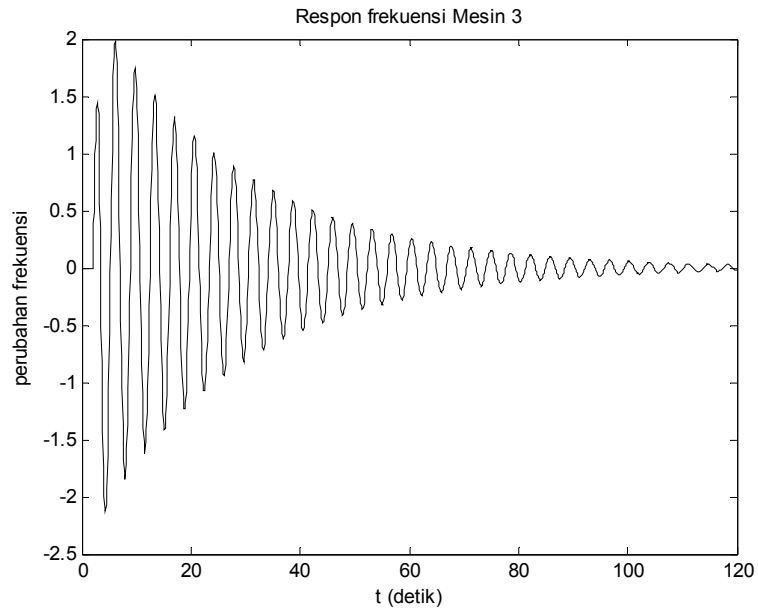


(b)

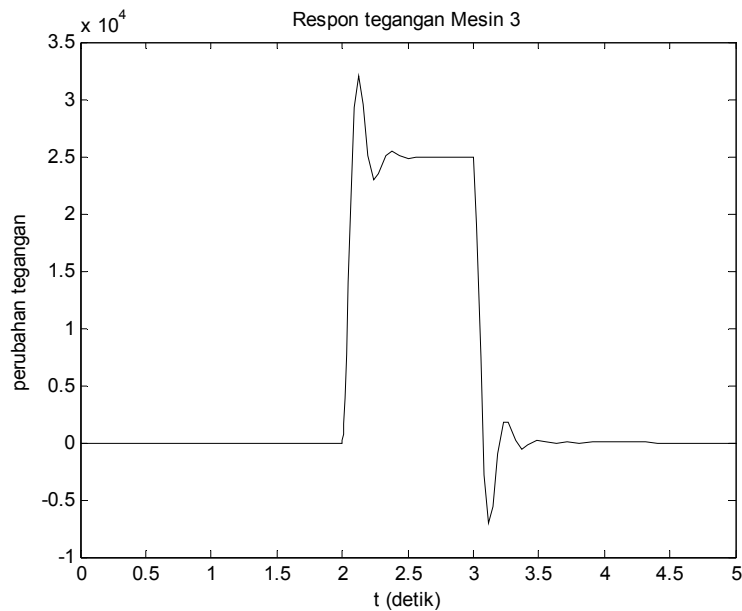
Gambar 5.2 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 2 (open loop), (b) Respon perubahan tegangan Mesin 2 (open loop)

Terlihat sistem stabil pada kondisi eigen matriks A_{22} yang diberikan, namun perubahan frekuensi masih sangat besar, setara dengan ± 4.5 Hz, dan perubahan tegangan menuju keadaan mantap (*steady state*), setara dengan ≈ 25 kV walaupun masih mengalami waktu peredaman pada titik kerja.

5.1.3 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 3



(a)



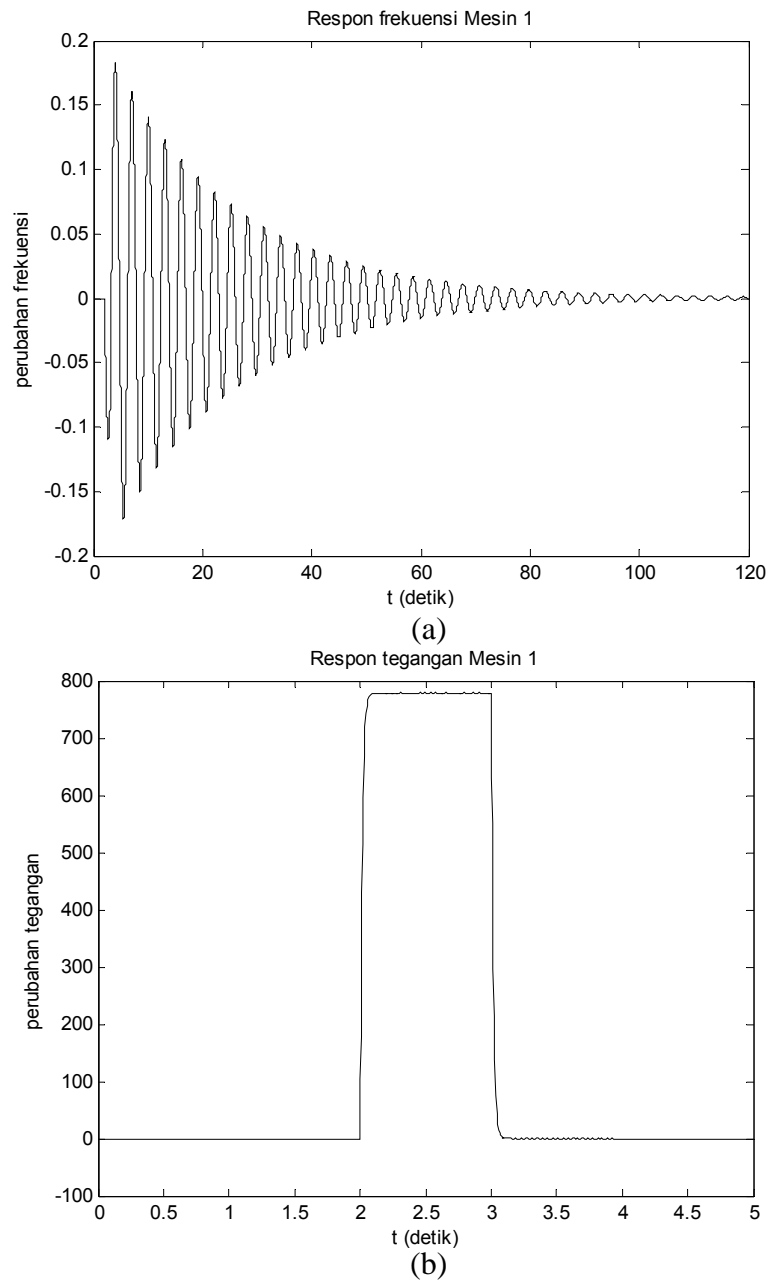
(b)

Gambar 5.3 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 3 (open loop), (b) tegangan Mesin 3 (open loop)

Terlihat sistem stabil pada kondisi eigen matriks A_{33} namun perubahan frekuensi masih besar pada nilai yang diijinkan, atau setara ± 2 Hz dan tegangan mengalami *overshoot* diatas perubahan yang diijinkan, atau setara dengan ≈ 3.25 kV.

5.2 Simulasi Dan Analisa Perancangan Kontrol Optimal

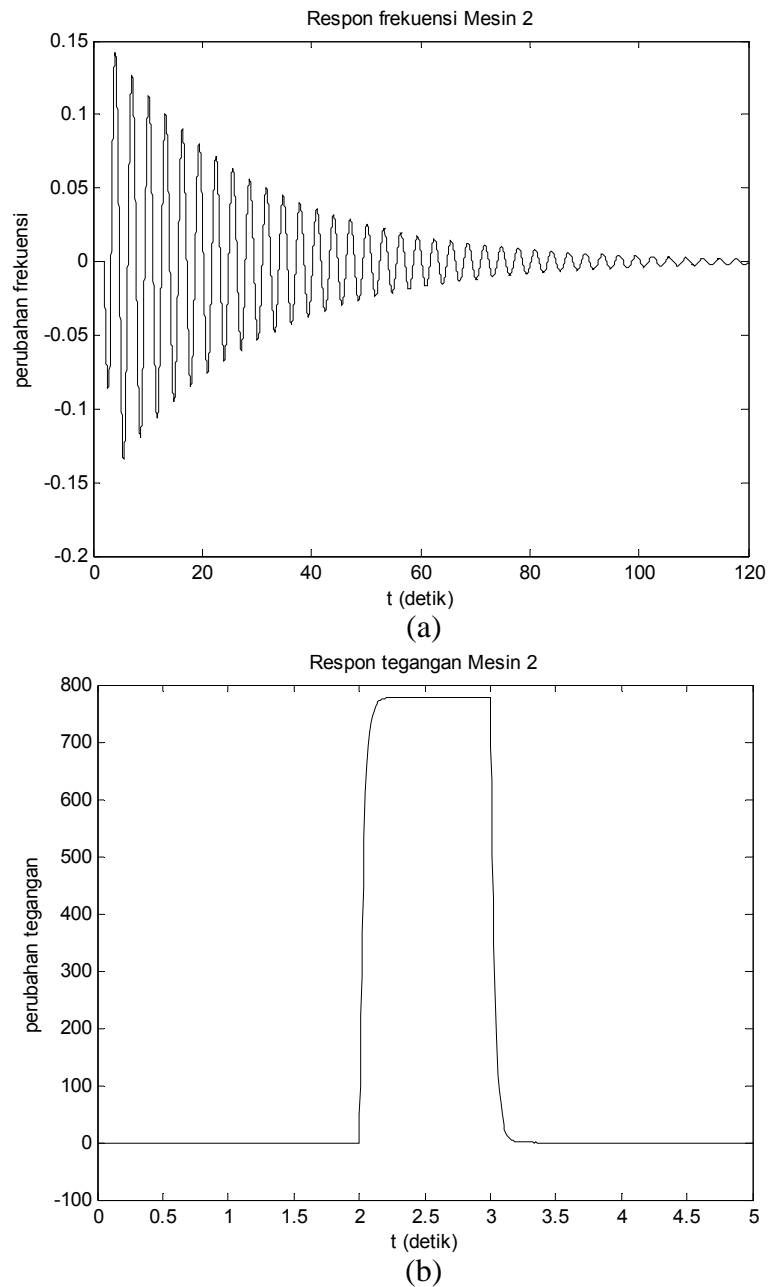
5.2.1 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 1



