

**PENERAPAN PENGENDALI JARINGAN SYARAF  
TIRUAN UNTUK KOORDINASI PENSAKLARAN  
*BRAKING RESISTOR-REACTOR* PADA STABILITAS  
PERALIHAN SISTEM TENAGA LISTRIK**

**SKRIPSI**

Oleh

**LUQMAN ARIF FARIZQI**  
**04 03 03 0659**



**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GANJIL 2007/2008**

**PENERAPAN PENGENDALI JARINGAN SYARAF  
TIRUAN UNTUK KOORDINASI PENSAKLARAN  
*BRAKING RESISTOR-REACTOR* PADA STABILITAS  
PERALIHAN SISTEM TENAGA LISTRIK**

**SKRIPSI**

Oleh

**LUQMAN ARIF FARIZQI**  
**04 03 03 0659**



**SKRIPSI INI DIAJUKAN UNTUK MELENGKAPI SEBAGIAN  
PERSYARATAN MENJADI SARJANA TEKNIK**

**DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS INDONESIA  
GANJIL 2007/2008**

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

**PENERAPAN PENGENDALI JARINGAN SYARAF TIRUAN UNTUK  
KOORDINASI PENSAKLARAN *BRAKING RESISTOR-REACTOR* PADA  
STABILITAS PERALIHAN SISTEM TENAGA LISTRIK**

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari seminar yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, Januari 2008

(Luqman Arif Farizqi)

0403030659

## **PENGESAHAN**

Skripsi dengan judul :

**PENERAPAN PENGENDALI JARINGAN SYARAF TIRUAN UNTUK  
KOORDINASI PENSAKLARAN *BRAKING RESISTOR-REACTOR* PADA  
STABILITAS PERALIHAN SISTEM TENAGA LISTRIK**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 2 Januari 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, Januari 2008

Dosen Pembimbing,

Dr.Ir. Rudy Setiabudy,

NIP. 131 402 966

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada :

**Dr. Ir. Rudy Setiabudy**

selaku dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi pengarahan, diskusi dan bimbingan serta persetujuan sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.

Depok, Januari 2008

Penulis

Luqman Arif Farizqi  
NPM 0403030659  
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing  
Dr.Ir. Rudy Setiabudy

**PENERAPAN PENGENDALI JARINGAN SYARAF TIRUAN  
UNTUK KOORDINASI PENSAKLARAN *BRAKING*  
*RESISTOR-REACTOR* PADA STABILITAS PERALIHAN  
SISTEM TENAGA LISTRIK**

**ABSTRAK**

Stabilitas merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi performa suatu sistem tenaga listrik. Pada saat generator terkena gangguan yang besar dan tiba-tiba maka generator akan mengalami ayunan dan masuk ke kondisi peralihan. Apabila generator dapat kembali ke kondisi setimbangnya maka generator dapat dikatakan stabil. Untuk menjaga agar generator tetap stabil maka diperlukan suatu metode untuk memperbaiki kestabilan generator. Salah satu metode dapat digunakan adalah menggunakan *dynamic braking resistor-reactor*.

Skripsi ini membahas mengenai penerapan pengendali jaringan syaraf tiruan untuk koordinasi pensaklaran *braking resistor-reactor* pada stabilitas peralihan sistem tenaga listrik.

Ketika terjadi gangguan, simpangan kecepatan rotor akan diukur besarnya kemudian sudut penyalaan tiristornya akan ditentukan oleh hasil keluaran dari pengendali jaringan syaraf tiruan. Pengendali ini mengenali input dan outputnya dengan berdasarkan proses pembelajaran jaringan syaraf tiruan. Proses pembelajaran yang dilakukan adalah dengan menggunakan algoritma *backpropagation* jenis *levenberg-marquardt*. Pengendalian sudut penyalaan tiristor pada *braking resistor-reactor* ini berfungsi untuk mengatur dan mengendalikan percepatan dan perlambatan putaran rotor sehingga kestabilan sistem dapat lebih ditingkatkan.

Simulasi pengambilan data dilakukan dengan memberikan tiga jenis gangguan ke dalam sistem dengan dua durasi waktu yang berbeda. Ketiga jenis gangguan tersebut adalah gangguan tiga fasa ke tanah, dua fasa ke tanah, dan satu fasa ke tanah. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa penerapan pengendali jaringan syaraf tiruan untuk koordinasi pensaklaran *braking resistor-reactor* dapat mempercepat dan meningkatkan kestabilan sistem.

**Kata Kunci : Stabilitas, *Braking Resistor-Reactor*, Pengendali Jaringan Syaraf Tiruan**

Luqman Arif Farizqi  
NPM 0403030659  
Electrical Engineering Departement

Counsellor  
Dr. Ir. Rudy Setiabudy

**IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORK  
CONTROLLER FOR SWITCHING COORDINATION OF  
BRAKING RESISTOR-REACTOR IN THE ELECTRIC  
POWER SYSTEM TRANSIENT STABILITY**

**ABSTRACT**

Stability is one of the most important factor that affects performance of the electric power system. When large and sudden faults occurred, generator will be swung and get in to the transient condition. If generator can goes back to the balance condition, generator will be stable. That's why, for improving the generator stability's, we need a method to do that. One of the method which can be used to improve the generator stability's is dynamic braking resistor-reactor.

This paper describes about the implementation of artificial neural network controller for switching coordination of braking resistor-reactor in the electric power system transient stability.

When faults occurred, rotor speed deviation will be measured and then, the thyristor firing-angle's will be determined by the output of the artificial neural network controller. This controller identify its inputs and outputs based on the training process of artificial neural network. The training process was been doing by using levenberg-marquardt backpropagation algoritn's. By controlling the thyristor firing-angle's of the braking resistor-reactor, rotor speed acceleration's and deceleration's can be controlled so that the system stability can be improved.

Simulation process was been doing by occurring three kinds of faults in the system with two different kinds of time durations. Those three faults are three-phase-ground fault, two-phase-ground fault, and single-phase-ground fault. The simulations results show that implementation of artificial neural network controller for switching coordination of braking resistor-reactor can improve the system stability.

**Keyword : Stability, Braking Resistor-Reacto, Neural Networks  
Controller**

## DAFTAR ISI

	Halaman
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xiv
DAFTAR ISTILAH	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENULISAN	2
1.3 BATASAN MASALAH	2
1.4 METODOLOGI PENELITIAN	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	2
BAB II STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK DAN JARINGAN	
SYARAF TIRUAN	4
2.1 STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK	4
2.1.1 Pengertian Stabilitas	4
2.1.1.1 <i>Stabilitas Tunak</i>	5
2.1.1.2 <i>Stabilitas Dinamis</i>	5
2.1.1.3 <i>Stabilitas Peralihan</i>	5
2.1.2 Persamaan Ayunan	6
2.1.3 Persamaan Sudut Daya	11
2.1.4 Kriteria Sama Luas ( <i>Equal Area Criterion</i> )	15
2.1.5 Sudut Pemutusan Kritis dan Waktu Pemutusan Kritis	19
2.1.6 Perbaikan Stabilitas Peralihan dengan <i>Braking Resistor-Reactor</i>	21



2.2 JARINGAN SYARAF TIRUAN	23
2.2.1 Prinsip Dasar	23
2.2.2 Komposisi dan Struktur Jaringan Syaraf Tiruan	24
2.2.3 Algoritma <i>Backpropagation</i>	26
BAB III PERANCANGAN SISTEM DAN PENGENDALI JARINGAN SYARAF TIRUAN	30
3.1 PERANCANGAN SISTEM TENAGA LISTRIK	30
3.1.1 Pembangkit/Generator	30
3.1.2 Transformator	32
3.1.3 Saluran Transmisi dan Sumber Gangguan	34
3.1.4 Beban <i>Braking</i> Resistor & Reaktor	36
3.1.5 Blok Tiristor	37
3.2 PERANCANGAN PENGENDALI JARINGAN SYARAF TIRUAN	40
3.2.1 Penentuan Prinsip Kerja Pengendali	40
3.2.2 Proses Pembelajaran JST	41
3.2.3 Penggabungan dengan Simulink	46
BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI	49
4.1 PROSES SIMULASI DAN STUDI KASUS	49
4.1.1 Kasus 1 : Durasi Gangguan < Waktu Pemutusan Kritis (0,2s)	51
4.1.1.1 <i>Gangguan 3 Fasa Ke Tanah 0,2s</i>	51
4.1.1.2 <i>Gangguan 2 Fasa Ke Tanah 0,2s</i>	52
4.1.1.3 <i>Gangguan 1 Fasa Ke Tanah 0,2s</i>	53
4.1.2 Kasus 2 : Durasi Gangguan > Waktu Pemutusan Kritis (0,33s)	54
4.1.2.1 <i>Gangguan 3 Fasa Ke Tanah 0,33s</i>	54
4.1.2.2 <i>Gangguan 2 Fasa Ke Tanah 0,33s</i>	55
4.1.2.3 <i>Gangguan 1 Fasa Ke Tanah 0,33s</i>	56
4.2 ANALISIS	57
4.2.1 Analisis Kasus	57
4.2.1.1 <i>Analisis Gangguan 3 Fasa Ke Tanah</i>	57
4.2.1.2 <i>Analisis Gangguan 2 Fasa Ke Tanah</i>	58
4.2.1.3 <i>Analisis Gangguan 1 Fasa Ke Tanah</i>	58
4.2.2 Analisis Grafik	59

4.2.2.1 Grafik Kecepatan Rotor	59
4.2.2.2 Grafik Daya Elektris	60
4.2.2.3 Grafik Sudut Penyalaan Tiristor	60
4.2.3 Analisis Secara Keseluruhan	62
BAB V KESIMPULAN	64
DAFTAR ACUAN	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	67

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
<b>Gambar 2.1</b> Dinamika perputaran rotor pada generator sinkron	7
<b>Gambar 2.2</b> Arah torsi mekanis dan torsi elektrik generator yang terhubung dengan jala-jala	8
<b>Gambar 2.3</b> Representasi generator yang terhubung pada suatu bus	11
<b>Gambar 2.4</b> Diagram sistem yang terdiri dari pembangkit, saluran transmisi, dan penerima	12
<b>Gambar 2.5</b> Kriteria sama luas – ayunan pertama sudut daya	17
<b>Gambar 2.6</b> Kriteria sama luas – ayunan balik sudut daya	18
<b>Gambar 2.7</b> Kurva sudut daya yang menentukan sudut pemutusan kritis $\delta_{cr}$	19
<b>Gambar 2.8</b> Sistem tenaga listrik dengan <i>braking resistor-reactor</i>	21
<b>Gambar 2.9</b> Diagram skematik <i>neuron</i> biologis	23
<b>Gambar 2.10</b> <i>Perceptron</i> JST dengan beberapa input	24
<b>Gambar 2.11</b> Konfigurasi hubungan input – output JST	25
<b>Gambar 3.1</b> Model generator sinkron	30
<b>Gambar 3.2</b> <i>Block parameter</i> generator sinkron	32
<b>Gambar 3.3</b> Model transformator	33
<b>Gambar 3.4</b> <i>Block parameter</i> transformator 3 fasa	33
<b>Gambar 3.5</b> <i>Block parameter</i> saluran transmisi	34
<b>Gambar 3.6</b> <i>Block parameter</i> sumber gangguan	35
<b>Gambar 3.7</b> Model saluran transmisi	35
<b>Gambar 3.8</b> <i>Block parameter</i> resistor	37
<b>Gambar 3.9</b> <i>Block parameter</i> reaktor	37
<b>Gambar 3.10</b> Rangkaian tiristor pada salah satu fasa	38
<b>Gambar 3.11</b> Rangkaian <i>pulse generator</i>	39
<b>Gambar 3.12</b> Grafik penyimpangan kecepatan rotor	41
<b>Gambar 3.13</b> Grafik proses pembelajaran JST	44
<b>Gambar 3.14</b> Grafik hubungan antara target dan output jaringan	44
<b>Gambar 3.15</b> Model blok <i>S-Function</i>	46

<b>Gambar 3.16</b>	Diagram alir penerapan pengendali JST <i>braking</i> <i>resistor-reactor</i> pada stabilitas peralihan sistem tenaga listrik	47
<b>Gambar 3.17</b>	Diagram blok penerapan pengendali JST <i>braking</i> <i>resistor-reactor</i> pada stabilitas peralihan sistem tenaga listrik	48
<b>Gambar 4.1</b>	Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 3 fasa ke tanah 0,2s	51
<b>Gambar 4.2</b>	Grafik daya listrik untuk gangguan 3 fasa ke tanah 0,2s	51
<b>Gambar 4.3</b>	Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,2s	52
<b>Gambar 4.4</b>	Grafik daya listrik untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,2s	52
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 1 fasa ke tanah 0,2s	53
<b>Gambar 4.6</b>	Grafik daya listrik untuk gangguan 1 fasa ke tanah 0,2s	53
<b>Gambar 4.7</b>	Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 3 fasa ke tanah 0,33s	54
<b>Gambar 4.8</b>	Grafik daya listrik untuk gangguan 3 fasa ke tanah 0,33s	54
<b>Gambar 4.9</b>	Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,33s	55
<b>Gambar 4.10</b>	Grafik daya listrik untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,33s	55
<b>Gambar 4.11</b>	Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,33s	56
<b>Gambar 4.12</b>	Grafik daya listrik untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,33s	56
<b>Gambar 4.13</b>	Grafik sudut penyalan untuk resistor	61
<b>Gambar 4.14</b>	Grafik sudut penyalan untuk reaktor	61

## DAFTAR TABEL

	Halaman
<b>Tabel 3.1</b> Inisialisasi mesin dan aliran daya	31
<b>Tabel 3.2</b> Pasangan input & output untuk JST resistor & reaktor	46

## DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
<b>Lampiran 1</b> Rangkaian Sistem Tanpa Pengendali JST <i>Braking Resistor-Reactor</i>	67
<b>Lampiran 2</b> Rangkaian Sistem Dengan Pengendali JST <i>Braking Resistor-Reactor</i>	68
<b>Lampiran 3</b> Rangkaian Tiristor 3 Fasa	69
<b>Lampiran 4</b> Rangkaian <i>Pulse Generator</i>	70
<b>Lampiran 5</b> Listing Program m-file Untuk Pengendali Pada Resistor	71
<b>Lampiran 6</b> Listing Program m-file Untuk Pengendali Pada Reaktor	72
<b>Lampiran 7</b> Listing Program C-Mex Untuk Pengendali Pada Resistor	73
<b>Lampiran 8</b> Listing Program C-Mex Untuk Pengendali Pada Reaktor	75

## DAFTAR SINGKATAN

CB	Circuit Breaker
EAC	Equal Area Criterion
JST	Jaringan Syaraf Tiruan
SISO	Single Input Single Output

## DAFTAR ISTILAH

Prime Mover	Penggerak utama pada generator
Air Gap	Celah udara yang terdapat dalam rotor
Steady-state	Kondisi stabil dimana generator berada pada kecepatan serempaknya
Akselerasi	Percepatan
Deselerasi	Perlambatan
Base Power	Daya acuan pada sistem per unit
Dynamic Braking	Pengereman dinamis dengan cara menambahkan beban buatab ke dalam sistem
Neuron	Suatu elemen proses yang terdapat dalam otak manusia dan jaringan syaraf tiruan (JST)
Perceptron	Neuron tunggal JST
Inialisasi	Proses pengaturan/penyesuaian parameter komponen dalam sistem
Parameter	Suatu nilai pengaturan pada komponen
Circuit Breaker	Pemutus rangkaian



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 LATAR BELAKANG

Salah satu hal yang mempengaruhi performa suatu sistem tenaga listrik adalah stabilitas. Stabilitas sistem tenaga listrik yang saling terinterkoneksi, khususnya stabilitas generator, merupakan kemampuan sistem untuk dapat kembali ke kondisi normalnya setelah terkena gangguan. Gangguan ini dapat berupa hal-hal teknis ataupun yang terjadi karena kelalaian manusia. Gangguan-gangguan tersebut dapat berakibat fatal karena sistem tenaga listrik menjadi tidak dapat memasok daya listrik seperti pada keadaan normalnya. Hal ini dikarenakan saat generator terkena gangguan maka tidak hanya generator saja terpengaruh tetapi sistem tenaga listrik secara keseluruhan juga terkena dampaknya.

Saat generator terkena gangguan yang besar secara tiba-tiba, generator akan mengalami ayunan. Apabila generator dapat kembali ke kondisi setimbangnya maka generator dapat dikatakan stabil, namun jika generator tidak dapat kembali ke kondisi setimbangnya maka generator akan menjadi tidak stabil.