Gambar 5.4 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 1, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 1 dengan gain optimal

Terlihat dari respon bahwa sistem telah memenuhi indeks kriteria desain yang diharapkan, dimana perubahan frekuensi telah memenuhi nilai yang diijinkan, atau setara dengan ± 0.175 Hz dan perubahan tegangan berada pada kisaran ≈ 800 V pada kondisi puncak menuju keadaan mantap (*steady state*).

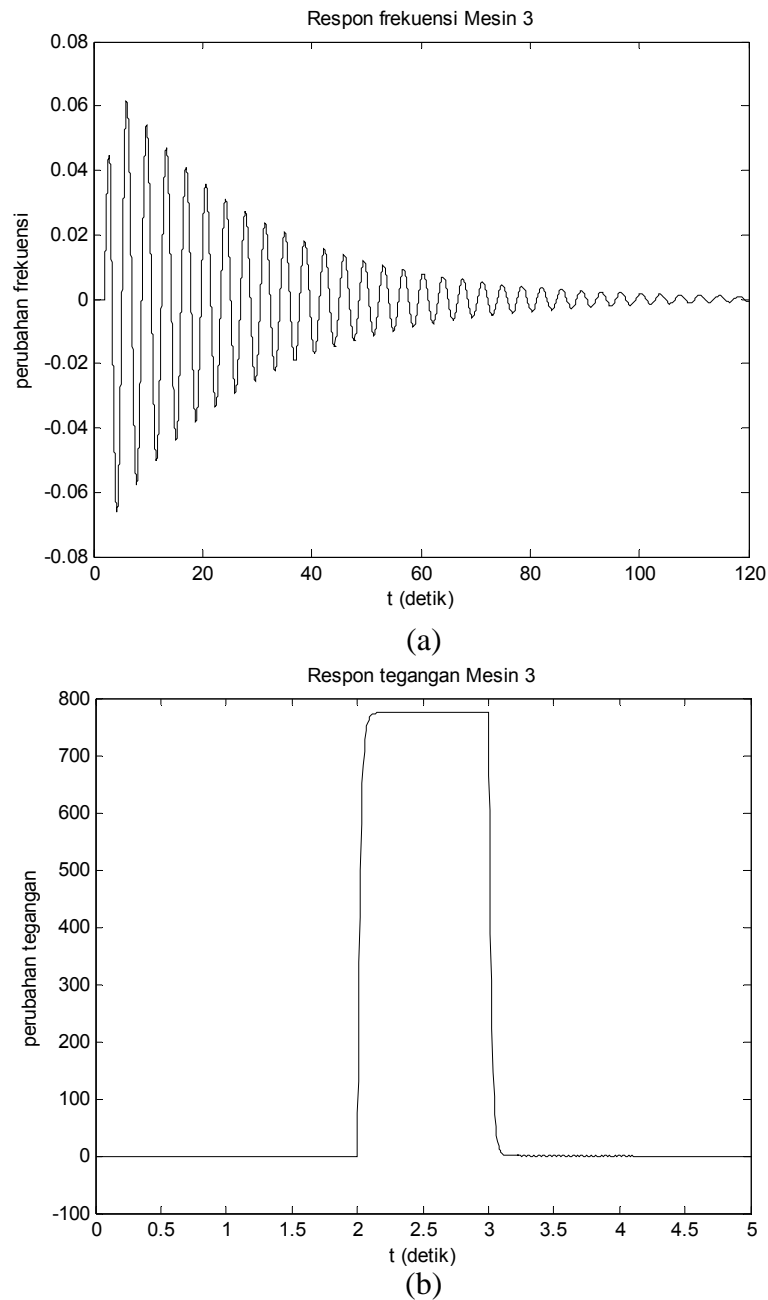
5.2.2 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 2



Gambar 5.5 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 2, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 2 dengan gain optimal

Terlihat dari respon bahwa sistem telah memenuhi indeks kriteria desain yang diharapkan, dimana perubahan frekuensi telah memenuhi nilai yang diijinkan, atau setara dengan ± 0.14 Hz dan perubahan tegangan berada kisaran ≈ 800 V pada kondisi puncak menuju keadaan mantap (*steady state*).

5.2.3 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 3

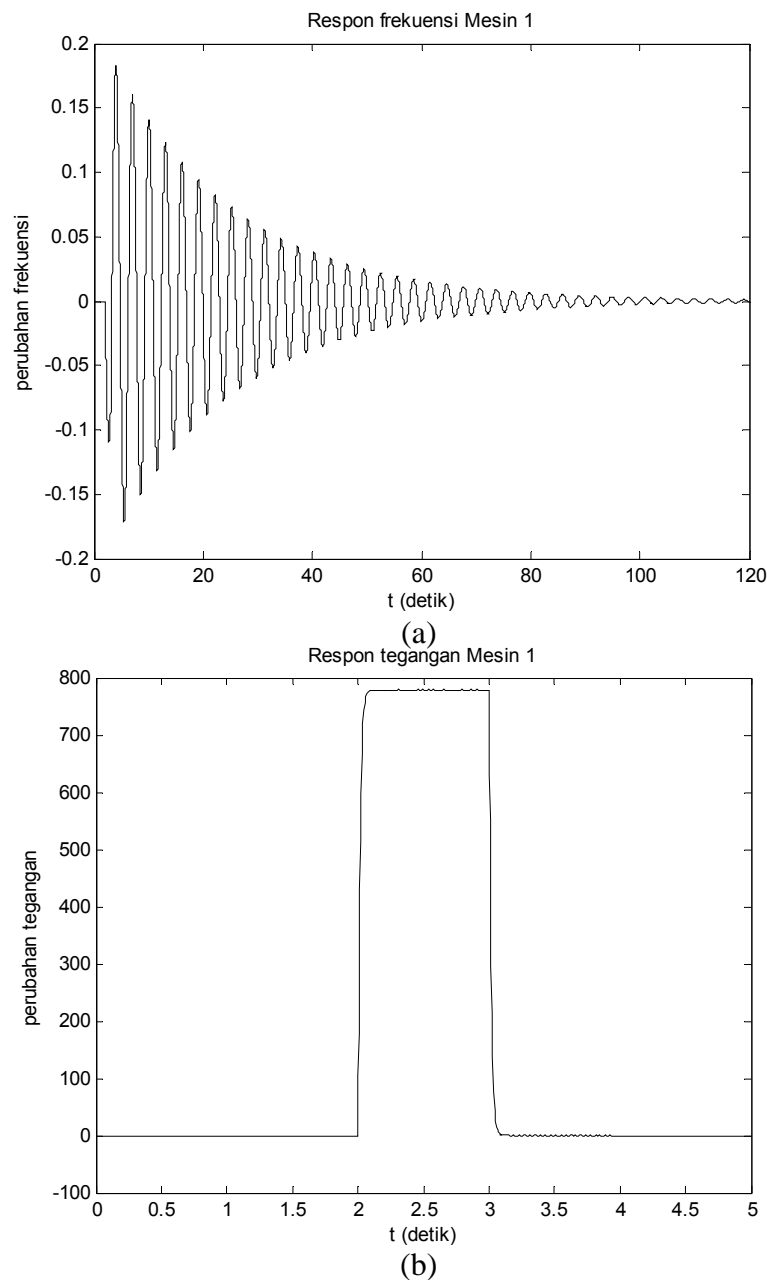


Gambar 5.6 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 3, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 3 dengan gain optimal

Terlihat dari respon bahwa sistem telah memenuhi indeks kriteria desain yang diharapkan, dimana perubahan frekuensi telah memenuhi nilai yang diijinkan, atau setara dengan ± 0.06 Hz dan perubahan tegangan berada kisaran ≈ 800 V.