Untuk itulah dalam rangka menjaga agar generator dapat kembali stabil, diperlukan suatu metode untuk memperbaiki dan meningkatkan kestabilan generator. Salah satu metode dapat digunakan adalah menggunakan *dynamic braking*. *Dynamic braking* itu sendiri terdiri dari 3 jenis, yaitu *braking resistor*, *resistor-reactor*, dan *resistor-capacitor*. Namun, metode yang digunakan untuk penelitian skripsi ini hanyalah dengan menggunakan *braking resistor-reactor*. Metode ini menuntut berlakunya koordinasi pensaklaran antara resistor dengan reaktor/induktor karena kedua komponen ini akan bekerja secara bergantian. Resistor berfungsi untuk menyerap daya mekanis sehingga percepatan putaran rotor dapat diredam, sebaliknya reaktor berfungsi untuk meningkatkan daya keluaran listrik sehingga kecepatan putaran rotor menjadi bertambah. Oleh karena itulah dibutuhkan suatu pengendali untuk mengatur koordinasi pensaklaran dari kedua komponen tersebut. Selain itu, dengan adanya pengendali maka besarnya beban yang diinjeksikan ke dalam sistem juga dapat diatur. Pengendali

yang akan digunakan adalah pengendali Jaringan Syaraf Tiruan. Dengan demikian kestabilan sistem menjadi lebih cepat tercapai.

## 1.2 TUJUAN PENELITIAN

Penulisan skripsi ini bertujuan untuk menerapkan pengendali Jaringan Syaraf Tiruan (JST) pada koordinasi pensaklaran *braking resistor-reactor* dalam stabilitas peralihan generator sinkron sehingga kestabilan sistem tenaga listrik lebih cepat tercapai.

## 1.3 BATASAN MASALAH

Penulisan skripsi ini dibatasi oleh beberapa hal, yaitu :

- a. Terbatas pada stabilitas peralihan.
- b. Gangguan yang diberikan adalah gangguan 3 fasa, gangguan 2 fasa ke tanah, dan gangguan 1 fasa ke tanah.
- c. Daya masukan mekanis dan tegangan eksitasi diasumsikan konstan selama periode simulasi.
- d. Generator tidak memiliki pengaturan *governor* dan *Automatic Voltage Regulation* (AVR).
- e. Metode iterasi untuk menyelesaikan persamaan non linear tidak dibahas dalam makalah ini.
- f. Pengendali yang digunakan adalah 2 buah pengendali Jaringan Syaraf Tiruan.
- g. Pengendali memiliki sistem SISO (*Single Input Single Output*).
- h. Sistem proteksi tidak dikutsertakan dalam rangkaian simulasi.

## 1.4 METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian skripsi ini dilakukan dengan cara membuat simulasi untuk pengambilan data dengan menggunakan bantuan komputer dan perangkat lunak MATLAB 7.1. Kemudian, dilakukan analisa dan perbandingan antara data hasil simulasi saat menggunakan metode perbaikan dengan data hasil simulasi tanpa metode perbaikan.

## 1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Skripsi ini dibagi menjadi lima bab, yaitu : Pendahuluan, Stabilitas Sistem Tenaga Listrik dan Jaringan Syaraf Tiruan, Perancangan Sistem dan Pengendali Jaringan Syaraf Tiruan, Analisis Hasil Simulasi, dan Kesimpulan. Bab Satu Pendahuluan berisi mengenai latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Bab Dua Stabilitas Sistem Tenaga Listrik dan Jaringan Syaraf Tiruan berisi mengenai teori dasar stabilitas sistem tenaga listrik beserta metode perbaikannya dan teori mengenai jaringan syaraf tiruan secara umum. Bab Tiga Perancangan Sistem dan Pengendali Jaringan Syaraf Tiruan berisi mengenai perancangan sistem tenaga listrik dan pengendali JST yang digunakan dalam simulasi. Bab Empat Analisis Hasil Simulasi berisi hasil simulasi yang dilakukan dengan perangkat lunak MATLAB 7.1 dan analisis mengenai hasil simulasi tersebut beserta perbandingannya antara saat menggunakan pengendali JST *braking resistor-reactor* dengan saat tidak menggunakan pengendali JST. Bab Lima Kesimpulan berisi mengenai kesimpulan yang diperoleh dari hasil simulasi dan analisis penerapan pengendali JST untuk membantu koordinasi pensaklaran *braking resistor-reactor* pada stabilitas peralihan sistem tenaga listrik.

## **BAB II**

### **STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK DAN JARINGAN SYARAF TIRUAN**

#### **2.1 STABILITAS SISTEM TENAGA LISTRIK**

##### **2.1.1 Pengertian Stabilitas**

Suatu sistem tenaga listrik pada dasarnya merupakan komponen-komponen tenaga listrik yang saling terhubung membentuk suatu bagian besar sehingga kerja satu sama lain saling mempengaruhi. Komponen-komponen tersebut terdiri dari 4 bagian, yaitu : pembangkit/generator, transmisi, distribusi, dan beban. Dalam sistem tenaga listrik terdapat 3 buah persyaratan dasar yang harus dimiliki oleh suatu sistem tenaga listrik agar dapat beroperasi dengan baik, yaitu reliabilitas, kualitas, dan stabilitas. Reliabilitas/ kehandalan merupakan kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk dapat beroperasi dan menyuplai daya secara terus menerus. Sedangkan kualitas adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk dapat menghasilkan besaran-besaran listrik, seperti arus, tegangan, dan frekuensi, sesuai dengan ketentuan atau standar yang telah ditetapkan. Sementara itu stabilitas dapat diartikan sebagai kemampuan suatu sistem untuk dapat kembali ke keadaan normalnya atau kondisi stabil setelah terkena gangguan [2]. Gangguan-gangguan tersebut dapat berupa gangguan besar maupun gangguan kecil dimana rentang waktu dari gangguan-gangguan itu bervariasi, ada berlangsung lama dan ada pula yang hanya berlangsung seketika. Dari ketiga persyaratan tersebut, stabilitas merupakan syarat yang paling penting karena jika stabilitas sistem tidak dapat tercapai maka akan mempengaruhi reliabilitas dan kualitas dari sistem secara keseluruhan. Hal ini dapat terjadi karena jika masalah stabilitas sistem tersebut tidak dapat teratasi maka besaran-besaran listrik yang dihasilkan akan berubah dan mempengaruhi kualitas, bahkan dampak yang paling buruk dari perubahan besaran-besaran listrik tersebut adalah beralih fungsinya pembangkit menjadi motor. Selain itu, pengaruh stabilitas terhadap reliabilitas sistem adalah hilangnya sinkronisasi atau keserempakan dari generator sehingga sistem tidak dapat menyuplai daya seperti yang seharusnya.

Stabilitas dalam suatu sistem tenaga listrik dibagi menjadi 3 jenis, yaitu:

1. Stabilitas tunak ( *steady-state stability* )
2. Stabilitas dinamis ( *dynamic stability* )
3. Stabilitas peralihan ( *transient stability* )

#### 2.1.1.1 Stabilitas Tunak

Stabilitas tunak merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk tetap berada dalam keadaan sinkronnya setelah terkena gangguan yang kecil dalam waktu yang singkat. Gangguan tersebut dapat berupa reaksi dari governor maupun perubahan daya atau beban yang kecil. Setelah terkena gangguan, sistem akan tetap berada pada titik kesetimbangannya atau kondisi tunaknya. Stabilitas tunak tidak sampai menyebabkan terjadinya perubahan dalam sistem karena sistem tetap berada dalam kondisi serempaknya. Selain itu, dalam analisa stabilitas tunak, model pembangkit yang digunakan adalah pembangkit yang sederhana, yaitu sebagai sumber tegangan konstan. Hal ini dikarenakan analisa stabilitas tunak hanya menyangkut perubahan-perubahan kecil yang terjadi di sekitar titik kesetimbangan [2].

#### 2.1.1.2 Stabilitas Dinamis

Stabilitas dinamis sebenarnya hampir sama dengan stabilitas tunak, namun tetap terdapat perbedaan pada keduanya, yaitu terletak pada durasi waktu dan jenis gangguannya dimana pada stabilitas dinamis, gangguan yang terjadi lebih besar dan memiliki durasi waktu yang lebih lama. Akibatnya terjadi perubahan dalam sistem, yaitu dalam hal sistem eksitasi generator dan sistem turbin sehingga terjadi variasi fluks yang diberikan rotor. Namun, perubahan yang terjadi ini tidak sampai menyebabkan terjadinya ketidakstabilan dalam sistem karena dengan segera sistem akan berangsur-angsur kembali ke kondisi serempaknya.

#### 2.1.1.3 Stabilitas Peralihan

Stabilitas peralihan merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk dapat kembali stabil setelah terkena gangguan yang besar dan tiba-tiba. Gangguan ini dapat berupa gangguan simetris atau asimetris, hilangnya beban yang besar

secara tiba-tiba, dan sebagainya. Setelah mengalami gangguan, generator akan berada dalam kondisi peralihan atau *transient* dan kemudian akan berangsur-angsur kembali ke kondisi serempaknya menuju titik kesetimbangan yang baru. Dalam kondisi peralihan, sistem dapat kehilangan kestabilannya karena gangguan yang terjadi diluar batas kemampuan dari sistem untuk bereaksi.

Stabilitas peralihan perlu diatasi karena berpeluang besar menyebabkan terjadinya ketidakstabilan dalam sistem. Stabilitas peralihan memiliki sifat yang dinamis dan nonlinear sehingga persamaan aljabarnya tidak dapat dilinearisasikan dan harus diselesaikan dengan metode langsung atau metode iterasi [2]. Analisa stabilitas peralihan dilakukan pada beberapa detik pertama (*first swing*), karena stabilitas sistem bergantung pada kondisi awal tersebut. Apabila sistem dapat menjaga sinkronisasinya selama ayunan pertama (*first swing*) maka sistem dapat dikatakan stabil [2].

Untuk memudahkan dalam hal perhitungan maka pada analisa kestabilan digunakan 3 asumsi dasar [2], yaitu:

1. Hanya frekuensi sinkron dari arus dan tegangan pada kumparan rotor dan sistem tenaga listrik yang diperhitungkan. Oleh karena itu, arus DC dan komponen harmonik diabaikan.
2. Komponen simetris digunakan untuk menganalisis gangguan yang tidak seimbang.
3. Tegangan yang dibangkitkan dianggap tidak dipengaruhi oleh perubahan kecepatan mesin.

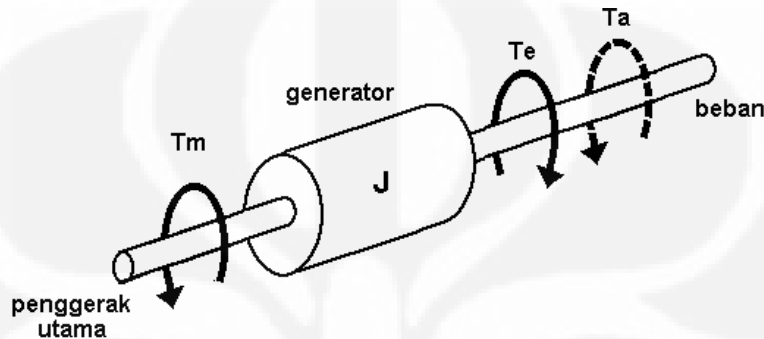
### 2.1.2 Persamaan Ayunan

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa torsi akselerasi/percepatan merupakan hasil kali antara momen inersia rotor dengan percepatan sudutnya [2], dan persamaannya adalah sebagai berikut :

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_m - T_e = T_a \quad (2.1)$$

dimana:

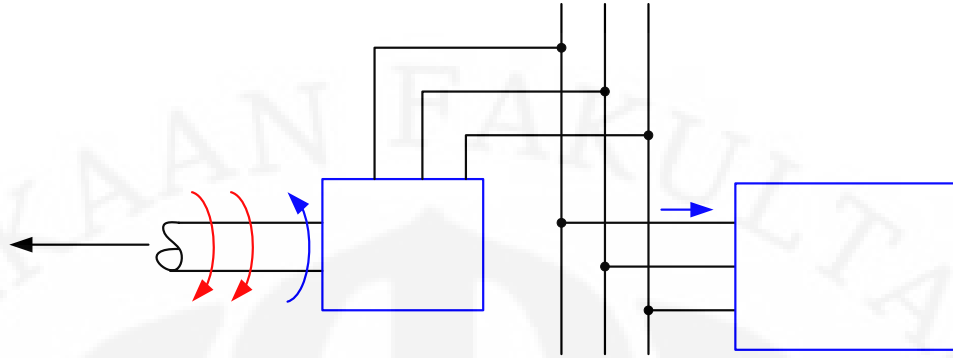
- $J$  = momen inersia total dari rotor ( $\text{kgm}^2$ )
- $\theta_m$  = pergeseran sudut rotor relatif terhadap sumbu yang tetap (rad)
- $T_a$  = torsi percepatan (Nm)
- $T_m$  = torsi mekanis yang diberikan oleh *prime mover* (Nm)
- $T_e$  = torsi listrik keluaran generator (Nm)



Gambar 2.1 Dinamika perputaran mekanis pada generator sinkron

Nilai dari torsi mekanis ( $T_m$ ) dan torsi listrik ( $T_e$ ) pada generator sinkron adalah positif [2]. Hal ini berarti  $T_m$  yang berasal dari *prime mover* akan selalu memberikan percepatan positif yang searah dengan perputaran rotor. Sementara torsi listrik ( $T_e$ ) yang merupakan daya pada *air gap* berupa jumlah dari total daya output ditambah dengan rugi-rugi pada kumparan jangkar, akan mempunyai arah yang berlawanan dengan  $T_m$  [2].

Pada kondisi *steady-state* dari generator, nilai  $T_m$  dan  $T_e$  adalah sama sehingga nilai torsi akselerasi ( $T_a$ ) adalah nol [2]. Kondisi ini menunjukkan bahwa rotor tidak mengalami percepatan ataupun perlambatan dan kecepatan tetap resultannya adalah kecepatan sinkronnya. Sedangkan jika mengalami gangguan,  $T_a$  dapat bernilai positif atau rotor mengalami akselerasi dan dapat juga bernilai negatif atau rotor mengalami deselerasi. Perubahan nilai  $T_a$  ini tergantung dari nilai  $T_m$  dan  $T_e$  yang terjadi pada generator sinkron. Hal tersebut diperlihatkan oleh gambar dibawah ini :



Gambar 2.2 Arah torsi mekanis dan torsi listrik generator yang terhubung dengan jala-jala [7]

Pada suatu sistem tenaga listrik yang terdiri dari banyak generator yang saling terinterkoneksi, untuk mencapai kondisi *steady-state* atau mencapai kecepatan sinkronnya maka seluruh rotor generator dan *prime mover*nya harus memiliki percepatan yang besarnya adalah nol. Meskipun nilai  $T_m$  dapat diatur melalui *governor*, tetapi untuk menganalisa stabilitas, nilai  $T_m$  dianggap konstan untuk setiap kondisi kerja yang diberikan.

Seperti yang telah dinyatakan sebelumnya bahwa  $\theta_m$  merupakan pergeseran sudut rotor relatif terhadap sumbu yang tetap pada stator. Jika  $\theta_m$  ditentukan relatif terhadap sumbu yang bergerak pada kecepatan sinkron yang konstan, maka berlaku :

$$\theta_m = \omega_{sm} t + \delta_m \text{ rad}$$

dimana :

$\omega_{sm}$  = kecepatan sinkron mesin (rad/s)

$\delta_m$  = pergeseran sudut rotor relatif terhadap sumbu yang bergerak dengan kecepatan sinkron (rad)

Jika persamaan (2.2) diturunkan sekali terhadap waktu maka akan diperoleh persamaan kecepatan sudut rotornya :

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \text{ rad/s} \quad (2.3)$$

Kemudian jika persamaan diatas diturunkan sekali lagi terhadap waktu maka akan diperoleh persamaan percepatan sudut rotor, yang dinyatakan sebagai :

## Penggerak Utama (Prime Mover)



$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \text{ rad/s}^2 \quad (2.4)$$

Berdasarkan persamaan sudut rotor, diperoleh bahwa  $\frac{d\theta_m}{dt}$  adalah konstan dan akan sama dengan kecepatan sinkronnya ( $\omega_{sm}$ ) jika  $\frac{d\delta_m}{dt}$  bernilai nol. Oleh karena itu,  $\frac{d\delta_m}{dt}$  dinyatakan sebagai penyimpangan kecepatan rotor terhadap kecepatan sinkronnya dan memiliki satuan rad/s. Apabila persamaan (2.4) disubstitusikan ke persamaan (2.1) maka diperoleh :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \text{ Nm} \quad (2.5)$$

Kemudian jika persamaan (2.5) dikalikan dengan  $\omega_m$  maka :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m T_a = \omega_m (T_m - T_e) \text{ Watt} \quad (2.6)$$

Oleh karena perkalian torsi dengan kecepatan sudut adalah daya maka persamaan diatas dapat juga ditulis sebagai berikut :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ Watt} \quad (2.7)$$

Nilai  $J\omega_m$  adalah konstanta kelembaman atau inersia dari mesin dan dinotasikan dengan M. Nilai konstanta ini sangat berkaitan dengan energi kinetik dari massa yang berputar ( $E_k$ ), sehingga :

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega_m^2 = \frac{1}{2} M \omega_m \text{ Joule} \quad (2.8)$$

$$M = 2 \frac{E_k}{\omega_m} \text{ Joule-s/rad} \quad (2.9)$$

Meskipun M adalah konstanta inersia, tetapi dalam kenyataannya, nilai ini tidak selalu konstan, melainkan berubah-ubah sesuai dengan penyimpangan kecepatan sudut rotor ( $\omega_m$ ) terhadap kecepatan sinkronnya [1]. Oleh karena itu, M dihitung pada kecepatan sinkronnya dan dianggap tetap konstan. Persamaan ayunan dalam bentuk konstanta inersia adalah sebagai berikut :

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ Watt} \quad (2.10)$$

Namun karena analisa kestabilan cenderung menggunakan sudut daya elektrik ( $\delta$ ), maka persamaan ayunannya harus diubah terlebih dahulu agar tidak menimbulkan kesulitan dalam melakukan analisa. Jika  $p$  adalah jumlah kutub dari generator sinkron maka hubungan sudut daya elektrik ( $\delta$ ) dengan sudut daya mekanis ( $\delta_m$ ) adalah :

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \text{ rad} \quad (2.11)$$

Jika dibagi terhadap waktu maka menjadi :

$$\omega = \frac{p}{2} \omega_s \text{ rad/s} \quad (2.12)$$

Sehingga persamaan ayunan dalam bentuk sudut daya elektrik menjadi :

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ Watt} \quad (2.13)$$

Oleh karena analisa sistem tenaga listrik umumnya dilakukan dalam sistem per unit maka persamaan ayunan juga diubah menjadi per unit, dengan cara membaginya dengan *base power* ( $S_{\text{Base}}$ ). Selain itu, dalam studi kestabilan juga terdapat satu kontanta lagi yang tidak boleh dilupakan, yaitu kontanta inersia per unit ( $H$ ) dan dinyatakan sebagai berikut :

$$H = \frac{E_k}{S_{\text{base}}} = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{sm}^2}{S_{\text{base}}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{sm}}{S_{\text{base}}} \text{ MJ/MVA(pu)} \quad (2.14)$$

dimana  $S_{\text{Base}}$  adalah rating 3 fasa mesin dalam MVA.