5.3 Simulasi Dan Analisa Perancangan Kontrol Optimal Gain State Feedback Observer

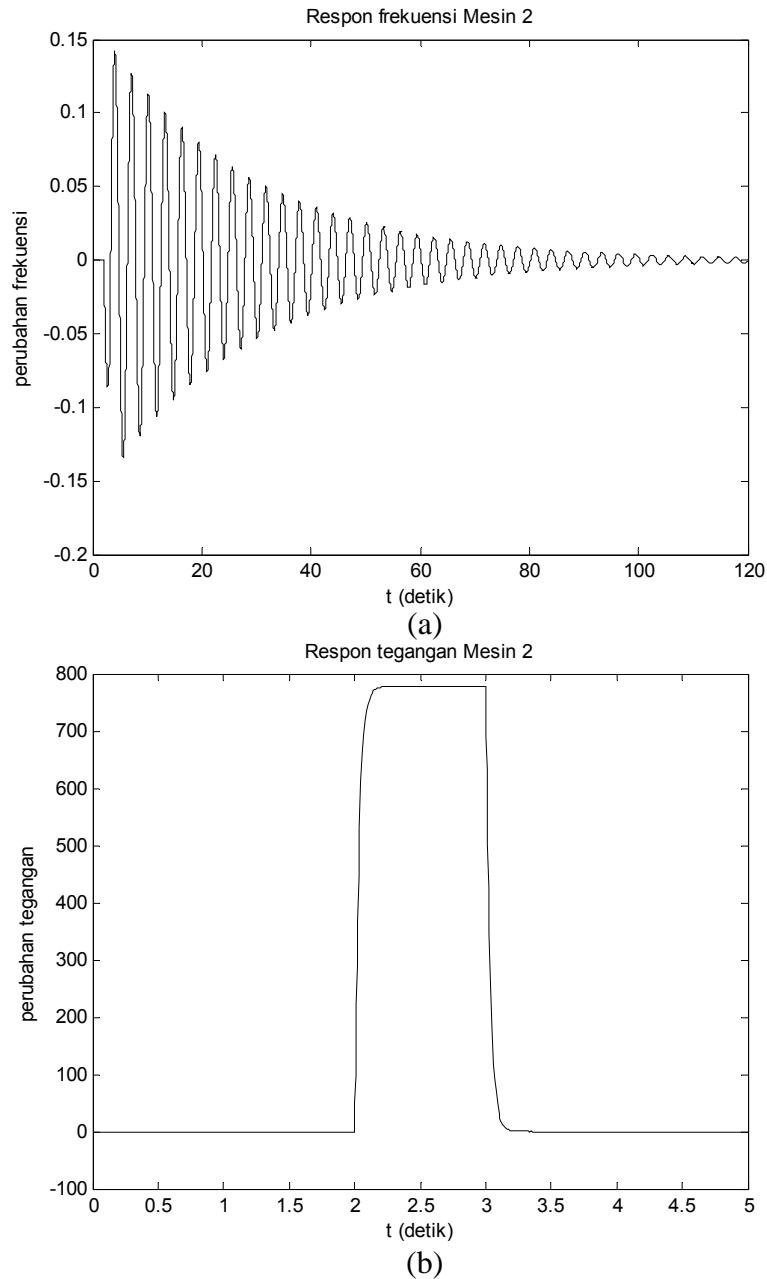
5.3.1 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 1



Gambar 5.7 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 1, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 1 dengan gain optimal state feedback observer

Terlihat bahwa respon perubahan frekuensi dan tegangan sebagaimana perancangan kontrol optimal, dimana gain state feedback observer sebagai umpanbalik penguatan yang memenuhi matriks keadaan pengamatan pengukuran keluaran sistem dan variabel kontrol.

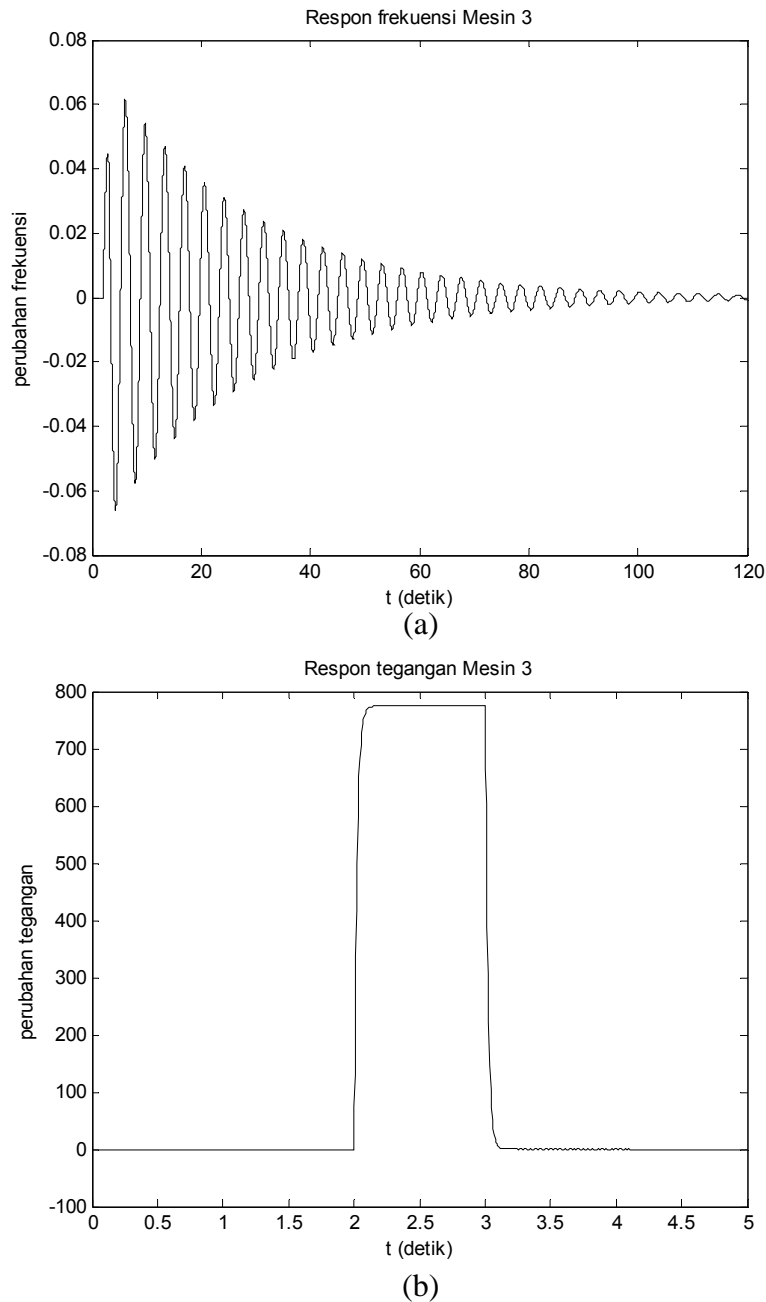
5.3.2 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 2



Gambar 5.8 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 2, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 2 dengan gain optimal state feedback observer

Terlihat pula bahwa respon perubahan frekuensi dan tegangan sebagaimana perancangan kontrol optimal, dimana gain state feedback observer sebagai umpanbalik penguatan yang memenuhi matriks keadaan pengamatan pengukuran keluaran sistem dan variabel kontrol.

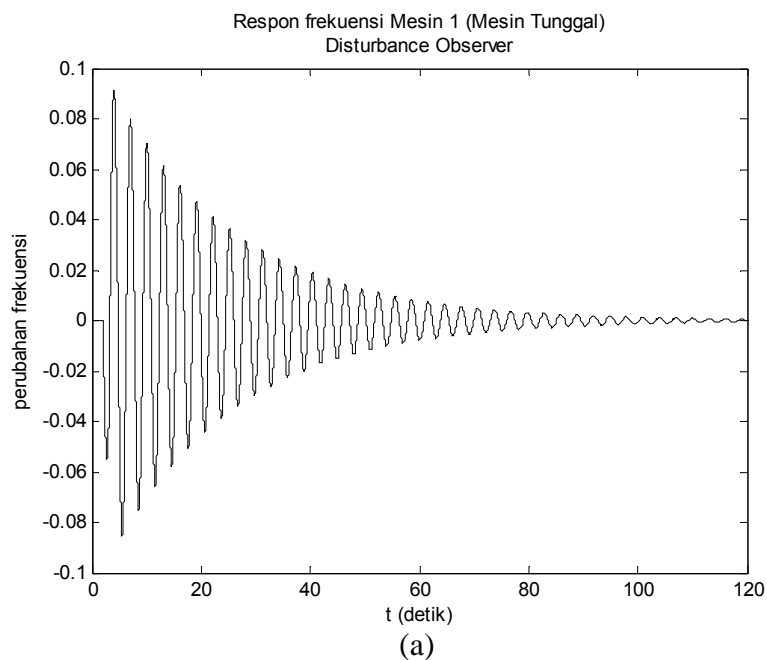
5.3.3 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 3

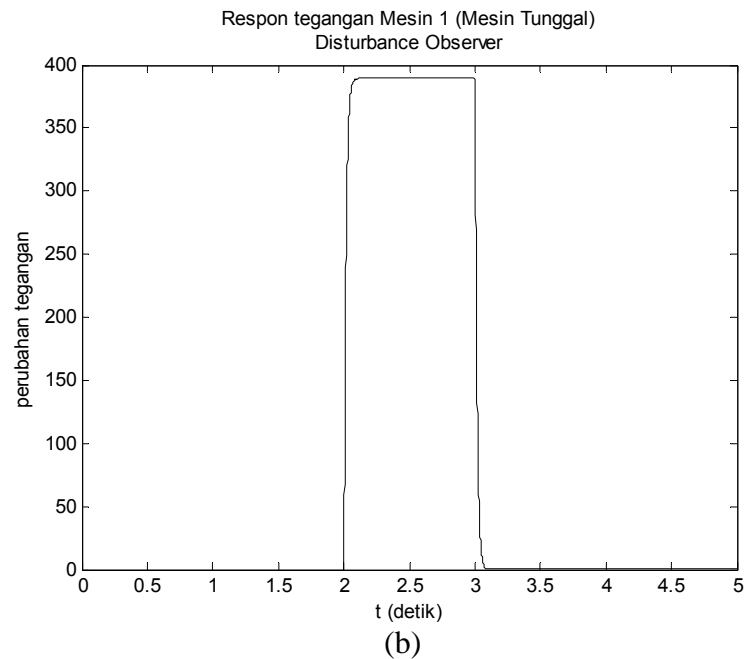


Gambar 5.9 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 3, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 3 dengan gain optimal state feedback observer

Terlihat pula bahwa respon perubahan frekuensi dan tegangan sebagaimana perancangan kontrol optimal, dimana gain state feedback observer sebagai umpanbalik penguatan yang memenuhi matriks keadaan pengamatan pengukuran keluaran sistem dan variable kontrol.