Kemudian dengan menyelesaikan persamaan  $M$  pada (2.14) maka :

$$M = 2 \frac{H}{\omega_{sm}} S_{\text{base}} \text{ MJ/rad} \quad (2.15)$$

Jika persamaan diatas disubstitusikan ke persamaan (2.13) maka diperoleh :

$$\frac{2}{p} 2 \frac{H}{\omega_{sm}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{a(\text{pu})} = P_{m(\text{pu})} - P_{e(\text{pu})} \quad (2.16)$$

Karena  $\omega_{sm} = (2/p) \omega_s$  dan  $\omega = 2\pi f$  maka persamaan diatas dapat diubah menjadi :

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{a(\text{pu})} = P_{m(\text{pu})} - P_{e(\text{pu})} \quad (2.17)$$

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{a(pu)} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.18)$$

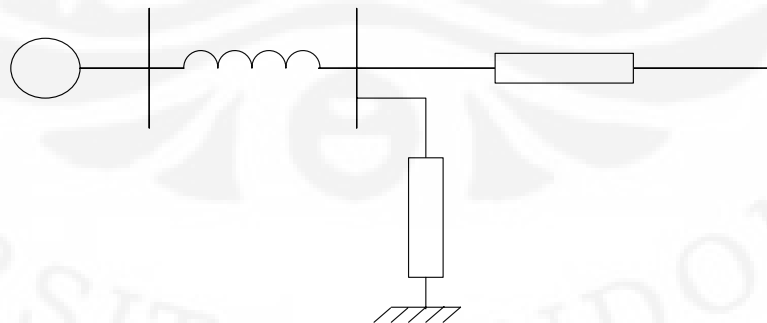
$\delta$  dalam persamaan (2.18) masih dalam bentuk radian listrik dan jika diubah ke dalam bentuk derajat listrik, maka persamaan ayunannya menjadi :

$$\frac{H}{180f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{a(pu)} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)} \quad (2.19)$$

### 2.1.3 Persamaan Sudut Daya

Dalam studi stabilitas sistem tenaga listrik, selain persamaan ayunan generator, ada satu persamaan lagi yang perlu diketahui, yaitu persamaan sudut daya dari sistem tenaga listrik. Persamaan sudut daya adalah suatu persamaan yang memperlihatkan hubungan antara daya listrik dengan sudut daya. Sudut daya merupakan perbedaan sudut fasor tegangan antara sisi pembangkit dengan sisi penerima. Sudut daya ini merupakan komponen yang penting dalam melakukan analisa stabilitas sistem tenaga listrik karena sudut daya akan mengalami perubahan saat sistem terkena gangguan. Ketika sistem mengalami gangguan maka sudut dayanya akan membesar sedangkan saat gangguan telah dapat dibersihkan maka sudut dayanya akan mengecil.

Agar lebih mempermudah dalam penurunan persamaan sudut daya maka digunakan suatu line diagram sederhana yang berupa generator sinkron yang terhubung pada suatu bus dengan suatu saluran transmisi. Berikut ini adalah representasi gambar dari line diagram tersebut :



Gambar 2.3 Representasi generator yang terhubung dengan suatu bus [7]

Melalui gambar diatas, generator direpresentasikan dengan tegangan peralihan internal ( $E'$ ) yang terhubung dengan reaktansi dalam generator itu sendiri ( $jX_d'$ ). Saluran transmisi yang terletak diantara generator dengan bus tegangan ( $V$ ) direpresentasikan sebagai impedansi saluran ( $Z_L$ ), sementara impedansi pentanahan ( $Z_S$ ) juga diikutsertakan pada gambar diatas.

Dalam melakukan analisa kestabilan maka agar lebih memudahkann dalam perhitungan digunakanlah diagram yang merepresentasikan suatu sistem tenaga listrik yang terdiri dari sisi pembangkit, saluran transmisi, dan sisi penerima. Berikut ini adalah gambar dari diagram tersebut :



Gambar 2.4 Diagram sistem yang terdiri dari pembangkit, saluran transmisi, dan penerima [2]

Pada gambar diatas diperlihatkan analogi sederhana dari pembangkit/generator , pada rel 1, yang menyuplai daya melalui saluran transmisi ke sisi penerima pada rel 2.  $E_1'$  adalah tegangan peralihan internal generator pada rel 1 (sisi pembangkit), sedangkan  $E_2'$  adalah tegangan peralihan internal generator pada rel 2 (sisi penerima).

Admitansi pada jaringan dengan jumlah node 2 jika dinyatakan dalam bentuk matriks adalah sebagai berikut [2] :

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix}$$

Kemudian dengan menggunakan persamaan aliran daya Gauss-Seidel [2] :

$$P_k - jQ_k = V_k^* \cdot \sum_{n=1}^N (Y_{kn} \cdot V_n) \quad \text{VA} \quad (2.20)$$

dengan  $k = 1$  dan  $N = 2$ , serta dengan mensubstitusikan  $V$  menjadi  $E_2'$  maka persamaan (2.20) menjadi :

$$P_1 + jQ_1 = E_1' \cdot (Y_{11} \cdot E_1')^* + E_1' \cdot (Y_{12} \cdot E_2')^* \quad \text{VA} \quad (2.21)$$

dimana :  $E_1' = |E_1| \angle \delta_1 \quad \text{V} \quad E_2' = |E_2| \angle \delta_2 \quad \text{V}$

$$Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad \Omega^{-1} \quad Y_{12} = |Y_{12}| \angle \theta_{12} \quad \Omega^{-1}$$

$$\begin{aligned} E_1' \cdot (Y_{11} E_1')^* &= |E_1| (\cos \delta_1 + j \sin \delta_1) \cdot Y_{11}^* |E_1| (\cos \delta_1 - j \sin \delta_1) \\ &= Y_{11}^* |E_1|^2 (\cos^2 \delta_1 + j \sin \delta_1 \cos \delta_1 - j \sin \delta_1 \cos \delta_1 + \sin^2 \delta_1) \\ &= Y_{11}^* |E_1|^2 (\cos^2 \delta_1 + \sin^2 \delta_1) \\ &= Y_{11}^* |E_1|^2 \end{aligned}$$

dengan  $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta = 1$

$$\begin{aligned} E_1' \cdot (Y_{12} E_2')^* &= |E_1| (\cos \delta_1 + j \sin \delta_1) \cdot Y_{12}^* |E_2| (\cos \delta_2 - j \sin \delta_2) \\ &= Y_{12}^* |E_1| |E_2| \{ \cos \delta_1 \cos \delta_2 + j \sin \delta_1 \cos \delta_2 - j \cos \delta_1 \sin \delta_2 + \sin \delta_1 \sin \delta_2 \} \\ &= Y_{12}^* |E_1| |E_2| \{ \cos(\delta_1 - \delta_2) + j \sin(\delta_1 - \delta_2) \} \end{aligned}$$

dengan  $\cos(\alpha - \beta) = (\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta)$

$$\sin(\alpha - \beta) = (\sin \alpha \cos \beta - \cos \alpha \sin \beta)$$

$$P_1 + jQ_1 = \underbrace{Y_{11}^* |E_1|^2}_0 + \underbrace{[Y_{12}^* |E_1| |E_2| \cos(\delta_1 - \delta_2)]}_1 + \underbrace{[jY_{12}^* |E_1| |E_2| \sin(\delta_1 - \delta_2)]}_2$$

$$0 \rightarrow Y_{11}^* |E_1|^2 = (G_{11} - jB_{11}) |E_1|^2 = G_{11} |E_1|^2 - jB_{11} |E_1|^2$$

$$\begin{aligned} 1 \rightarrow Y_{12}^* |E_1| |E_2| \cos(\delta_1 - \delta_2) &= |Y_{12}| (\cos \theta_{12} - j \sin \theta_{12}) |E_1| |E_2| \cos(\delta_1 - \delta_2) \\ &= |Y_{12}| |E_1| |E_2| \{ \cos(\delta_1 - \delta_2) \cos \theta_{12} - j \cos(\delta_1 - \delta_2) \sin \theta_{12} \} \end{aligned}$$

2

→

$$\begin{aligned} jY_{12}^* |E_1| |E_2| \sin(\delta_1 - \delta_2) &= j [ |Y_{12}| |E_1| |E_2| \{ \sin(\delta_1 - \delta_2) \cos \theta_{12} - j \sin(\delta_1 - \delta_2) \sin \theta_{12} \} ] \\ &= |Y_{12}| |E_1| |E_2| \{ \sin(\delta_1 - \delta_2) \sin \theta_{12} + j \sin(\delta_1 - \delta_2) \cos \theta_{12} \} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & + & 1 & + & 2 & = & \\ G_{11} |E_1|^2 - jB_{11} |E_1|^2 & + & |Y_{12}| |E_1| |E_2| \{ \cos(\delta_1 - \delta_2) \cos \theta_{12} - j \cos(\delta_1 - \delta_2) \sin \theta_{12} \} & + & & = & \end{array}$$

$$|Y_{12}||E_1||E_2|\{\sin(\delta_1 - \delta_2)\sin\theta_{12} + j\sin(\delta_1 - \delta_2)\cos\theta_{12}\}$$

$$P_1 + jQ_1 =$$

$$G_{11}|E_1|^2 + |Y_{12}||E_1||E_2|\cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) - jB_{11}|E_1|^2 + j|Y_{12}||E_1||E_2|\sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12})$$

sehingga :

$$P_1 = G_{11}|E_1|^2 + |Y_{12}||E_1||E_2|\cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) \text{ dan}$$

$$jQ_1 = -jB_{11}|E_1|^2 + j|Y_{12}||E_1||E_2|\sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12})$$

Kemudian dengan menentukan :

$$\delta = \delta_1 - \delta_2 \text{ dan}$$

$$\varphi = \theta_{12} - \pi/2$$

diperoleh :

$$P_1 = G_{11}|E_1|^2 + |Y_{12}||E_1||E_2|\sin(\delta - \varphi) \quad (2.22)$$

$$Q_1 = -B_{11}|E_1|^2 - |Y_{12}||E_1||E_2|\cos(\delta - \varphi) \quad (2.23)$$

Persamaan (2.23) dapat ditulis dalam bentuk sederhana sebagai [2] :

$$P_e = P_e + P_{\max} \sin(\delta - \varphi) \text{ Watt} \quad (2.24)$$

dimana :

$$P_e = P_1$$

$$P_e = G_{11}|E_1|^2 \quad P_{\max} = |Y_{12}||E_1||E_2|$$

Jika resistansi saluran transmisi bernilai nol maka  $G_{11}$  dan  $\varphi$  juga menjadi bernilai nol dan persamaannya menjadi :

$$P_e = P_{\max} \sin(\delta - \varphi) = \frac{|E_1||E_2|}{|X_{12}|} \sin \delta \text{ Watt} \quad (2.25)$$

atau dapat juga ditulis sebagai :

$$P_e = P_{\max} \sin(\delta - \varphi) = P_{\max} \cdot \sin \delta \text{ Watt} \quad (2.26)$$

Persamaan (2.25) dan (2.26) inilah yang disebut sebagai persamaan sudut daya.

### 2.1.4 Kriteria Sama Luas (*Equal Area Criterion*)

Hal yang paling penting untuk ditentukan dalam melakukan analisa kestabilan dari suatu sistem tenaga listrik adalah apakah sistem dapat kembali pada keadaan sinkronnya atau tidak setelah mengalami gangguan yang besar dan tiba-tiba. Gangguan tersebut dapat berupa penambahan atau hilangnya beban yang besar secara tiba-tiba, lepasnya salah satu generator yang saling terkoneksi, atau pun juga terjadinya gangguan dalam sistem. Setelah terkena gangguan, sistem akan masuk ke dalam kondisi peralihan, dimana pada kondisi itu harus dapat ditentukan apakah sistem dapat kembali sinkron atau tidak. Metode yang biasa digunakan untuk menentukan kestabilan adalah metode kriteria sama luas/EAC (*Equal Area Criterion*). Metode ini berdasarkan pada interpretasi grafik dari kurva sudut daya. Namun, metode ini hanya dapat digunakan pada sistem dengan satu mesin yang terhubung dengan bus (*Single Machine Infinite Bus*) atau sistem dengan dua mesin. Pada aplikasi sistem tenaga listrik yang terganggu, didapat karakteristik kurva yang berbeda-beda sesuai dengan jenis dan lokasi gangguannya. Pada contoh berikut ini yang digunakan adalah aplikasi yang sederhana dan paling sering digunakan untuk melakukan analisa kestabilan, yaitu gangguan tiga fasa yang terjadi tepat didepan generator/pembangkit. Berdasarkan persamaan ayunan pada persamaan (2.18) :

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \text{ Watt} \quad (2.27)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} (P_m - P_e) \quad (2.28)$$

Kemudian kedua ruasnya dikalikan dengan  $2 \frac{d\delta}{dt}$ , maka diperoleh :

$$2 \frac{d\delta}{dt} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{2\pi f}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (2.29)$$

$$\frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f}{H} (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (2.30)$$

$$d \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2\pi f}{H} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.31)$$

Dengan mengintegrasikan kedua ruas maka :

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \frac{2\pi f}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.32)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2\pi f}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (2.33)$$

Persamaan (2.33) ini menyatakan besar kecepatan relatif dari mesin, dimana nilainya harus nol pada saat mesin berada dalam keadaan *steady state* atau memiliki kecepatan sinkron. Oleh karena itu, syarat kestabilan adalah luasan yang dibentuk oleh besar perbedaan daya yang harus bernilai nol pula :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.34)$$

Apabila pada saat awal mesin beroperasi terletak pada titik keseimbangan ( $P_m = P_e$ ), yaitu ketika  $\delta_0$ , kemudian saat terjadi gangguan maka nilai dari sudut daya akan menyimpang semakin besar sebanding dengan waktu sampai gangguan selesai, yaitu ketika  $\delta_c$ . Oleh karena nilai  $\delta_c$  berada diantara  $\delta_0$  dengan  $\delta$  maka persamaan luasnya menjadi :

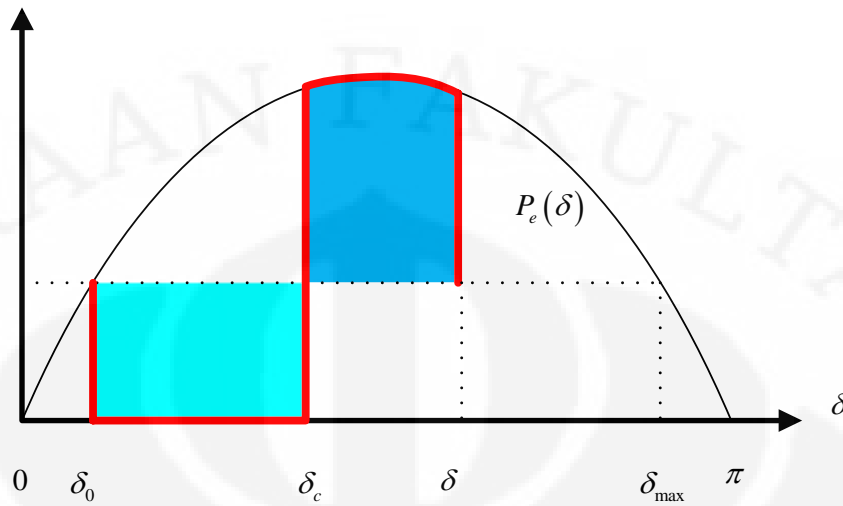
$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_c}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.35)$$

atau

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta} (P_e - P_m) d\delta \quad (2.36)$$

Berdasarkan persamaan (2.36), dapat diketahui bahwa luas daerah yang dibentuk oleh selisih antara daya mekanik dengan daya elektrik selama terjadinya gangguan sampai gangguan selesai adalah sama dengan luas daerah yang dibentuk oleh selisih antara daya elektrik dengan daya mekanik setelah gangguan selesai sampai dengan sudut daya mulai berayun balik. Kondisi inilah yang dinamakan kriteria sama luas dan kondisi ini harus terpenuhi jika sistem ingin tetap stabil. Apabila gangguan berlangsung lama sehingga mengakibatkan sudut daya menyimpang terlalu jauh maka kriteria sama luas menjadi tidak berlaku dan sistem dikatakan menjadi tidak stabil. Berikut ini adalah gambar dari contoh terjadinya kriteria sama luas pada kurva sudut daya yang mengalami gangguan :





Gambar 2.6 Kriteria sama luas – ayunan pertama sudut daya [7]

P

Dalam kondisi sinkron, besar daya mekanik ( $P_m$ ) adalah sama dengan daya elektrik ( $P_e$ ) dan akan berada pada titik keseimbangan saat  $\delta_0$ . Kemudian sistem mengalami gangguan sehingga mengakibatkan hilangnya daya elektrik dimana  $P_e$  menjadi nol, sedangkan nilai  $P_m$  dianggap konstan dan sudut daya menjadi bertambah besar. Ketika sudut daya bernilai  $\delta_c$ , maka gangguan telah hilang sehingga daya elektrik kembali mengikuti kurva sudut daya. Daerah pertama, yaitu  $A_1$ , disebut dengan daerah akselerasi dan dibentuk oleh pergerakan daya elektrik terhadap sudut daya (a-b-c-d). Daerah akselerasi ini dapat terjadi karena  $P_m > P_e$  sehingga menyebabkan terjadinya ketidakseimbangan, dimana daya mekanik lebih besar dari daya elektrik yang mengakibatkan adanya daya mekanik yang tidak terkonversi menjadi daya elektrik. Oleh karena kondisi ini bertentangan dengan hukum kekekalan energi, maka energi sisa tersebut akan digunakan untuk mempercepat putaran rotor sehingga menyebabkan energi kinetiknya bertambah besar. Sedangkan ketika gangguan telah dihilangkan, yaitu saat  $\delta_c$ , maka berlaku hubungan  $P_e > P_m$ . Hal ini menyebabkan energi yang sebelumnya diubah menjadi energi kinetik, menjadi berkurang hingga mencapai nol seiring dengan melambatnya putaran rotor. Pada daerah kedua, yaitu  $A_2$ , yang terbentuk dari perlanjutan pergerakan daya elektrik terhadap sudut daya (d-e-f-g) disebut dengan daerah deselerasi. Ketika seluruh energi kinetik telah terkonversi

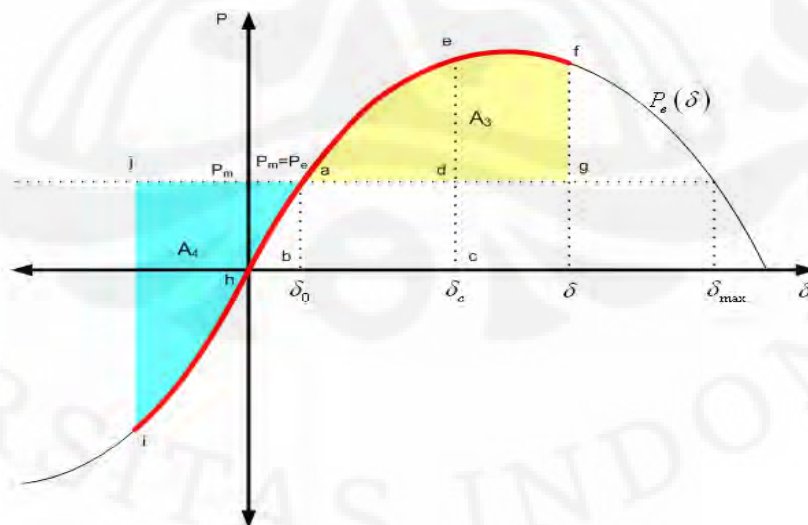
$$P_m = P_e$$

$P_m$

b

kembali, maka luas daerah  $A_1$  adalah sama dengan daerah  $A_2$ , dimana pada saat itu sudut daya berada pada  $\delta$ .

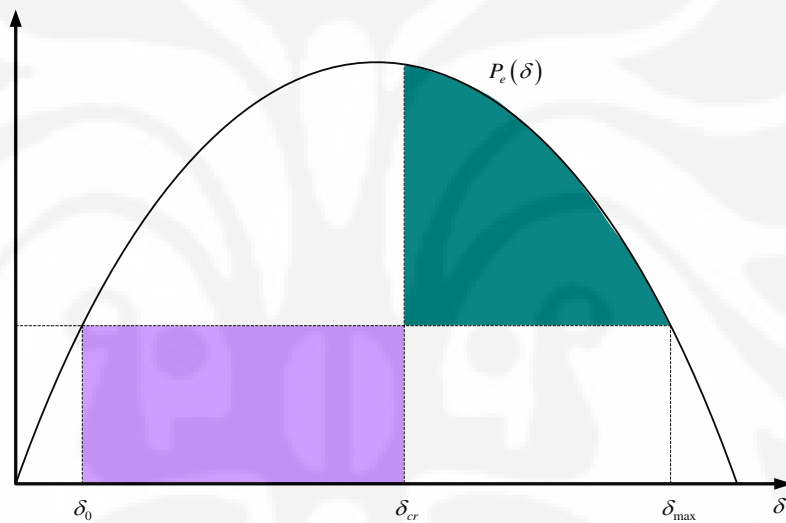
Meskipun luas daerah  $A_1$  sama dengan luas daerah  $A_2$  seperti pada gambar 2.5, tetapi pada kenyataannya antara daya mekanik dengan daya elektrik tetap terjadi perbedaan, dimana saat besar sudut daya  $\delta$  berada dititik f maka  $P_e > P_m$ . Oleh karena itu, rotor akan terus memperlambat putarannya sehingga menyebabkan sudut daya berayun balik dan besar daya elektrik akan terus berkurang dengan mengikuti jalur kurva sudut daya sehingga membentuk luas daerah  $A_3$  (g-f-e-a) pada sudut daya awal ketika sistem dalam keadaan sinkronnya atau kondisi *steady state*. Sesuai dengan kriteria sama luas maka putaran rotor akan terus diperlambat hingga akhirnya membentuk luas daerah  $A_4$  (a-h-i-j), yang besarnya sama dengan luas daerah  $A_3$ . Ketika mencapai titik i ini, rotor akan kembali dipercepat karena  $P_m > P_e$ , sehingga proses ayunan sudut daya akan berlangsung terus-menerus disekitar titik keseimbangan ( $\delta_0$ ). Apabila sistem tidak mempunyai redaman maka proses ayunan akan terus terjadi dengan urutan i-a-f, f-a-i, dan seterusnya dengan kecepatan sinkron pada titik f dan i. Namun, jika sistem memiliki redaman yang baik maka sudut daya akan berhenti berayun dan kembali pada kondisi *steady state* yaitu berada pada titik keseimbangannya. Berikut ini adalah gambar kurva ayunan balik sudut daya :



Gambar 2.7 Kriteria sama luas - ayunan balik sudut daya [7]

### 2.1.5 Sudut Pemutusan Kritis dan Waktu Pemutusan Kritis

Kestabilan dalam sistem tenaga listrik dapat tercapai jika setelah mengalami gangguan, sistem dapat kembali ke titik kesetimbangannya atau dengan kata lain jika kriteria sama luas dapat tercapai. Namun terkadang saat sistem terkena gangguan yang besar, sudut dayanya dapat membesar tanpa batas hingga menuju ketidakstabilan. Oleh karena itu, untuk mencegah hal seperti ini dapat terjadi maka harus ditentukan titik kritis untuk pemutusan gangguannya sehingga kriteria sama luas dapat terpenuhi. Sudut daya yang tepat berada pada titik kritis inilah yang dinamakan sudut pemutusan kritis (*critical clearing angle*), dan diperlihatkan oleh gambar dibawah ini :



Gambar 2.7 Kurva sudut daya yang menentukan sudut pemutusan kritis  $\delta_{cr}$ .

Sementara waktu pemutusan kritis (*critical clearing time*) merupakan waktu kritis yang diperlukan untuk menghilangkan gangguan atau dengan kata lain waktu dari mulai terjadinya gangguan hingga sudut daya mencapai titik kritis. Sudut pemutusan kritis ditentukan dengan melakukan penurunan rumus dengan berdasarkan prinsip kriteria sama luas. Berikut ini adalah penurunan rumusnya :

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m (\delta_{cr} - \delta_0) \quad (2.37)$$

$$A_2 = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta) d\delta - \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_m) d\delta \\
&= -P_{max} \cos \delta \Big|_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} - P_m \delta \Big|_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} \\
&= P_{max} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{max}) - P_m (\delta_{max} - \delta_{cr}) \quad (2.38)
\end{aligned}$$

Karena  $A_1 = A_2$  maka jika persamaan (2.37) dengan persamaan (2.38) digabungkan menjadi :

$$P_m \delta_{cr} - P_m \delta_0 = P_{max} \cos \delta_{cr} - P_{max} \cos \delta_{max} - P_m \delta_{max} + P_m \delta_{cr} \quad (2.39)$$

$$P_{max} \cos \delta_{cr} = P_{max} \cos \delta_{max} + P_m \delta_{max} - P_m \delta_0 \quad (2.40)$$

$$\cos \delta_{cr} = \cos \delta_{max} + \frac{P_m}{P_{max}} (\delta_{max} - \delta_0) \quad (2.41)$$

Berdasarkan kurva sinusoidal sudut daya diketahui bahwa :

$$\delta_{max} = \pi - \delta_0$$

$$P_m = P_{max} \sin \delta_0$$

Kemudian dengan mensubstitusikan  $\delta_{max}$  dan  $P_m$  pada persamaan (2.41) maka :

$$\begin{aligned}
\cos \delta_{cr} &= \cos(\pi - \delta_0) + \frac{P_{max} \sin \delta_0}{P_{max}} (\pi - \delta_0 - \delta_0) \\
&= -\cos \delta_0 + \sin \delta_0 (\pi - 2\delta_0) \quad (2.42)
\end{aligned}$$

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} [(\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0] \quad (2.43)$$

Persamaan (2.43) adalah persamaan sudut pemutusan kritis, sedangkan persamaan waktu pemutusan kritis dapat diperoleh dengan menurunkan persamaan ayunan (2.18) dengan  $P_e = 0$  selama terjadinya gangguan.

$$\frac{H}{\pi f} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m \text{ Watt} \quad (2.44)$$

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi f}{H} P_m \quad (2.45)$$



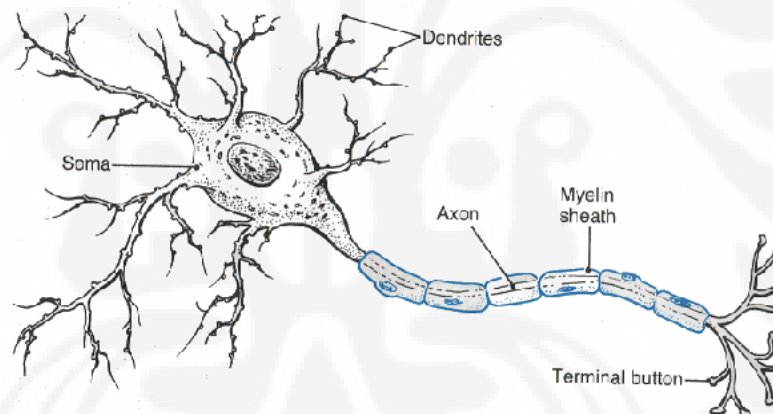
elektris maka reaktor akan menyerap daya keluaran elektrik tersebut. Dengan demikian kestabilan dari sistem tenaga listrik dapat lebih cepat tercapai dibandingkan dengan hanya menggunakan beban resistor.



## 2.2 JARINGAN SYARAF TIRUAN

### 2.2.1 Prinsip Dasar

Jaringan Syaraf Tiruan (JST) merupakan suatu sistem yang dibentuk dengan berdasarkan prinsip kerja yang sama dengan otak manusia. Otak manusia adalah pusat dari sistem syaraf manusia yang mengatur hampir seluruh operasi kerja dari berbagai organ tubuh manusia. Otak manusia mampu melakukan segala proses pembelajaran, adaptasi, penyimpanan memori, dan koreksi terhadap operasi yang telah dilakukan. Prinsip kerja itulah yang diterapkan oleh JST sehingga JST mampu melakukan operasi seperti yang dilakukan oleh otak manusia. Sama halnya dengan otak manusia, JST terdiri dari sejumlah besar elemen pemroses/*neurons* yang saling terhubung erat dan beroperasi secara paralel. Berikut ini adalah gambar diagram skematik dari *neuron* biologis yang merupakan dasar dari prinsip kerja dari JST :



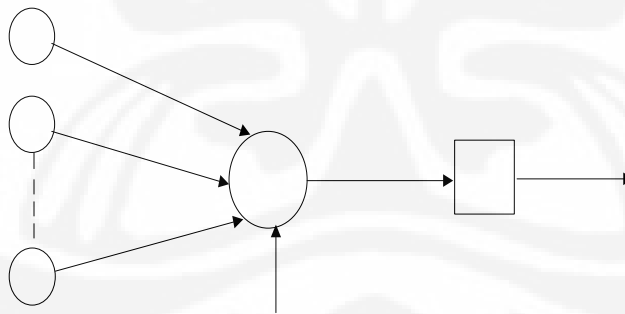
Gambar 2.9 Diagram skematik dari *neuron* biologis

Sebuah *neuron* terdiri dari 3 bagian utama, yaitu *cell body* atau *soma*, *dendrit*, dan *axon*. *Cell body* merupakan tempat dimana inti sel berada. *Dendrit* adalah jaringan yang bentuknya bercabang dan terhubung dengan *cell body*. Sedangkan *axon* merupakan perpanjangan dari *cell body* yang berfungsi untuk membawa impuls atau sinyal dari dan ke neuron lainnya. Kemudian di ujung sebuah *axon* akan bercabang membentuk suatu bagian kecil yang disebut dengan *synapse*. *Synapse* adalah penghubung antar neuron dalam mengirimkan sebuah informasi. Secara garis besar sel syaraf manusia memiliki prinsip kerja sebagai berikut: *neuron* akan

menerima impuls dari *neuron-neuron* lain melalui *dendrit*, kemudian nukleus yang terdapat pada *cell body* akan memproses dan mengirimkan hasil proses berupa impuls atau informasi menuju *neuron-neuron* lain melalui *axon* dan *synapse*.