5.4 Simulasi Dan Analisa Perancangan Kontrol Optimal Gain State Feedback Observer Dengan Disturbance Observer Pada Mesin 1 (Mesin Tunggal)



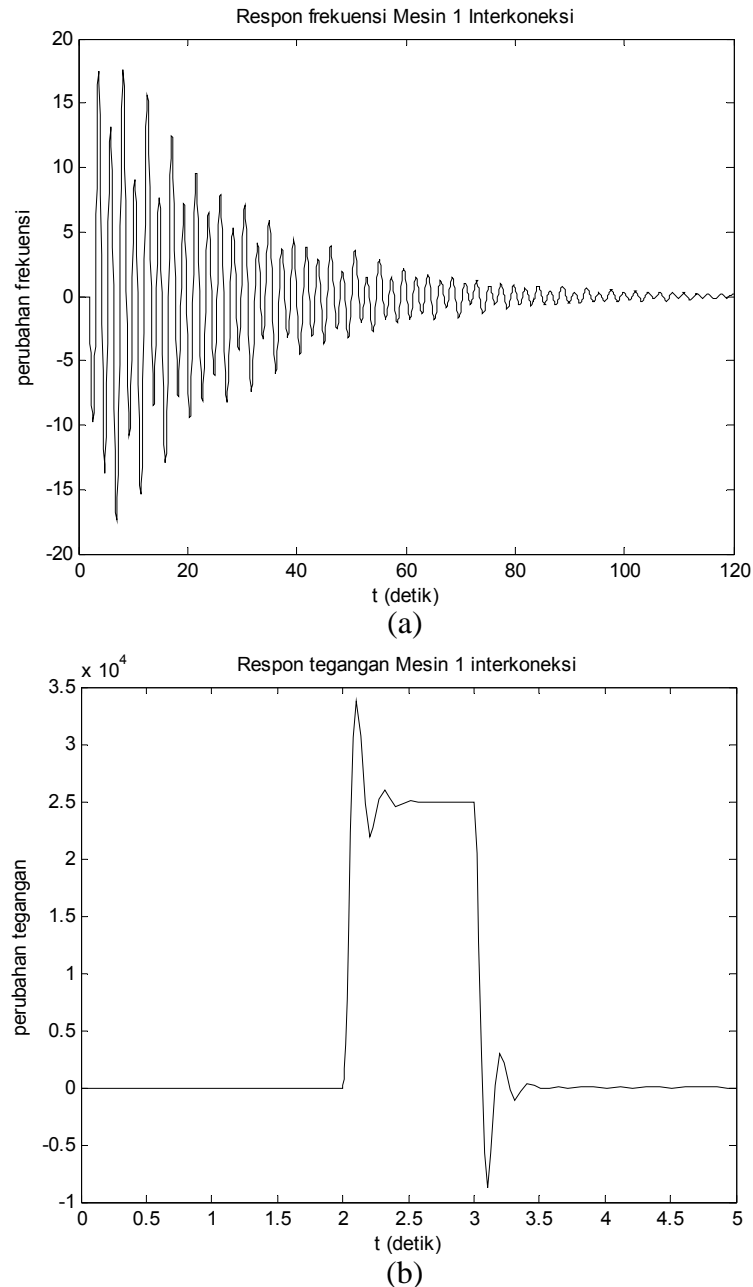


Gambar 5.10 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 1, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 1 (Mesin Tunggal) optimal gain state feedback observer dengan disturbance observer

Terlihat bahwa dengan merancang disturbance observer pada Mesin 1 (Mesin Tunggal), respon menuju keadaan mantap (*steady state*) perubahan frekuensi dan tegangan lebih baik atau setara dengan 2x respon dinamik dari perancangan controller sebelumnya. Dimana perubahan frekuensi menjadi ± 0.09 Hz dan perubahan tegangan menjadi ≈ 400 V dari perubahan tegangan yang diijinkan.

5.5 Simulasi Dan Analisa Plant Tanpa Kontroller Yang Ter-interkoneksi

5.5.1 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 1

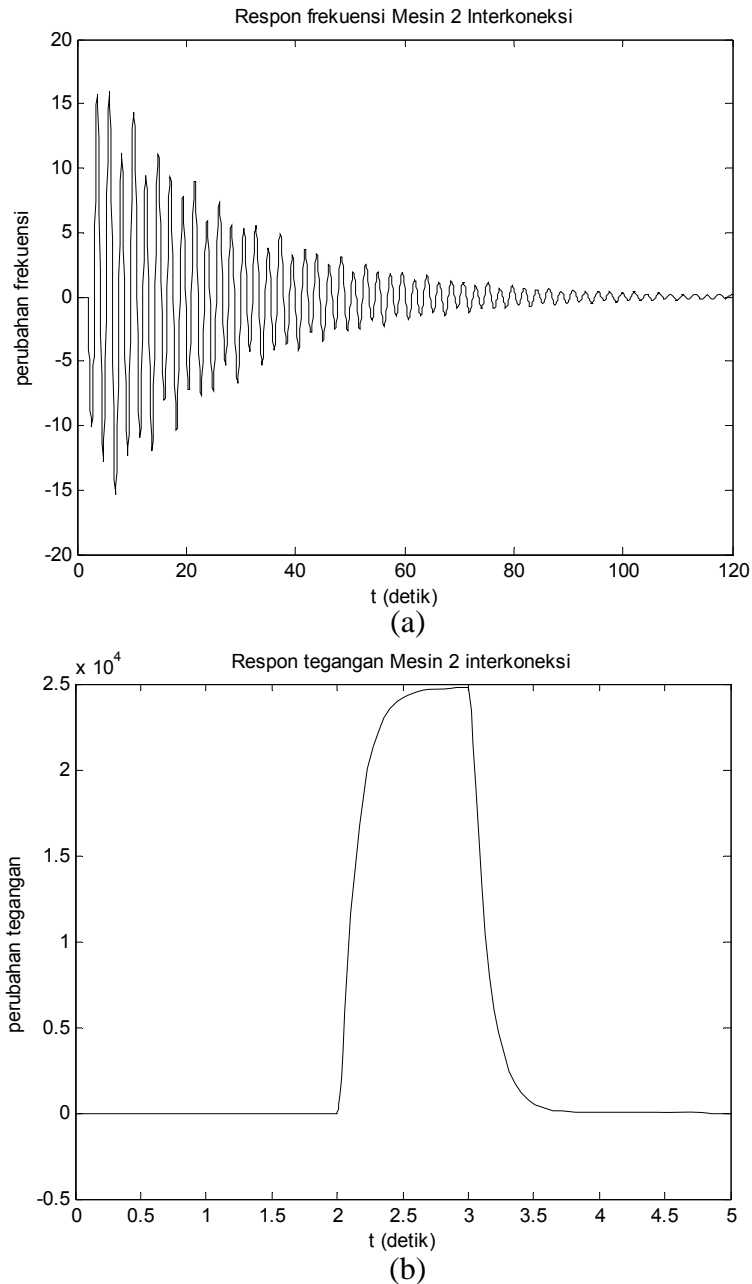


Gambar 5.11 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 1, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 1 interkoneksi

Terlihat dari respon bahwa sistem mengalami peningkatan pembebanan pada sisi perubahan frekuensi yang signifikan, dimana perubahan frekuensi sangat besar, atau setara dengan ± 17.56 Hz. Namun tidak demikian dengan perubahan

tegangan, respon perubahan tegangan mengalami *overshoot* pada kondisi yang sama dengan sistem open loop, atau setara dengan ≈ 35 kV.