### 2.2.2 Komposisi dan Struktur Jaringan Syaraf Tiruan

Jaringan Syaraf Tiruan memiliki struktur yang terdiri dari 4 komponen utama, yaitu : *neuron*, *layer*, bobot, dan fungsi aktivasi. *Neuron* adalah pusat komputasi dari JST yang berfungsi untuk memproses sinyal informasi yang diterima dari *neuron-neuron* sebelumnya. Setiap *neuron* memiliki suatu fungsi aktivasi yang akan digunakan untuk menentukan output dari tersebut. Pada JST, *neuron-neuron* akan dikumpulkan dalam lapisan – lapisan (*layer*) yang dinamakan lapisan *neuron* (*neuron layers*). Biasanya *neuron-neuron* pada satu lapisan akan dihubungkan dengan lapisan-lapisan sebelum dan sesudahnya (kecuali lapisan input dan output). Lapisan-lapisan yang merambatkan informasi mulai dari lapisan input hingga lapisan output dinamakan lapisan tersembunyi (*hidden layer*). Hubungan antara *neuron* dari satu lapisan ke *neuron* pada lapisan lainnya disebut dengan bobot (*weight*). Berikut ini adalah gambar dari suatu *perceptron* dengan beberapa masukan :



Gambar 2.10 *Perceptron* JST dengan beberapa masukan

Berdasarkan gambar di atas, input *neuron* dinotasikan dengan  $X_i$ , sedangkan bobot dinotasikan dengan  $W_i$ . Notasi  $b$  pada gambar di atas adalah bias. Masing-masing input ( $X_i$ ) akan dikalikan dengan bobot-bobotnya untuk kemudian dijumlahkan. Sedangkan bias ( $b$ ) berfungsi sebagai penyesuaian yang akan ditambahkan ke perkalian bobot dan output. Nilai output ( $a$ ) adalah jumlah



perkalian antara input dan bobot lalu ditambah dengan bias (b), yang nantinya akan diaktifkan oleh fungsi aktivasi (f) sehingga menghasilkan keluaran *neuron* (y). Fungsi aktivasi merupakan suatu fungsi matematis yang bebas untuk dipilih. Berikut ini adalah beberapa fungsi aktivasi yang umumnya digunakan pada JST dan terdapat pada *toolbox* Matlab [3] :

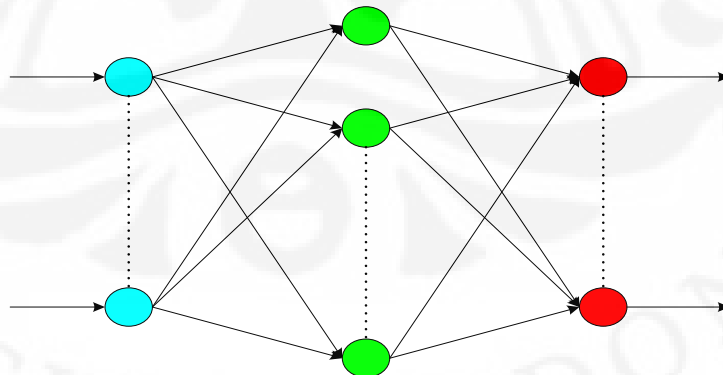
1. Fungsi undak biner (*hardlim*)
2. Fungsi bipolar (*hardlims*)
3. Fungsi linear (*purelin*)
4. Fungsi saturating linear (*satlin*)
5. Fungsi symmetric saturating linier (*satlins*)
6. Fungsi sigmoid biner (*logsig*)
7. Fungsi Sigmoid bipolar (*tansig*)

Perhitungan pada *neuron* tunggal dapat dirumuskan dengan persamaan matematis sebagai berikut :

$$a = \left( \sum_{i=1}^N x_i w_i \right) + b \quad ; N = \text{banyaknya input pada } \textit{neuron} \quad (2.49)$$

$$y = f(a) \quad ; f = \text{fungsi aktivasi} \quad (2.50)$$

Jaringan Syaraf Tiruan tidak dapat dibangun dengan hanya menggunakan *neuron* tunggal saja melainkan diperlukan beberapa *neuron* yang tersusun paralel seperti gambar di bawah ini :



Gambar 2.10 Konfigurasi hubungan input – output JST

Melalui gambar diatas dapat dilihat bahwa dalam JST terdapat 3 jenis lapisan, yaitu lapisan input, lapisan tersembunyi, dan lapisan output. Lapisan input dan lapisan output masing – masing terdiri dari satu lapisan, sedangkan lapisan tersembunyi dapat berjumlah lebih dari satu lapisan. Proses pembelajaran pada JST dilakukan dengan cara mengubah nilai bobot-bobotnya pada konfigurasi yang digunakan. Proses pembelajaran ini bertujuan untuk melatih JST sehingga dengan perubahan input yang diberikan, dapat menghasilkan output yang diinginkan. Algoritma dari proses pembelajarannya berdasarkan perubahan nilai bobot JST sehingga selama prosesnya, bobot-bobot tersebut akan terus diubah hingga diperoleh nilai bobot yang terbaik. Algoritma pembelajaran yang biasa digunakan dalam JST adalah algoritma *backpropagation*.

### 2.2.3 Algoritma *Backpropagation*

*Backpropagation* merupakan algoritma pembelajaran yang terawasi dan biasanya digunakan oleh perceptron dengan banyak lapisan untuk mengubah bobot – bobot yang terhubung dengan *neuron – neuron* yang ada pada lapisan tersembunyinya [3]. Algoritma *backpropagation* menggunakan error output untuk mengubah nilai bobot–bobotnya dalam arah mundur (*backward*) [3]. Untuk mendapatkan error ini, tahap perambatan maju (*forward propagation*) harus dikerjakan terlebih dahulu [3]. Pelatihan *backpropagation* terdiri dari 3 tahap, yaitu : perambatan maju, propagasi balik, dan modifikasi bobot *neuron*. Sedangkan siklus dari ketiga tahapan ini disebut dengan iterasi atau dalam JST dinamakan epoch.

Prinsip kerja dari algoritma *backpropagation* adalah sebagai berikut, pada saat umpan maju, *neuron* pada *input layer* akan mengirimkan informasi ke setiap *neuron* pada *hidden layer*. *Neuron hidden layer* ini akan melakukan proses komputasi terhadap informasi yang diterima dan menghasilkan output yang berasal dari fungsi aktivasinya. Selanjutnya output dari *hidden layer* tersebut akan dikirimkan lagi ke lapisan berikutnya, yang dalam hal ini adalah *output layer*. Di dalam *output layer* ini berlangsung proses yang sama seperti pada *hidden layer*. Namun, output dari hasil fungsi aktivasi *output layer* ini akan digunakan sebagai sinyal respon dari JST.

Sinyal respon output JST ini akan dibandingkan dengan target yang diinginkan dan dihitung besar errornya (selisih antara output yang dihasilkan dengan target ingin dicapai). Error yang diperoleh ini dikirimkan kembali ke lapisan-lapisan sebelumnya dan kemudian digunakan untuk mengoreksi dan mengubah bobot-bobot JST-nya berdasarkan *learning rate* yang diberikan pada JST tersebut. *Learning rate* adalah konstanta pembelajaran dalam algoritma *backpropagation* yang bernilai antara 0 dan 1. Dalam menetapkan nilai *learning rate* tidak boleh terlalu kecil karena akan memperlambat proses iterasinya, tetapi juga tidak boleh terlalu besar dan harus disesuaikan dengan kebutuhan. Proses pembelajaran ini akan berlangsung terus menerus hingga dihasilkan output JST yang sama dengan atau minimal mendekati target. Namun, proses ini juga dapat berhenti apabila jumlah iterasinya telah melebihi jumlah iterasi yang diperbolehkan atau yang lebih dikenal dengan nama maksimum epoch.

Metode pembelajaran dari algoritma *backpropagation* ini dapat dituliskan sebagai berikut [3] :

1. Menginisialisasi bobot dan bias JST serta epoch = 0.
2. Menetapkan maksimum epoch, target error, dan *learning rate* ( $\alpha$ ).
3. Selama (epoch < maksimum epoch) dan (error > target error) maka proses akan terus berlanjut.
4. Untuk setiap pasangan data *training* dilakukan langkah berikut ini (epoch=epoch+1):

*Feedforward* :

- a) Setiap unit input menerima data  $x_i$  dan mengirim sinyal input ke semua unit pada layer berikutnya (hidden layer).
- b) Tiap-tiap unit pada suatu hidden layer  $h_q$  menjumlahkan sinyal input terbobot dan menggunakan fungsi aktivasi untuk menghitung sinyal outputnya.

$$h_{in_q} = \left( \sum_{i=1}^n x_i v_{iq} \right) + b1_q \quad (2.51)$$

$$h_q = f(h_{in_q}) \quad (2.52)$$

Kemudian sinyal output  $h_q$  akan dikirim ke semua unit pada layer berikutnya (output layer).

- c) Setiap output unit  $y_j$  menjumlahkan sinyal input terbobot dan menggunakan fungsi aktivasi untuk menghitung sinyal outputnya.

$$y_{in_j} = \left( \sum_{q=1}^n h_q w_{qj} \right) + b_{2_j} \quad (2.53)$$

$$y_j = f(y_{in_j}) \quad (2.54)$$

*Backpropagation :*

- d) Setiap output unit  $y_j$  menerima target pola yang berhubungan dengan pola input pembelajaran, kemudian dihitung informasi errornya ( $e = (t_j - y_j)$ ) :

$$\delta_{2_j} = (t_j - y_j) f'(y_{in_j}) \quad (2.55)$$

$$\varphi_{2_{qj}} = \delta_{2_j} h_q \quad (2.56)$$

$$\beta_{2_j} = \delta_{2_j} \quad (2.57)$$

Hitung koreksi bobot untuk memperbaiki nilai  $w_{qj}$  :

$$\Delta w_{qj} = \alpha \varphi_{2_{qj}} \quad (2.58)$$

Hitung koreksi bias untuk memperbaiki nilai  $b_{2_j}$  :

$$\Delta b_{2_j} = \alpha \beta_{2_j} \quad (2.59)$$

- e) Setiap hidden unit  $h_q$  menjumlahkan delta inputnya (dari unit-unit yang berada di lapisan berikutnya) :

$$\delta_{in_q} = \sum_{j=1}^p \delta_{2_j} w_{qj} \quad (2.60)$$

Kemudian dihitung informasi errornya :

$$\delta_{1_q} = \delta_{in_q} f'(h_{in_q}) \quad (2.61)$$

$$\varphi_{1_{iq}} = \delta_{1_q} x_i \quad (2.62)$$

$$\beta_{1_q} = \delta_{1_q} \quad (2.63)$$

Hitung koreksi bobot untuk memperbaiki nilai  $v_{iq}$  :

$$\Delta v_{iq} = \alpha \varphi_{1_{iq}} \quad (2.64)$$

Hitung koreksi bias untuk memperbaiki nilai  $b_{1_q}$  :

$$\Delta b1_q = \alpha \beta 1_q \quad (2.65)$$

f) Setiap output unit memperbaiki bias dan bobotnya.

$$w_{qj}(\text{baru}) = w_{qj}(\text{lama}) + \Delta w_{qj} \quad (2.66)$$

$$b2_j(\text{baru}) = b2_j(\text{lama}) + \Delta b2_j \quad (2.67)$$

g) Setiap unit pada hidden layer memperbaiki bias dan bobotnya.

$$v_{iq}(\text{baru}) = v_{iq}(\text{lama}) + \Delta v_{iq} \quad (2.68)$$

$$b1_q(\text{baru}) = b1_q(\text{lama}) + \Delta b1_q \quad (2.69)$$

5. Menguji kondisi (epoh < maksimum epoh) atau (error ≥ target error).

# BAB III

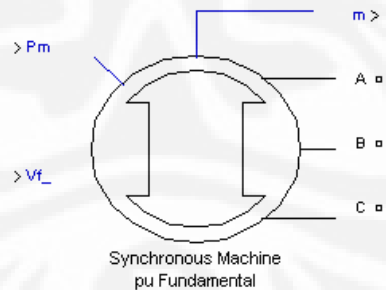
## PERANCANGAN SISTEM DAN PENGENDALI JARINGAN SYARAF TIRUAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai perancangan sistem tenaga listrik yang digunakan untuk menjalankan simulasi dalam skripsi ini, dimana rangkaian sistem yang digunakan berupa sistem 3 fasa. Dasar dari perancangan rangkaian ini dibentuk berdasarkan model rangkaian yang terdapat dalam demo simulink dari program MATLAB 7.1. Namun dalam rangka pembuatan skripsi ini, rangkaian tersebut harus diubah sedemikian rupa dengan melakukan penambahan-penambahan model komponen lain yang berasal dari simulink *library* milik program MATLAB 7.1.

### 3.1 PERANCANGAN SISTEM TENAGA LISTRIK

#### 3.1.1 Pembangkit/Generator

Dalam simulasi stabilitas ini, generator yang digunakan adalah *Synchronous Machine pu Fundamental* dengan rating sebesar 200 MVA/13,8 kV. Berikut ini adalah deskripsi model generatornya :



Gambar 3.1 Model generator sinkron

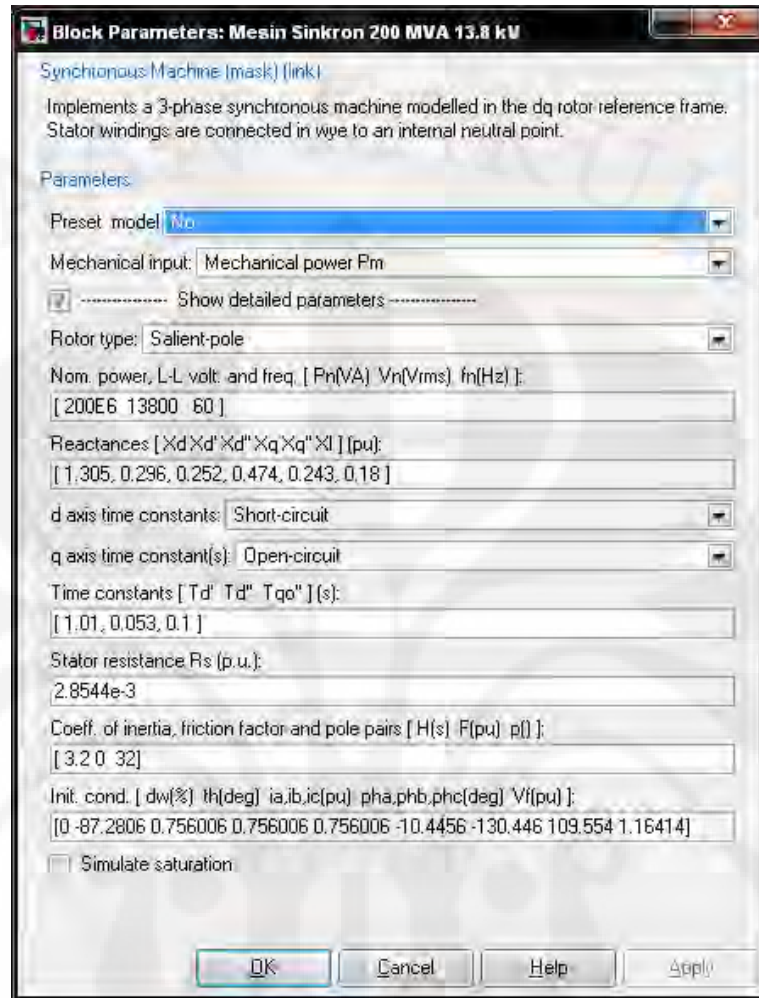
Model generator sinkron ini membutuhkan input berupa daya masukan mekanis  $P_m$  dan tegangan eksitasi  $V_f$ . Dalam simulasi skripsi ini, daya masukan mekanis  $P_m$  dan tegangan eksitasi  $V_f$  untuk generator sinkron diasumsikan konstan selama periode simulasi dengan nilai 0.7516 pu untuk  $P_m$  dan 1.1641 pu untuk  $V_f$ . Kedua nilai  $P_m$  dan  $V_f$  tersebut diperoleh berdasarkan hasil inisialisasi dari komponen

*Powergui*. Komponen *Powergui* berfungsi untuk melakukan inisialisasi mesin dan aliran daya dari rangkaian simulasi 3 fasa yang digunakan dalam simulasi. Proses inisialisasi tersebut akan mengatur kondisi awal dari generator sinkron yang digunakan dalam simulasi dengan berdasarkan keadaan beban-beban yang terpasang dalam rangkaian. Dengan demikian, apabila simulasi ini dijalankan maka sistem akan mulai bekerja dalam kondisi *steady-state*. Berikut ini adalah tabel hasil inisialisasi dari komponen *Powergui* :

Tabel 3.1 Inisialisasi mesin dan aliran daya

Nama Mesin	Mesin Sinkron 200 MVA 13.8 kV
Nilai Nominal	200 MVA 13.8 kV rms
Tipe Bus:	P&V generator
Fasa Uan	-17.67°
Uab	13800 Vrms [1 pu] 12.33°
Ubc	13800 Vrms [1 pu] -107.67°
Uca	13800 Vrms [1 pu] 132.33°
Ia	6325.8 Arms [0.756 pu] -10.45°
Ib	6325.8 Arms [0.756 pu] -130.45°
Ic	6325.8 Arms [0.756 pu] 109.55°
Daya Aktif (P):	1.5e+008 W [0.75 pu]
Daya Reaktif (Q):	-1.902e+007 Vars [-0.0951 pu]
Daya Mekanis:	1.5033e+008 W [0.7516 pu]
Torsi:	1.276e+007 N.m [0.7516 pu]
Tegangan Eksitasi (Vf):	1.1641 pu

Sementara pengaturan generator sinkron ini dilakukan dengan menggunakan sebuah *block parameter* seperti gambar di bawah ini :



Gambar 3.2 Block parameter generator sinkron

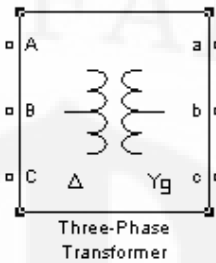
Pengaturan diatas adalah pengaturan yang digunakan dalam menjalankan simulasi pada skripsi ini. Parameter-parameter pada blok diatas memakai nilai yang berasal dari *default* atau pengaturan awal dari MATLAB itu sendiri.

### 3.1.2 Transformator

Sebagaimana yang terdapat pada sistem tenaga listrik yang sebenarnya maka dalam simulasi ini setelah pembangkit atau generator sinkron, diletakkan suatu transformator *step-up* yang digunakan untuk menaikkan tegangan yang dihasilkan oleh generator, yaitu sebesar 13,8 kV menjadi sebesar 230 kV. Transformator yang digunakan adalah *Three-Phase Transformer* dengan rating sebesar 200 MVA, dimana nilai tersebut diperoleh dari contoh model rangkaian

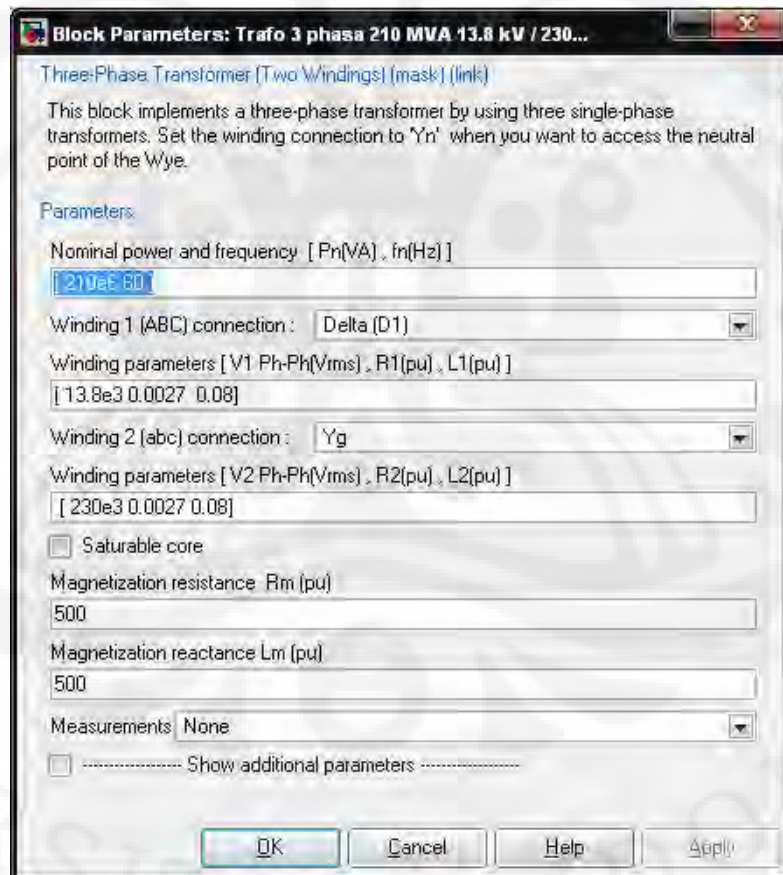


sistem tenaga listrik yang terdapat pada demo simulink MATLAB. Berikut ini adalah model transformatornya :



Gambar 3.3 Model transformator

Sama halnya dengan generator sinkron, parameter-parameter pada transformator ini juga menggunakan nilai-nilai yang sesuai dengan pengaturan *default* awal MATLAB. *Block parameter*-nya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.4 Block parameter transformator 3 fasa

### 3.1.3 Saluran Transmisi dan Sumber Gangguan

Saluran transmisi yang digunakan pada simulasi stabilitas peralihan sistem tenaga listrik ini terdiri dari 2 buah saluran paralel, yaitu saluran 1 dan saluran 2. Panjang kedua saluran itu masing-masing adalah 200 km. Pada ujung-ujung kedua saluran tersebut diletakkan *circuit breaker* (CB) yang berfungsi untuk memutuskan dan mengisolasi saluran apabila sewaktu-waktu terkena gangguan. Pengaturan saluran transmisi melalui *block parameter* di bawah ini :

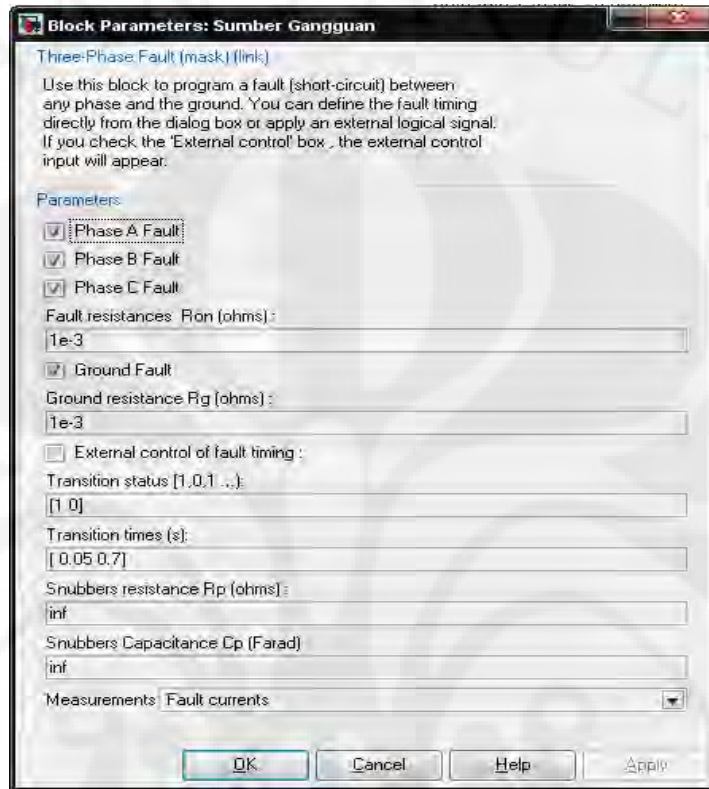


Gambar 3.5 Block parameter saluran transmisi

Sementara demi kepentingan simulasi pada skripsi ini, sumber gangguan hanya diletakkan pada salah satu saluran, yaitu pada saluran 2. Sumber gangguan itu dapat menghasilkan 3 jenis gangguan, yaitu :

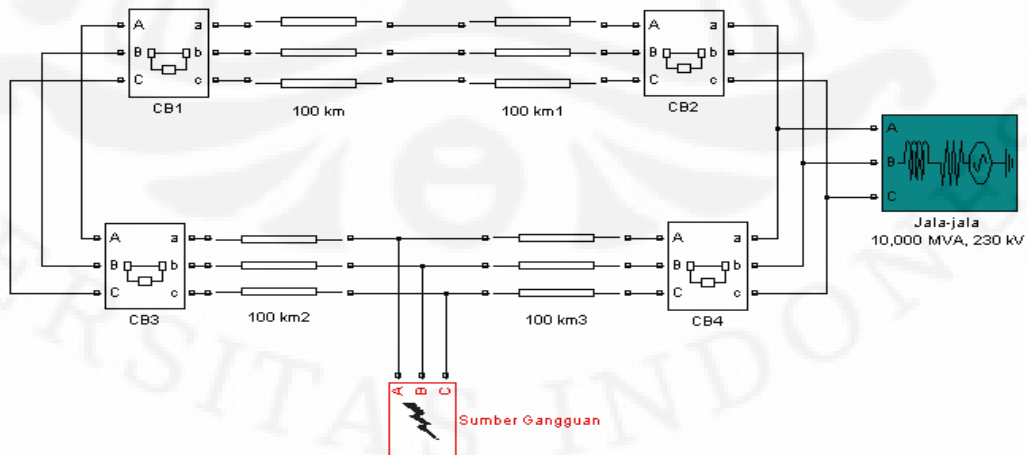
- Gangguan 1 fasa ke tanah
- Gangguan 2 fasa ke tanah
- Gangguan 3 fasa ke tanah

Durasi gangguan dan parameter-parameter sumber gangguan diatur dengan menggunakan *block parameter* berikut ini :



Gambar 3.6 Block parameter sumber gangguan

Saluran transmisi ini juga terhubung dengan suatu jaringan jala-jala dengan rating 10.000 MVA/230 kV. Berikut ini adalah deskripsi model saluran transmisinya :



Gambar 3.7 Model saluran transmisi

### 3.1.4 Braking Resistor & Reaktor

Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa *dynamic braking* adalah suatu metode perbaikan stabilitas dengan cara menambahkan beban buatan ke dalam sistem. Beban-beban buatan yang digunakan dalam rangkaian simulasi ini terdiri dari 2 buah, yaitu:

- Beban daya resistor
- Bebab daya reaktor/induktor

Pada saat diinjeksikan ke dalam sistem maka beban resistor akan menyerap daya masukan mekanis  $P_m$  dari generator ketika rotor berakselerasi sehingga kecepatan putaran rotor akan diperlambat sesuai dengan persamaan berikut ini [5] :

$$M \frac{d^2\delta(t)}{dt^2} + D \frac{d\delta(t)}{dt} = P_m - P_e(t) - P_b(t) \quad (3.1)$$

dimana :  $M$  = Konstanta inersia generator

$D$  = Koefisien redaman

$\delta$  = Posisi angular rotor

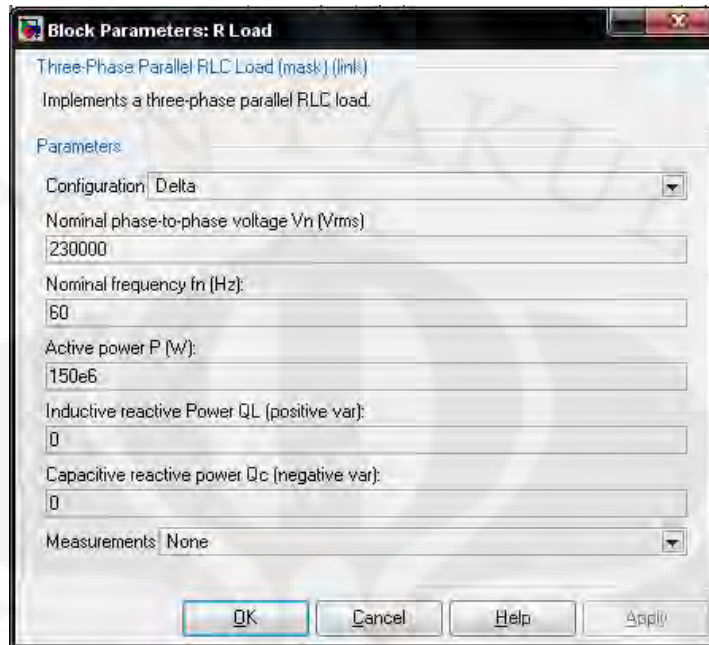
$P_m$  = Daya masukan mekanis

$P_e$  = Daya keluaran elektris

$P_b$  = Daya yang diserap resistor

Sementara injeksi beban reaktor diberikan saat rotor mengalami deselerasi dengan cara menurunkan daya keluaran elektris generator  $P_e$  sehingga putaran rotor menjadi dipercepat.

Untuk beban resistor, nilai yang diberikan adalah sebesar 150 MW atau 0,75 pu. Sedangkan untuk induktor/rektor, beban yang diberikan adalah sebesar 200 Mvar atau 1 pu. Kedua nilai tersebut diperoleh melalui hasil pengujian dimana untuk rangkaian simulasi skripsi ini, kedua nilai tersebut sudah cukup untuk menghasilkan redaman seperti yang diinginkan. Sedangkan pengaturan kedua beban tersebut dilakukan dengan blok parameter dibawah ini :



Gambar 3.8 Block parameter resistor

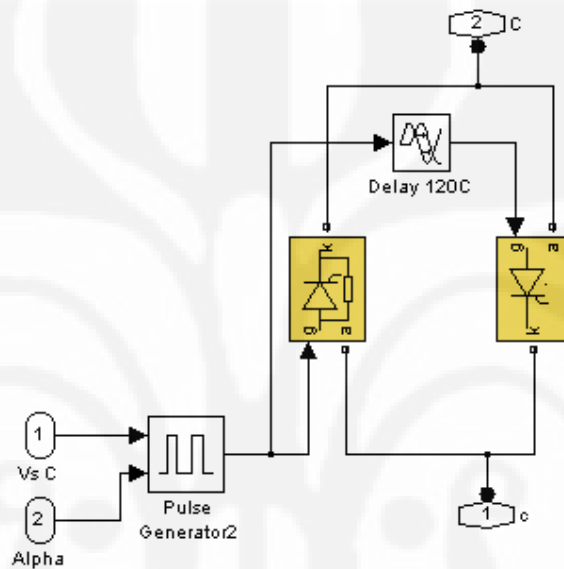


Gambar 3.9 Block parameter reaktor

### 3.1.5 Blok Tiristor

Blok tiristor dalam rangkaian simulasi ini digunakan untuk mengatur koordinasi pensaklaran dari *braking resistor-reactor*. Pensaklaran tersebut diatur operasi kerjanya dengan cara memvariasikan sudut penyalaaan tiristor  $\alpha$ , sehingga

arus yang melalui tiristor dapat diatur besarnya. Dengan adanya pengaturan arus yang melalui tiristor maka besarnya beban resistor dan reaktor yang diinjeksikan ke dalam sistem dapat diatur. Hal ini sangatlah penting untuk dilakukan karena apabila beban *braking* diinjeksikan sekaligus secara langsung ke dalam sistem maka sistem akan mengalami redaman yang berlebihan sehingga perbaikan stabilitas menjadi semakin lama. Berikut ini adalah rangkaian tiristor yang digunakan dalam simulasi :

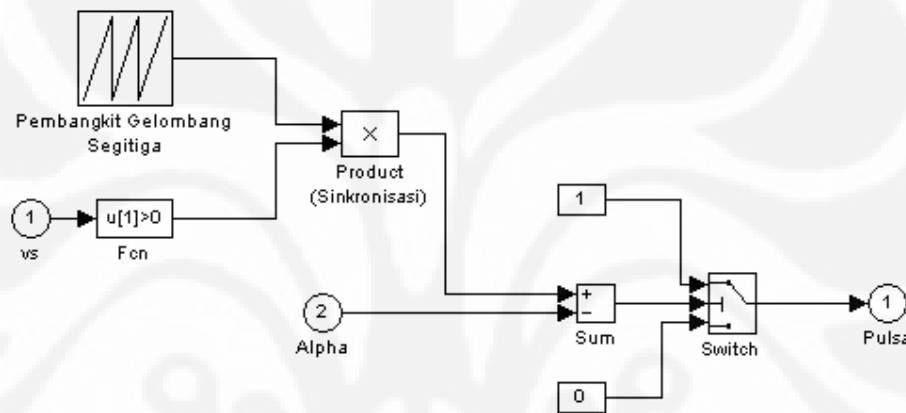


Gambar 3.10 Rangkaian tiristor pada salah satu fasa

Rangkaian diatas adalah rangkain tiristor untuk salah satu fasa, dimana sebenarnya rangkaian yang terdapat dalam simulasi terdiri dari 3 buah rangkaian seperti diatas. Hal ini dilakukan karena sistem yang dimodelkan berupa sistem 3 fasa. Pada rangkaian tiristor tersebut digunakan 2 buah tiristor yang saling berlawanan. Tujuannya adalah supaya rangkaian tersebut dapat dilewati oleh arus bolak-balik.

Pada rangkaian tiristor itu juga terlihat adanya *Pulse Generator*. *Pulse generator* ini merupakan suatu rangkaian yang digunakan untuk menghasilkan sudut penyalan tiristor. Dalam rangkaian ini, suatu gelombang segitiga yang dihasilkan oleh suatu pembangkit gelombang, disinkronisasi dengan gelombang tegangan AC yang berasal dari sistem. Hasil sinkronisasi gelombang segitiga tersebut kemudian dikurangi tegangan pengaturan ( $V_{control}$ ) sehingga diperoleh

suatu gelombang segitiga dengan dengan ketinggian yang berbeda-beda. Kemudian gelombang hasil pengurangan tersebut dimasukkan ke dalam blok rangkaian logika (1 & 0) sehingga dihasilkan suatu gelombang pulsa, dimana bila nilai dalam gelombang segitiga itu bernilai lebih dari 0 maka akan menghasilkan output pada gelombang pulsa dengan nilai 1. Gelombang pulsa ini memiliki periode yang berbeda-beda tergantung sudut penyalan yang diberikan. Gelombang inilah yang digunakan untuk mengintepretasikan besar sudut penyalan yang diberikan pada tiristor. Berikut ini adalah rangkaian *pulse generator*-nya :



Gambar 3.11 Rangkaian *pulse generator*

### 3.2 PERANCANGAN PENGENDALI JARINGAN SYARAF TIRUAN

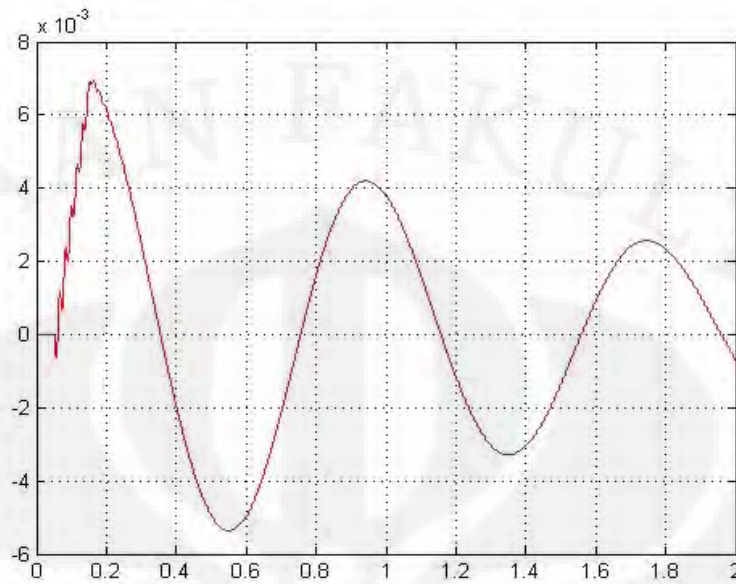
Kestabilan merupakan faktor penting yang sangat mempengaruhi sistem tenaga listrik. Namun kestabilan ini dapat terganggu apabila sewaktu-waktu sistem terkena gangguan, bahkan terkadang gangguan tersebut dapat menyebabkan terjadinya ketidakstabilan dalam sistem tenaga listrik. Oleh karena itu ketidakstabilan tersebut harus cepat diatasi agar sistem dapat kembali beroperasi dengan baik. Salah satu metode memperbaiki stabilitas tersebut adalah dengan menggunakan pengendalian *braking resistor-reactor*. Pengendali ini ditambahkan dengan tujuan agar proses pengembalian stabilitas dapat lebih cepat tercapai. Sebenarnya perbaikan dengan *braking resistor-reactor* dapat juga dilakukan tanpa pengendali, namun hal tersebut akan sangat merepotkan dan sulit untuk dilakukan. Hal ini dapat terjadi karena pengoperasian kedua beban tersebut berdasarkan pada beberapa kondisi dan keduanya juga beroperasi secara bergantian, dimana resistor akan beroperasi pada saat rotor mengalami akselerasi sedangkan reaktor beroperasi ketika rotor mengalami deselerasi. Maka dari itulah dibutuhkan suatu pengendali untuk mengatur proses kerja dari kedua beban tersebut. Dan pengendali yang digunakan dalam simulasi skripsi ini adalah pengendali Jaringan Syaraf Tiruan.