5.5.2 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 2

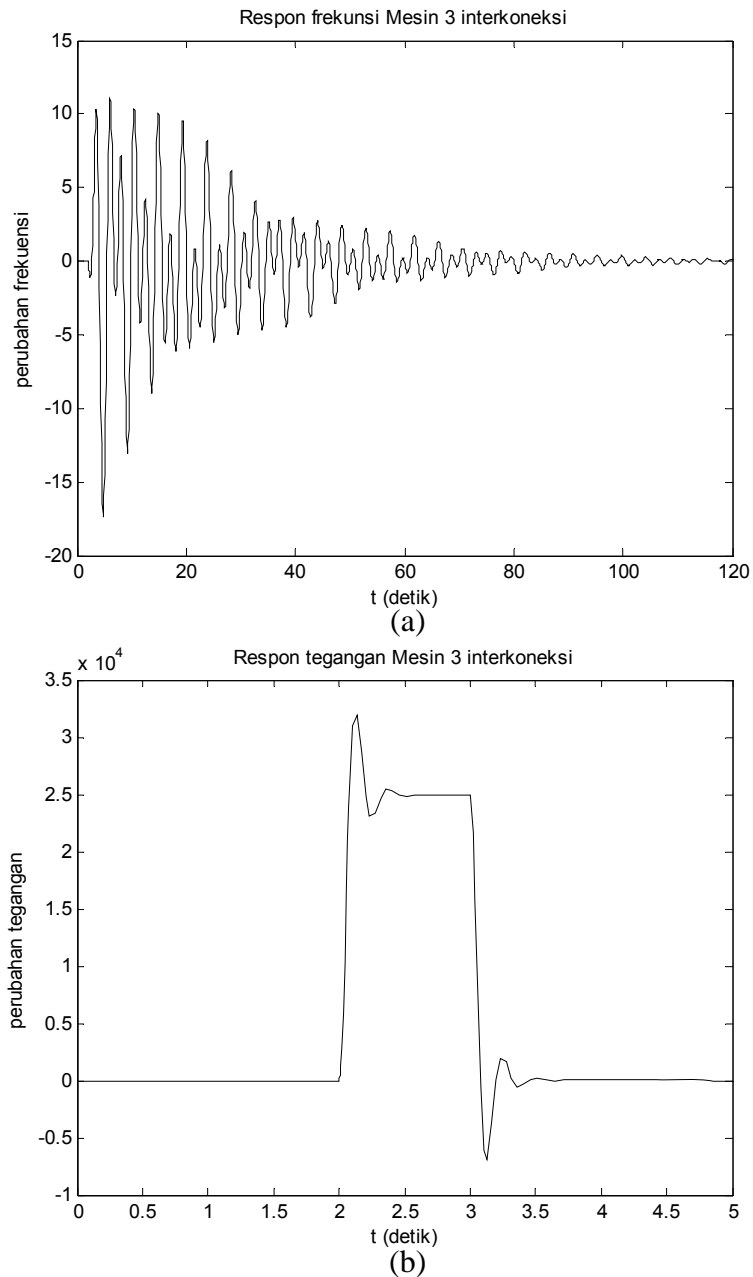


Gambar 5.12 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 2, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 2 interkoneksi

Terlihat sistem mengalami peningkatan pembebanan pada sisi frekuensi yang signifikan, dimana perubahan frekuensi sangat besar, atau setara dengan ± 15 Hz.

Namun tidak demikian dengan perubahan tegangan, respon perubahan tegangan mengalami *overshoot* pada kondisi yang sama dengan sistem open loop, atau setara dengan ≈ 35 kV.

5.5.3 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 3

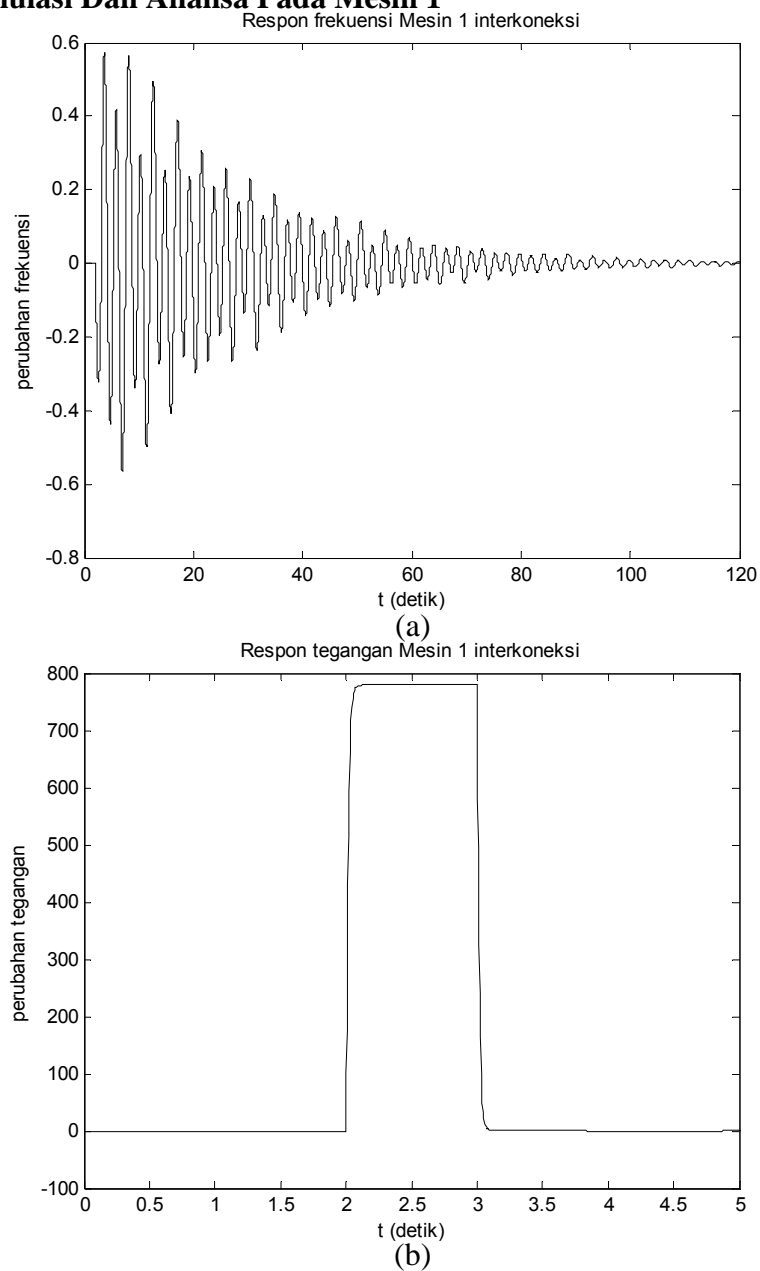


Gambar 5.13 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 3, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 3 interkoneksi

Terlihat bahwa respon sistem mengalami peningkatan pembebanan pada sisi frekuensi yang signifikan, dimana perubahan frekuensi sangat besar, atau setara dengan $+10/-17.5$ Hz, namun respon perubahan tegangan tetap.

5.6 Simulasi & Analisa Plant dengan Kontrol Optimal Pada Jaringan Pembangkit Tenaga Listrik Ter-interkoneksi

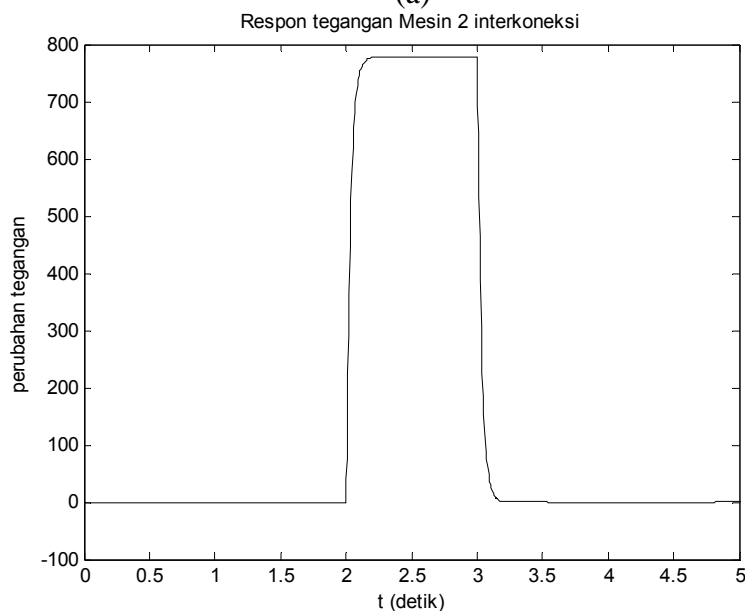
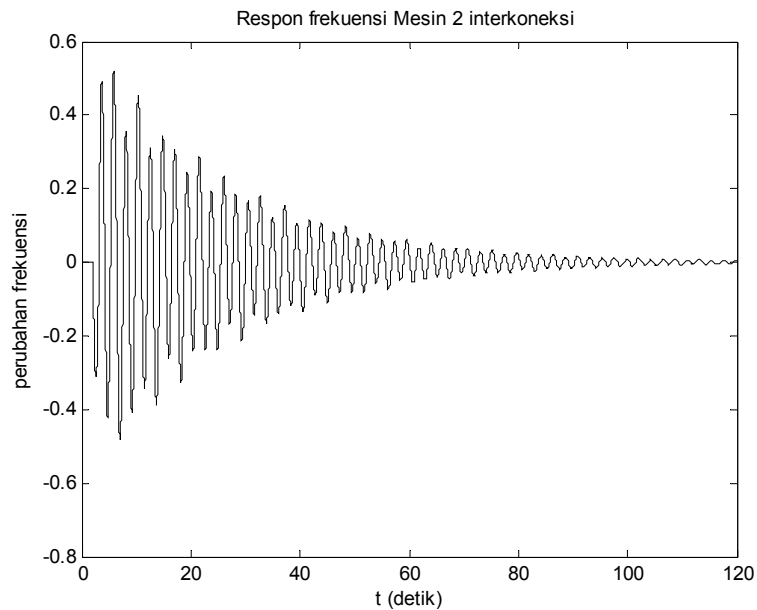
5.6.1 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 1



Gambar 5.14 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 1, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 1 dengan kontrol optimal ter-interkoneksi

Terlihat bahwa respon bahwa sistem mengalami peningkatan pembebanan pada sisi frekuensi yang signifikan, dimana perubahan frekuensi sangat besar, atau setara dengan ± 0.6 Hz dari 0.175 Hz pada perancangan kontrol optimal tanpa interkoneksi, namun respon perubahan tegangan tetap.

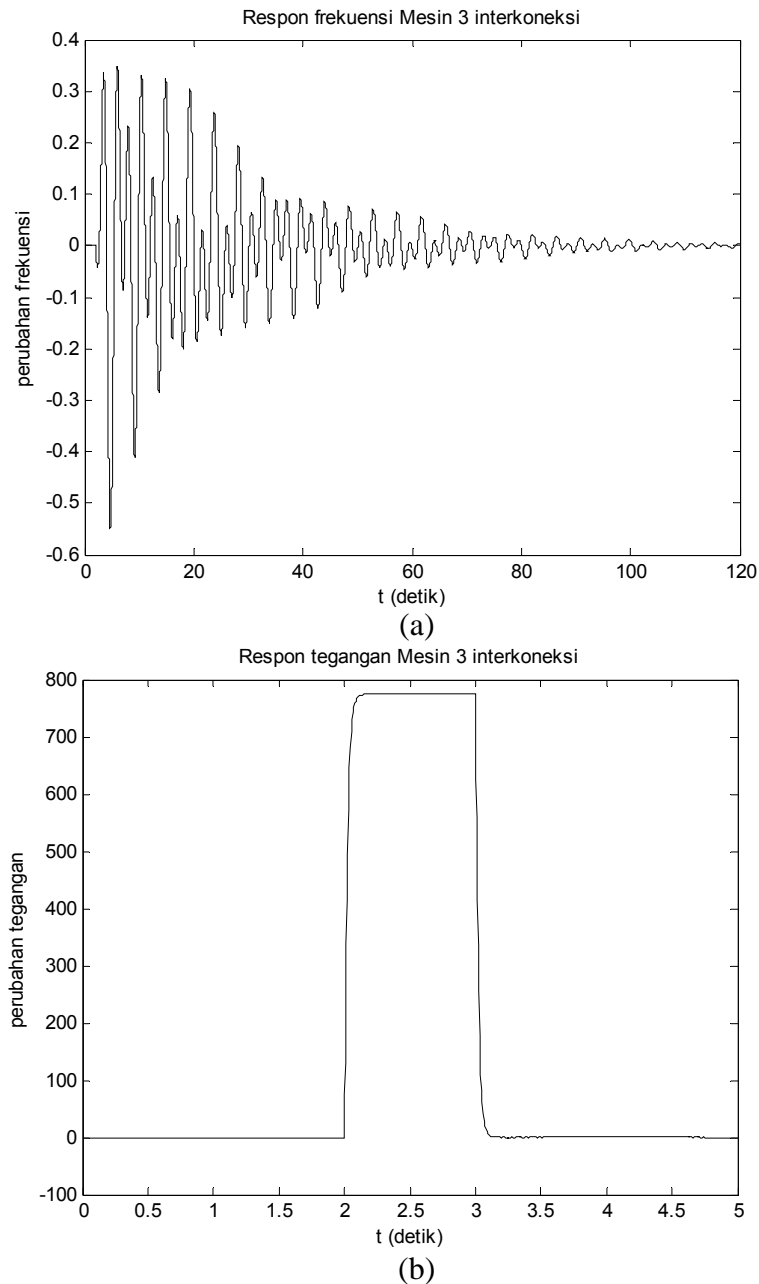
5.6.2 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 2



Gambar 5.15 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 2, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 2 dengan kontrol optimal ter-intrekoneksi

Terlihat bahwa respon bahwa sistem mengalami peningkatan pembebanan pada sisi frekuensi yang signifikan, dimana perubahan frekuensi sangat besar, atau setara dengan ± 0.45 Hz dari ± 0.15 Hz pada kondisi tanpa interkoneksi, namun respon perubahan tegangan.

5.6.3 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 3

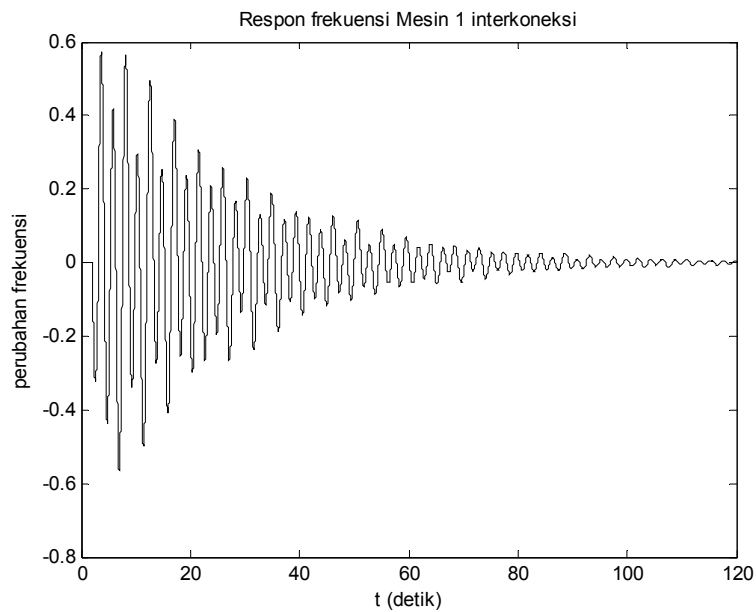


Gambar 5.16 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 3, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 3 dengan kontrol optimal ter-intrekoneksi

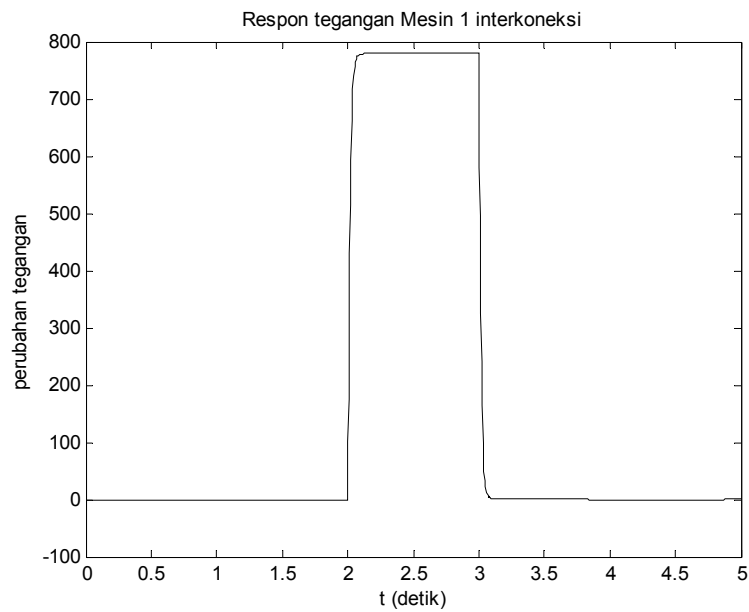
Terlihat bahwa respon bahwa sistem mengalami peningkatan pembebanan pada sisi frekuensi yang signifikan, dimana perubahan frekuensi sangat besar, atau setara dengan $+0.35/-0.55$ Hz dari ± 0.06 Hz pada kondisi tanpa interkoneksi.