#### 3.2.1 Penentuan Prinsip Kerja Pengendali

Dalam simulasi skripsi ini, dibuat 2 buah pengendali dimana yang satu untuk mengendalikan resistor dan yang satu lagi untuk mengendalikan reaktor. Pengendali JST yang dibuat ini adalah pengendali dengan sistem SISO (*Single Input Single Output*). Input pengendalinya berupa penyimpangan kecepatan rotor sedangkan outputnya adalah sudut penyalan tiristor ( $\alpha$ ) dalam bentuk radian.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya bahwa resistor bekerja saat rotor mengalami sedangkan reaktor beroperasi saat rotor mengalami deselerasi. Namun, pengendali JST yang dibuat ini tidak terlalu berdasarkan pada konsep tersebut. Sebelum dibahas lebih lanjut maka sebaiknya perlu dilihat grafik penyimpangan kecepatan rotor berikut ini :





Gambar 3.12 Grafik penyimpangan kecepatan rotor

Berdasarkan konsep/teori *braking resistor-reactor* seharusnya pengendali untuk resistor dibuat agar resistor bekerja saat kecepatan rotor mengalami percepatan atau saat grafik penyimpangan kecepatan rotor sedang menanjak naik mulai dari nol hingga mencapai puncak nilai positif dan begitu juga sebaliknya untuk pengendali reaktor ,seharusnya dibuat saat grafiknya menurun mulai dari puncak nilai positif hingga mencapai titik terendah pada nilai simpangan negatif. Namun setelah dilakukan percobaan berdasarkan konsep tersebut, ternyata hasil yang diperoleh kurang maksimal. Dan setelah diteliti lebih lanjut ternyata hasil redaman yang paling maksimal diperoleh apabila resistor bekerja ketika simpangan kecepatan rotor bernilai positif atau saat kurva penyimpangan kecepatan berada diatas titik nol dan sebaliknya untuk reaktor bekerja pada saat simpangan kecepatan rotor bernilai negatif atau saat kurva berada dibawah titik nol.

### 3.2.2 Proses Pembelajaran JST

Sebelum membangun suatu pengendali JST, maka harus dilakukan proses pembelajaran terlebih dahulu terhadap jaringan syaraf tiruan yang dibentuk. Proses pembelajaran bertujuan untuk memperoleh bobot-bobot dan bias yang paling sesuai, yang nantinya akan digunakan dalam pengendali dalam simulasi

sistem tenaga listrik. Selama proses pembelajaran itu pasangan input dan output dimasukkan akan terus dilatih dengan nilai bobot dan bias yang selalu berubah-ubah berdasarkan tahap-tahap pembelajarannya. Proses tersebut akan berhenti ketika maksimum epoch atau target error yang diinginkan tercapai.

Proses pembelajaran yang digunakan adalah algoritma *backpropagation* jenis *gradient descent* dengan momentum. Proses pembelajaran ini dilakukan dengan cara menuliskan program di dalam m-file MATLAB 7.1. Pada proses pembelajaran untuk kedua pengendali tersebut, dibangun 3 buah lapisan, yaitu lapisan input, lapisan tersembunyi (*hidden layer*), dan lapisan output. *Hidden layer* pada kedua JST tersebut terdiri 12 *neuron* dengan fungsi aktivasi berupa fungsi sigmoid bipolar (*tansig*), sedangkan untuk lapisan input dan lapisan output sama-sama terdiri dari sebuah *neuron*. Sementara itu fungsi aktivasi yang digunakan dalam lapisan output adalah fungsi linear (*purelin*). Proses pembelajaran ini juga memiliki beberapa parameter, yaitu :

- Maksimum epoch/iterasi = 30000
- Target error yang diinginkan = 0,0001
- *Learning rate* = 0,3
- Momentum = 0,5

Sementara itu nilai bobot-bobot dan bias awal diberikan oleh program MATLAB itu sendiri dan nilainya akan selalu berubah-ubah proses pembelajaran dilakukan kembali.

Meskipun menggunakan parameter-parameter seperti yang telah disebutkan sebelumnya, namun proses pembelajaran ini tidak berhasil mencapai target error yang diinginkan pada epoch maksimum. Oleh karena itu kemudian maksimum epochnya diperbesar menjadi 50000. Akan tetapi dengan maksimum epoch sebesar 50000, ternyata target error belum juga terpenuhi. Akhirnya, karena epoch/iterasi yang dibutuhkan untuk mencapai target terlalu besar (>50000) maka algoritma pembelajaran *backpropagation*-nya diubah menjadi jenis *levenberg-marquardt*.

Metode pembelajaran *levenberg-marquardt* ini jauh lebih cepat prosesnya dibandingkan dengan metode *gradient descent* dengan momentum. Metode *levenberg-marquardt* merupakan metode yang dibuat untuk meminimalisasi error

dari fungsi kinerja *sum of square*. Metode ini juga dirancang dengan menggunakan pendekatan turunan kedua tanpa harus menghitung matriks Hessian atau dengan kata lain matriks Hessian-nya dapat didekati sebagai :

$$H = J^* J \quad (3.2)$$

dan gradient bobot dapat dihitung sebagai :

$$gW = J^* e \quad (3.3)$$

dimana J adalah matriks Jacobian yang berisi turunan pertama dari error jaringan terhadap, dan e adalah suatu vektor yang berisi error jaringan. Matriks Jacobian dapat dihitung dengan teknik *backpropagation* standar, yang mana lebih sederhana disbanding dengan menghitung matriks Hessian.

Sementara perhitungan bobotnya dilakukan dengan persamaan yang merupakan hasil modifikasi atau perbaikan dari metode Newton. Persamaan perhitungan bobotnya itu sendiri adalah :

$$w_{k+1} = w_k - [J^* J + \mu^* I]^{-1} * J^* e \quad (3.4)$$

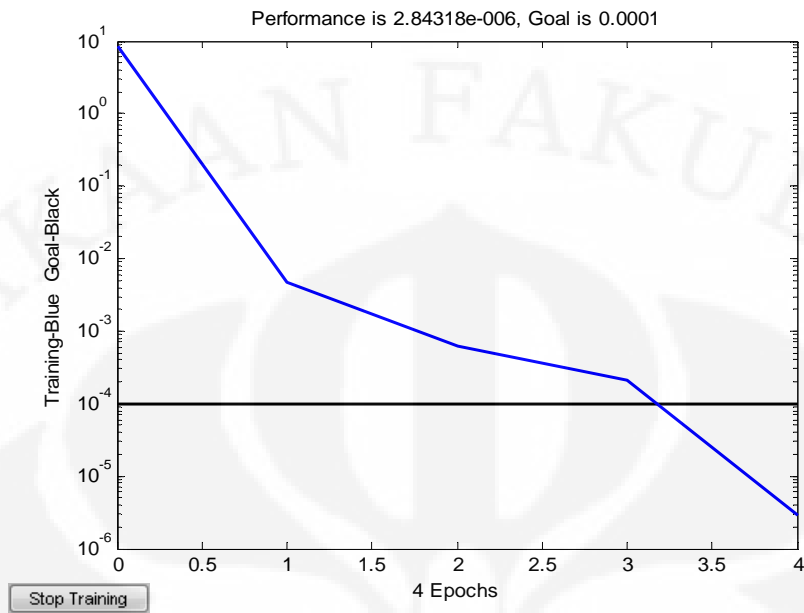
dengan  $w_{k+1}$  adalah nilai bobot baru dan  $w_k$  adalah nilai bobot awal sedangkan  $\mu$  adalah parameter yang menentukan *step size*. Demikianlah pembahasan sedikit mengenai teori *levenberg-marquardt*.

Adapun parameter-parameter yang digunakan dalam metode ini adalah :

- Maksimum epoch/iterasi = 100
- Target error yang diinginkan = 0,0001
- *Learning rate* = 0,3

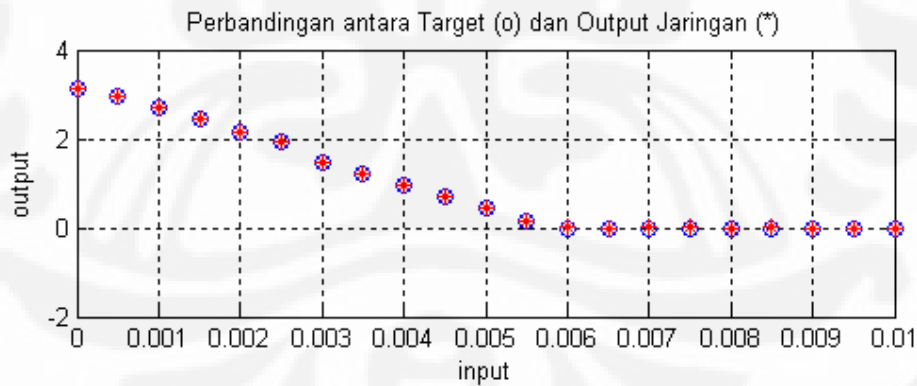
Oleh karena metode ini mempunyai proses pembelajaran yang lebih cepat maka maksimum epochnya ditetapkan hanya sebesar 100. Dan ternyata hal itu terbukti dimana ketika menggunakan metode *levenberg-marquardt*, target error yang diinginkan sebesar 0,0001 dapat tercapai dengan hanya membutuhkan 4 epoch pada JST untuk resistor dan 3 epoch pada JST untuk reaktor.

Berikut ini adalah contoh grafik proses pembelajaran untuk JST resistor :



Gambar 3.13 Grafik proses pembelajaran JST

Grafik menunjukkan bahwa saat epoch ke-4, maka JST tersebut akan memberikan output yang sesuai dengan pasangan inputnya dengan batas error sebesar 0,0001. Tercapainya target pasangan input dan output tersebut juga diperlihatkan oleh gambar dibawah ini :



Gambar 3.14 Grafik hubungan antara target dan output jaringan

Melalui gambar terlihat bahwa nilai output dari JST dan nilai target output yang diberikan saling berhimpit satu sama lain pada setiap variasi input, yang artinya bahwa nilai bobot-bobot dan bias yang dihasilkan dari proses pembelajaran ini telah dapat menghasilkan hubungan pasangan input dan output seperti yang

diinginkan. Sedangkan apabila JST tersebut memperoleh input yang tidak berada dalam pasangan input dan output proses pembelajaran maka JST itu akan menyesuaikan outputnya berdasarkan hasil yang diperoleh dari proses pembelajaran.

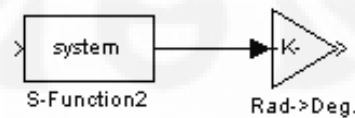
Untuk JST reaktor, grafik pembelajarannya tidak ditampilkan disini karena sebenarnya proses pembelajaran keduanya hampir sama, dimana yang membedakan hanyalah inputnya. Pada JST resistor, inputnya berupa simpangan kecepatan yang bernilai positif dan pada JST reaktor, inputnya adalah simpangan kecepatan yang bernilai negatif. Sedangkan besar output sudut penyalan tiristor dari kedua JST tersebut dibuat sama. Selain itu, pada proses pembelajaran JST tersebut output sudut penyalannya tidak dibuat dalam bentuk derajat melainkan dalam bentuk radian. Hal ini dikarenakan apabila output sudut penyalan dibuat dalam bentuk derajat maka proses pembelajarannya tidak pernah mencapai target yang diinginkan meskipun metode pembelajarannya telah diubah ke dalam metode *levenberg-marquardt*. Kondisi ini dapat terjadi karena rentang inputnya yang berada pada nilai 0-0,01, terlampau jauh untuk mencapai rentang output yang berkisar pada nilai  $180^{\circ}$ - $0^{\circ}$ . Oleh karena itulah perlu diubah ke dalam bentuk radian yang mempunyai rentang relatif tidak terlalu jauh dengan rentang inputnya. Berikut ini adalah pasangan input dan output yang digunakan dalam proses pembelajaran JST untuk resistor dan reaktor :

Tabel 3.2 Pasangan input & output untuk JST resistor & reaktor

Input Deviasi Kec. Rotor (Resistor)	Input Deviasi Kec. Rotor (Resistor)	Output Sudut Penyalaan ( $\alpha$ ) Tiristor
0	0	$\pi$
0,005	-0,005	$0,94 \cdot \pi$
0,001	-0,001	$0,86 \cdot \pi$
0,0015	-0,0015	$0,78 \cdot \pi$
0,002	-0,002	$0,69 \cdot \pi$
0,0025	-0,0025	$0,61 \cdot \pi$
0,003	-0,003	$0,47 \cdot \pi$
0,0035	-0,0035	$0,39 \cdot \pi$
0,004	-0,004	$0,3 \cdot \pi$
0,0045	-0,0045	$0,22 \cdot \pi$
0,005	-0,005	$0,14 \cdot \pi$
0,0055	-0,0055	$0,05 \cdot \pi$
0,006	-0,006	0
0,0065	-0,0065	0
0,007	-0,007	0
0,0075	-0,0075	0
0,008	-0,008	0
0,0085	-0,0085	0
0,009	-0,009	0
0,0095	-0,0095	0
0,01	-0,01	0

### 3.2.3 Penggabungan dengan Simulink

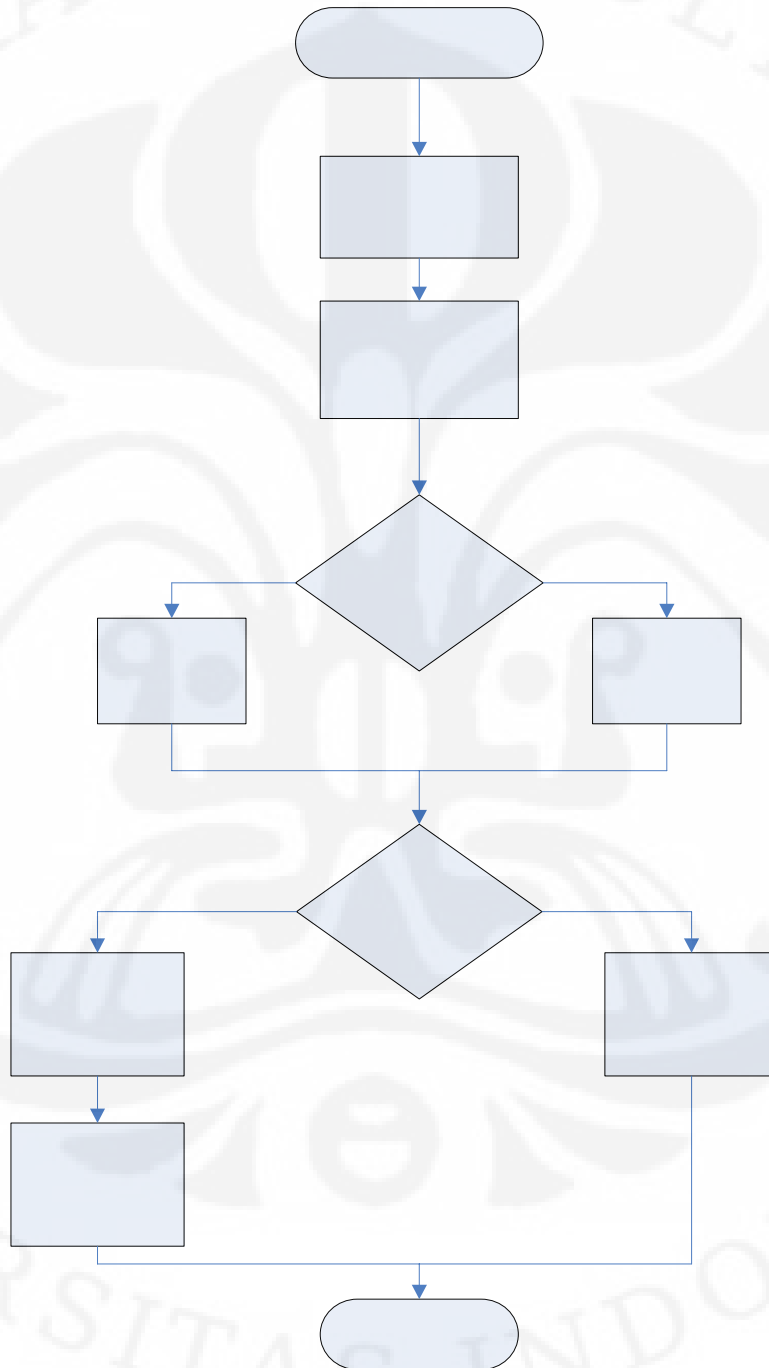
Setelah proses pembelajaran JST berhasil mencapai target maka selanjutnya bobot-bobot dan bias yang dihasilkan dari proses pembelajaran harus dibentuk menjadi suatu pengendali dengan cara ditulis dengan bahasa pemrograman C dalam bentuk *C-Mex S-Function* sehingga dapat dijalankan dalam simulink [6]. *C-Mex S-Function* ini dimasukkan ke dalam rangkaian simulasi simulink dengan bantuan komponen blok *S-Function*. Berikut ini adalah model komponennya :



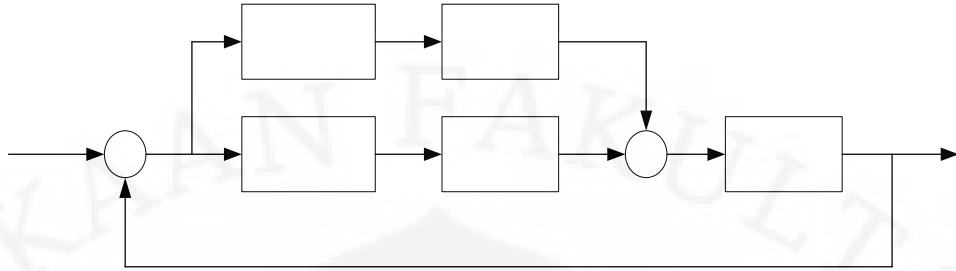
Gambar 3.15 Model blok *S-Function*

Pada bagian depan blok *S-Function* juga ditambahkan komponen konverter yang berfungsi untuk mengubah output pengendali dari bentuk radian ke dalam bentuk derajat, yang nantinya akan digunakan sebagai input pada blok tiristor.