5.7 Simulasi & Analisa Plant dengan Kontrol Optimal Gain State Feedback Observer Pada Jaringan Pembangkit Tenaga Listrik Ter-interkoneksi

5.7.1 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 1



(a)

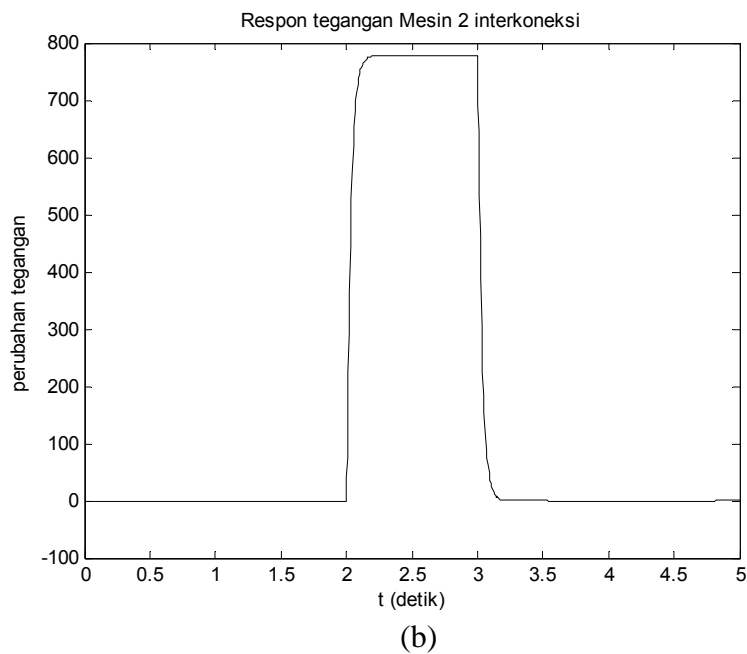
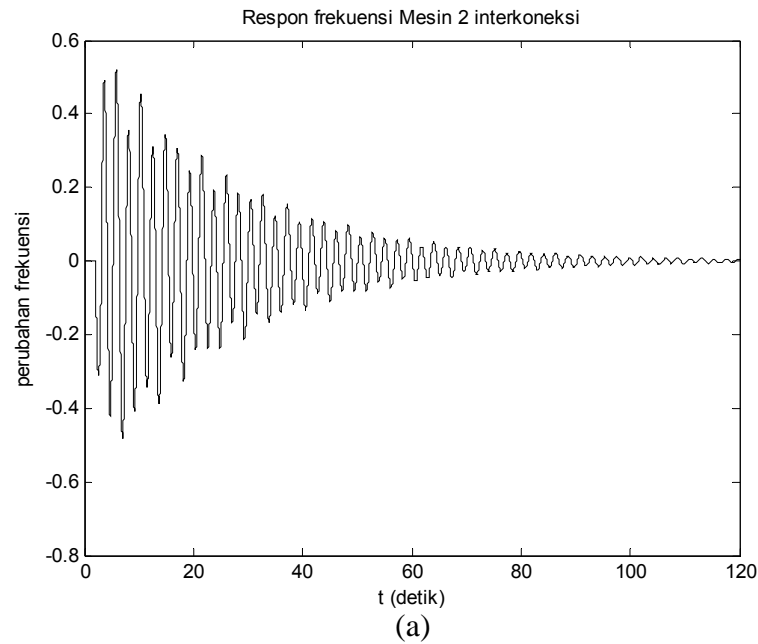


(b)

Gambar 5.17 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 1, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 1 dengan gain optimal state feedback observer ter-interkoneksi

Terlihat bahwa respon perubahan frekuensi dan tegangan sebagaimana perancangan kontrol optimal ter-interkoneksi, dimana gain state feedback observer sebagai umpanbalik penguatan yang memenuhi matriks keadaan pengamatan keadaan pengukuran keluaran sistem dan variabel kontrol dengan perubahan frekuensi yang signifikan dibanding perancangan sebelum terbangun jaringan interkoneksinya.

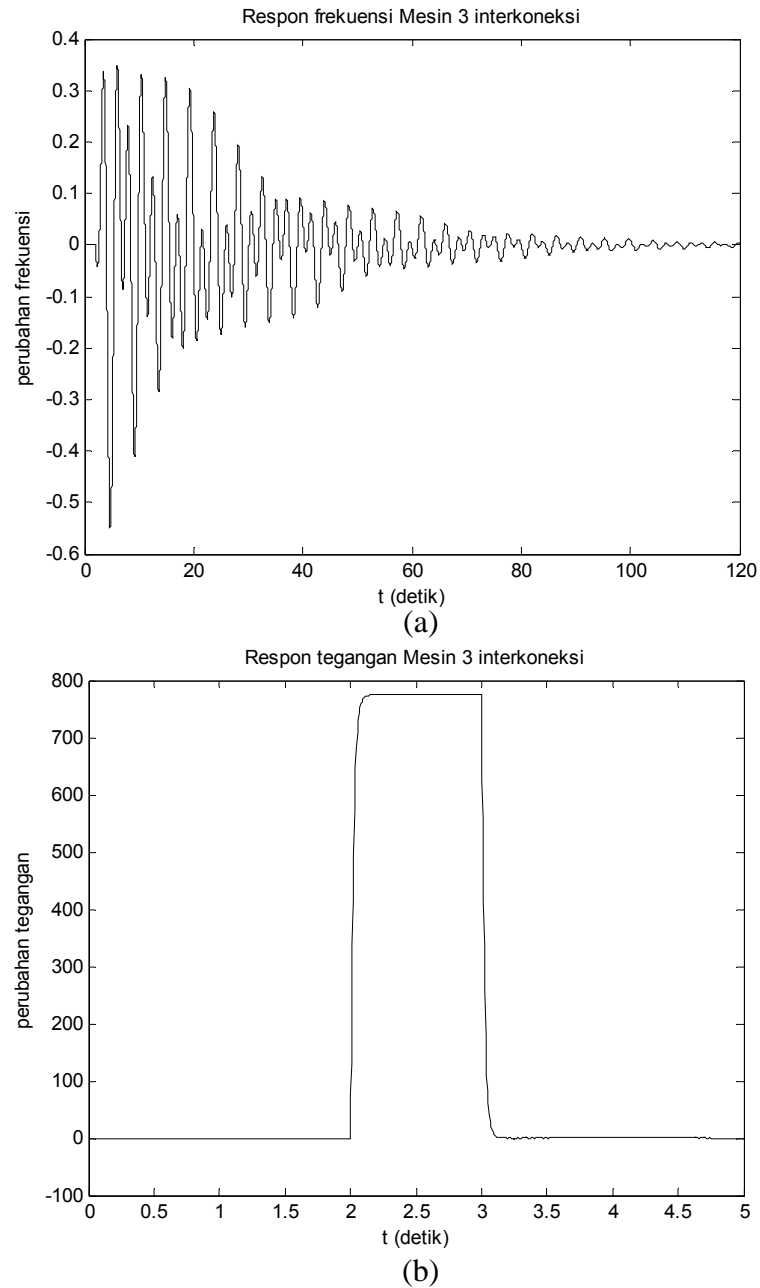
5.7.2 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 2



Gambar 5.18 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 2, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 2 dengan gain optimal state feedback observer terinterkoneksi

Terlihat bahwa respon perubahan frekuensi dan tegangan dengan gain state feedback observer sebagai umpanbalik penguatan yang memenuhi matriks keadaan pengamatan keadaan pengukuran keluaran.

5.7.3 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 3

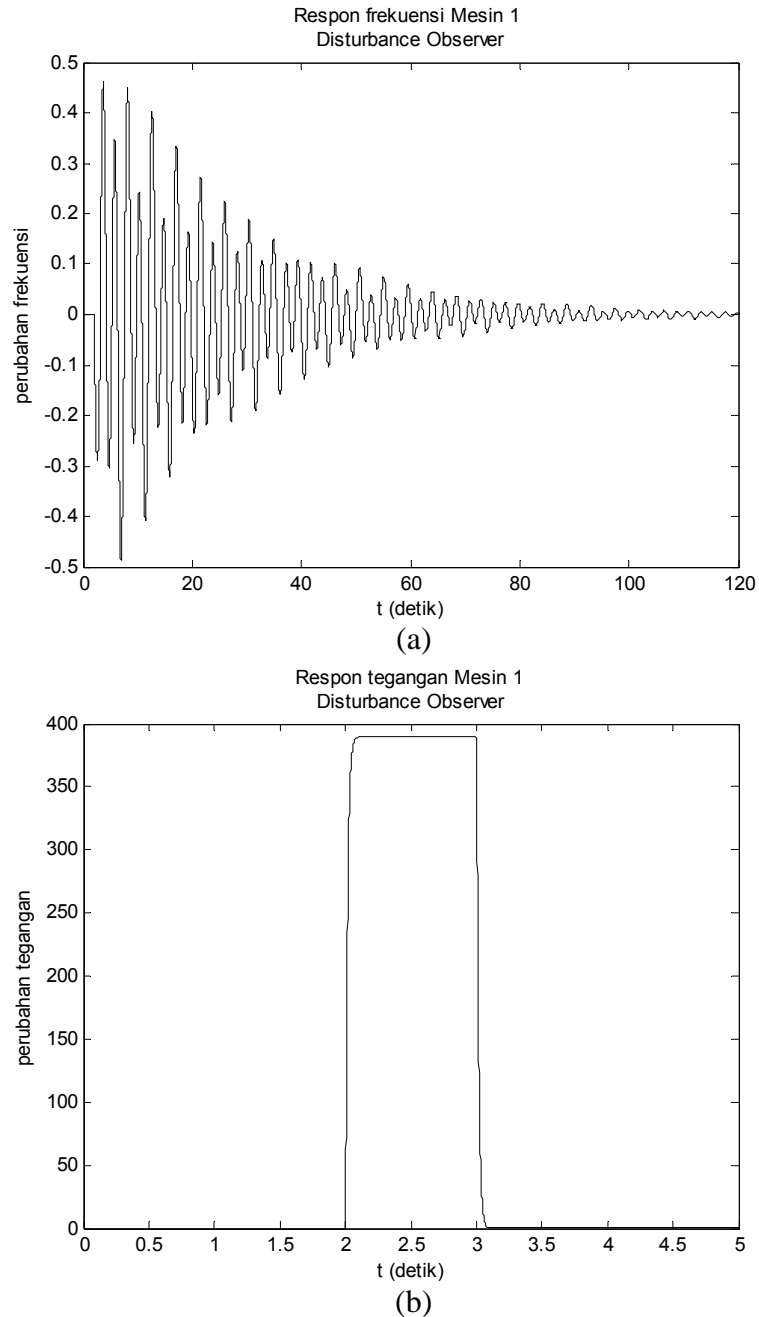


Gambar 5.19 Respon perubahan frekuensi dan tegangan Mesin 3 dengan gain optimal state feedback observer ter-interkoneksi

Terlihat pula bahwa respon perubahan frekuensi dan tegangan dengan gain state feedback observer sebagai penguatan yang memenuhi matriks keadaan pengamatan dengan perubahan frekuensi yang signifikan dibanding perancangan sebelum terbangun jaringan interkoneksinya.

5.8 Simulasi Dan Analisa Perancangan Kontrol Optimal Gain State Feedback Observer Dengan Disturbance Observer Pada Mesin 1 (Mesin Tunggal) Ter-interkoneksi

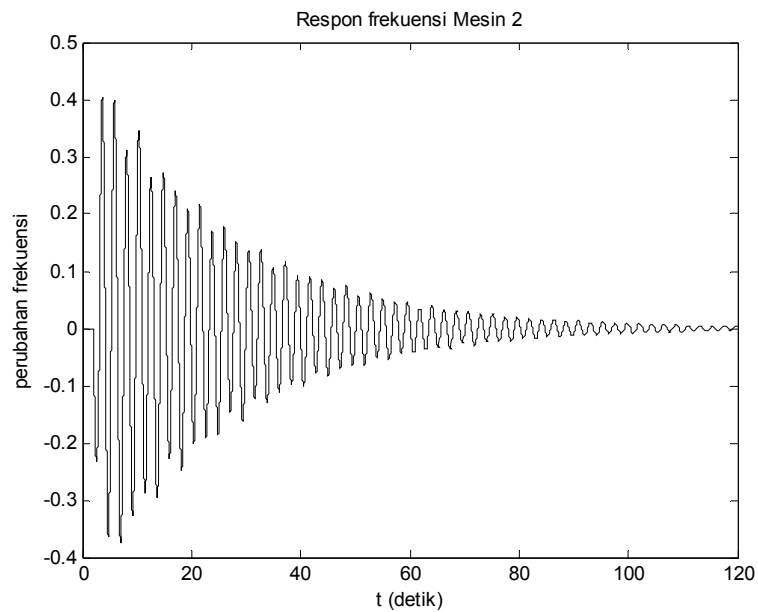
5.8.1 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 1 (definisi Mesin Tunggal)



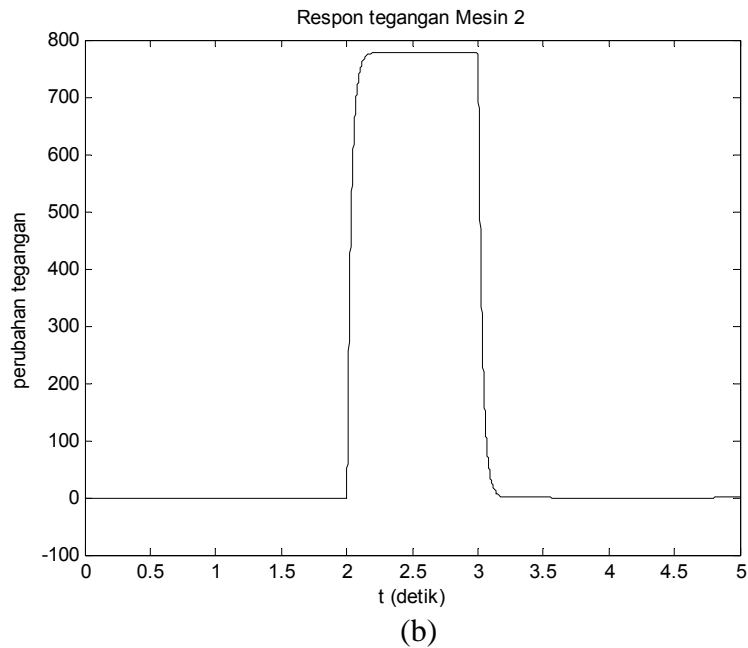
Gambar 5.20 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 1, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 1 (Mesin Tunggal) gain optimal state feedback observer dengan disturbance observer ter-interkoneksi

Terlihat bahwa respon sistem mengalami perbaikan yang signifikan baik, pada tampilan perubahan frekuensi maupun perubahan tegangan, dimana perubahan frekuensi dapat diredam, atau setara dengan ± 0.425 Hz dari 0.6 Hz pada perancangan disturbance observer ter-interkoneksi dibanding tanpa adanya disturbance observer. Sedangkan pada perubahan tegangan, respon perubahan tegangan mengalami perbaikan pada sisi *overshoot* menuju keadaan mantap, atau setara dengan ≈ 400 V dari ≈ 800 .

5.8.2 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 2



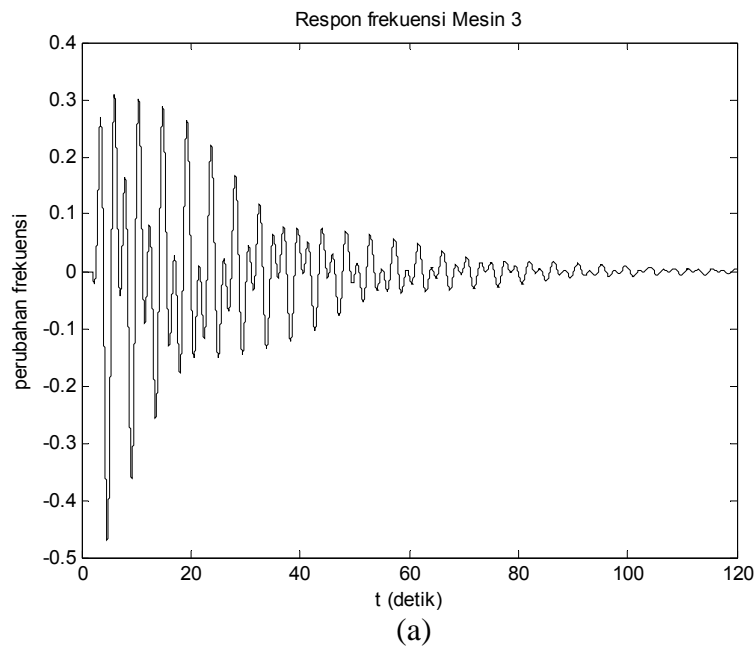
(a)

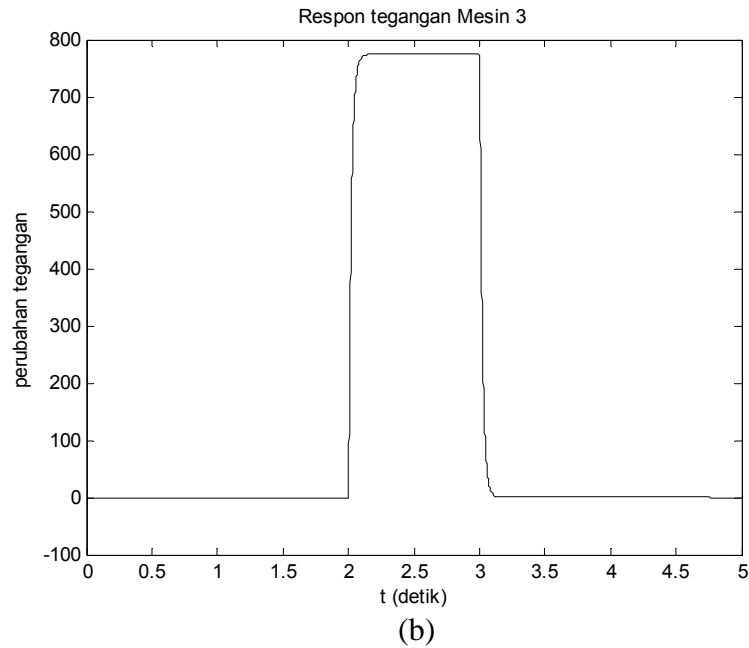


Gambar 5.21 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 2, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 2 gain optimal state feedback observer tanpa disturbance observer ter-interkoneksi

Terlihat bahwa respon sistem mengalami perbaikan hanya pada perubahan frekuensi saja, namun tidak signifikan, atau setara dengan ± 0.4 Hz dari 0.475 Hz. Sedangkan respon pada perubahan tegangan tetap.

5.8.3 Simulasi Dan Analisa Pada Mesin 3





Gambar 5.22 (a) Respon perubahan frekuensi Mesin 3, (b) Respon perubahan tegangan Mesin 3 gain optimal state feedback observer tanpa disturbance observer ter-interkoneksi

Terlihat bahwa respon sistem mengalami perbaikan hanya pada perubahan frekuensi saja, namun tidak signifikan baik dimana perubahan frekuensi dapat diredam, atau setara dengan ± 0.31 Hz dari 0.35 Hz. Hal ini sebagai pengaruh langsung pada jaringan interkoneksi. Sedangkan pada perubahan tegangan tetap.