Untuk dapat lebih memahami urutan dari rangkaian simulasi ini, maka dengan ini dilampirkan diagram alir dan diagram blok dari simulasi penerapan pengendali JST *braking resistor-reactor* pada stabilitas peralihan sistem tenaga listrik :



Gambar 3.16 Diagram alir penerapan pengendali JST *braking resistor-reactor* pada stabilitas peralihan sistem tenaga listrik



Gambar 3.17 Diagram blok penerapan pengendali JST *braking resistor-reactor* pada stabilitas peralihan sistem tenaga listrik

$\omega_0$



## **BAB IV**

### **ANALISIS HASIL SIMULASI**

#### **4.1 PROSES SIMULASI DAN STUDI KASUS**

Proses simulasi dilakukan dengan cara memvariasikan jenis dan durasi gangguan yang terjadi dalam sistem tenaga listrik. Melalui simulasi tersebut, akan dilakukan pengamatan terhadap respon dan kondisi sistem pada saat terkena gangguan dengan cara membandingkan antara hasil simulasi dengan menggunakan pengendali *braking resistor-reactor* dengan hasil simulasi ketika tidak menggunakan metode perbaikan apapun.

Sebagaimana yang telah disebutkan sebelumnya, dengan adanya proses inisialisasi mesin dan aliran daya maka pada saat simulasi mulai dijalankan, sistem telah berada pada kondisi *steady-state*. Dengan demikian, gangguan dapat diberikan ke dalam sistem dengan cepat pada detik-detik awal, tanpa harus menunggu sistem menyesuaikan diri dahulu dengan kondisi beban-beban dan jaringan jala-jala yang terhubung dengan sistem. Dalam simulasi ini, terdapat 3 jenis gangguan yang diberikan pada sistem, yaitu :

1. Gangguan 1 fasa ke tanah
2. Gangguan 2 fasa ke tanah
3. Gangguan 3 fasa ke tanah

Selama periode simulasi, ketiga jenis gangguan diberikan secara bergantian pada detik ke 0,05 dari periode simulasi. Periode simulasinya itu sendiri adalah selama 8s. Sementara lamanya durasi gangguan ditentukan oleh CB, dimana pada saat kedua CB (CB3 & CB4) pada saluran 2 "open" atau memutus saluran, maka ketika itulah gangguan selesai.

Adapun pada simulasi ini, mulai dari gangguan selesai atau CB3&CB4 "open" hingga kestabilan sistem tercapai, saluran 2 juga diatur untuk tetap berada dalam keadaan terputus/terisolasi. Hal ini dilakukan karena apabila saat proses pengendalian kestabilan berlangsung lalu secara tiba-tiba kedua CB pada saluran 2 ini tertutup dan saluran kedua terhubung kembali, maka kestabilan sistem tidak akan tercapai. Kondisi tersebut dapat terjadi karena tertutupnya CB

menyebabkan timbulnya *transient* dalam sistem. Selain itu, terhubungnya kembali saluran 2 dapat diibaratkan sebagai penambahan beban secara tiba-tiba ke dalam sistem. Akibatnya, sistem tenaga listrik yang tadinya sedang berangsur-angsur kembali menuju ke kondisi stabilnya dengan bantuan pengendali *braking resistor-reactor*, maka akan kembali menjadi tidak stabil.

Berdasarkan ketiga jenis gangguan tersebut maka dilakukanlah 2 buah studi kasus dengan mengacu pada 2 jenis durasi gangguan yang berbeda. Kedua jenis durasi gangguan tersebut adalah :

1. Saat durasi gangguan lebih kecil dari waktu pemutusan kritis (0,2s)
2. Saat durasi gangguan lebih besar dari waktu pemutusan kritis (0,33s)

Waktu pemutusan kritisnya itu sendiri adalah sebesar 0,32 s. Waktu pemutusan kritis yang dijadikan acuan ini adalah waktu pemutusan kritis untuk gangguan 3 fasa ke tanah. Hal ini dikarenakan dari ketiga jenis gangguan yang diberikan, gangguan 3 fasa ke tanahlah yang memiliki waktu pemutusan kritis paling cepat. Nilai tersebut diperoleh melalui pengujian pada rangkaian simulasinya dengan menggunakan metode *trial-and-error*.

Sementara itu, untuk menganalisis kedua kasus tersebut, hasil simulasi yang digunakan adalah :

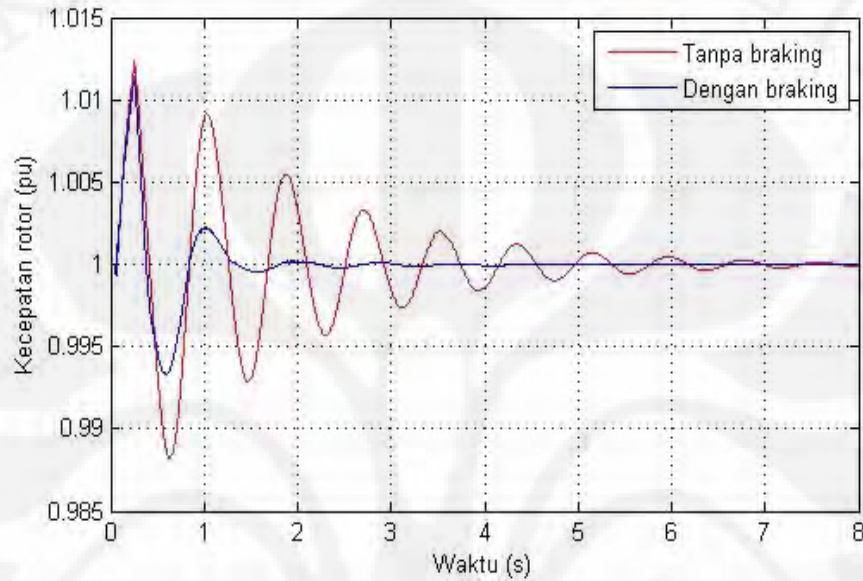
- Grafik kecepatan rotor terhadap waktu
- Grafik daya elektris terhadap waktu

Tujuan dari pemberian gangguan dengan 2 buah durasi yang berbeda tersebut adalah untuk membuktikan bahwa dengan memberikan pengendali JST pada *braking resistor-reactor* ini maka waktu pemutusan kritis dari sistem menjadi lebih besar dibandingkan dengan saat tidak menggunakan metode perbaikan.

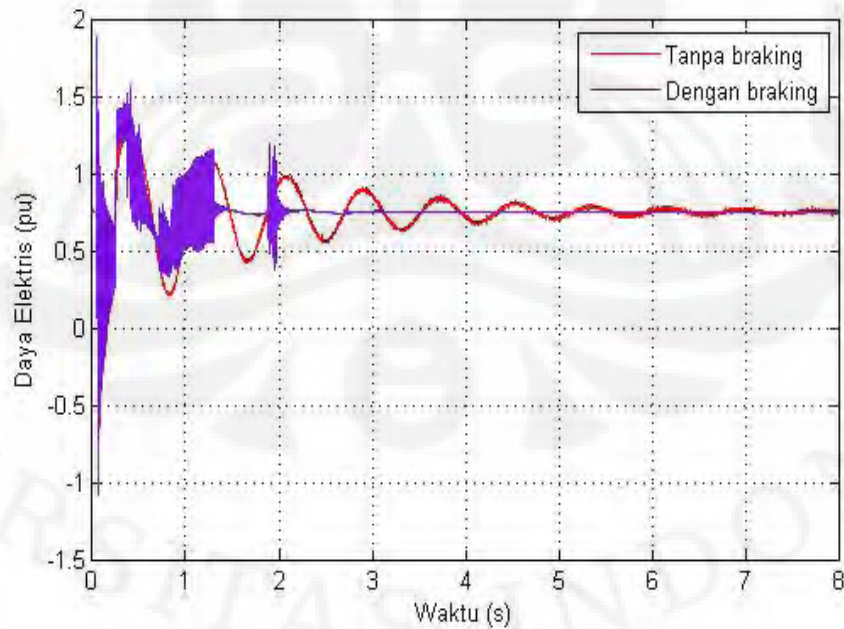
#### 4.1.1 Kasus 1 : Durasi Gangguan < Waktu Pemutusan Kritis (0,2s)

##### 4.1.1.1 Gangguan 3 Fasa Ke Tanah 0,2s

Berdasarkan simulasi gangguan 3 fasa ke tanah dengan durasi 0,2s, diperoleh grafik-grafik hasil simulasi seperti gambar dibawah ini :



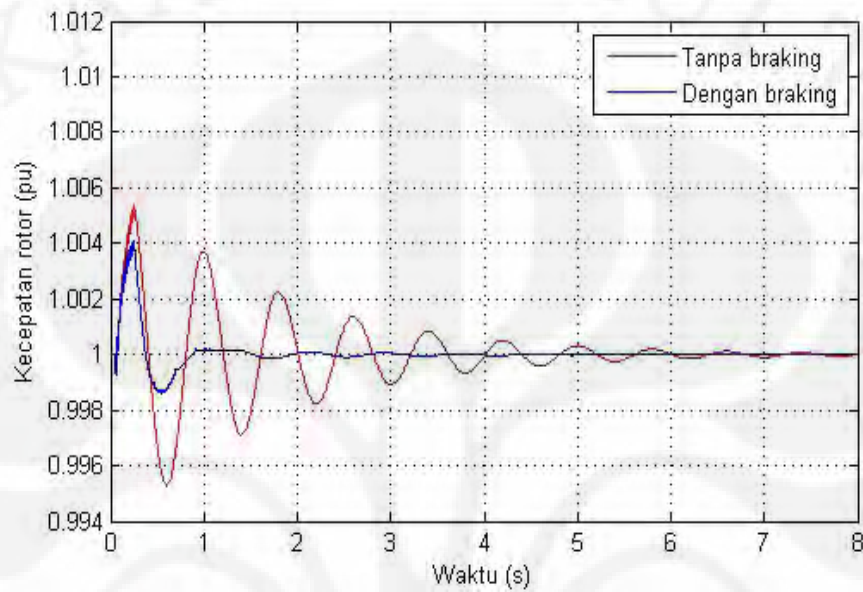
Gambar 4.1 Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 3 fasa ke tanah 0,2s



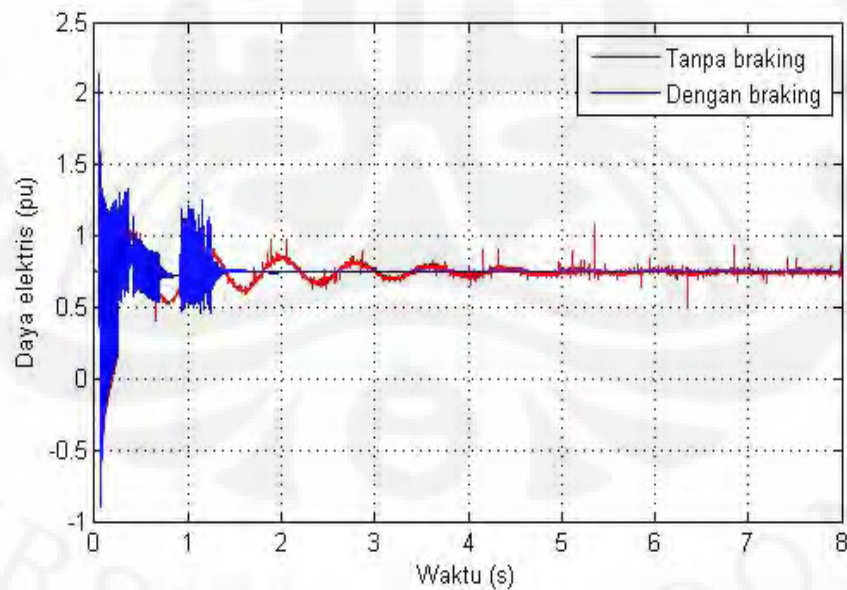
Gambar 4.2 Grafik daya listrik untuk gangguan 3 fasa ke tanah 0,2s

#### 4.1.1.2 Gangguan 2 Fasa Ke Tanah 0,2s

Berdasarkan simulasi gangguan 2 fasa ke tanah dengan durasi 0,2s, diperoleh grafik-grafik hasil simulasi seperti gambar dibawah ini :



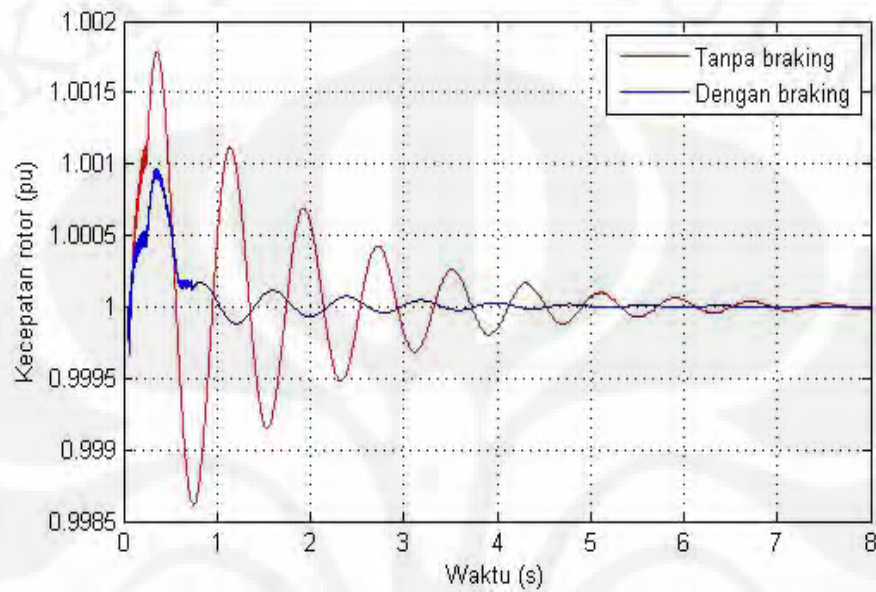
Gambar 4.3 Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,2s



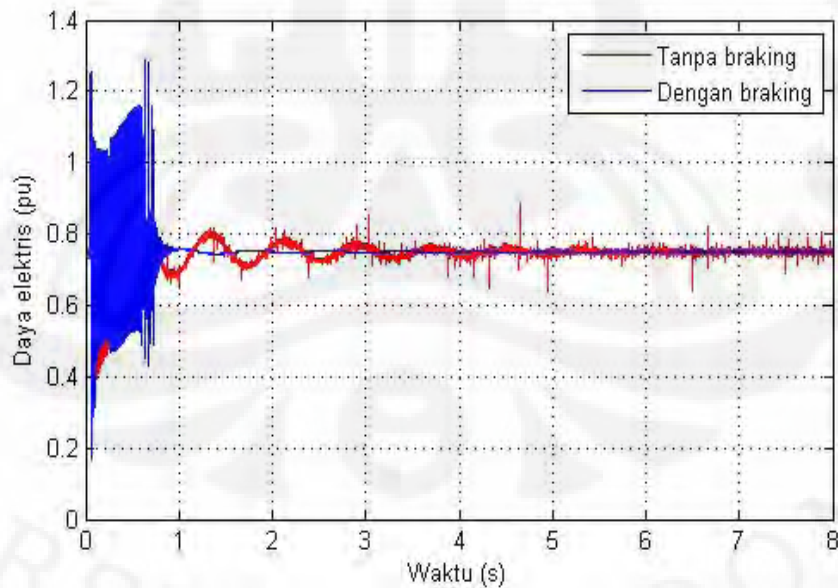
Gambar 4.4 Grafik daya listrik untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,2s

#### 4.1.1.3 Gangguan 1 Fasa Ke Tanah 0,2s

Berdasarkan simulasi gangguan 1 fasa ke tanah dengan durasi 0,2s, diperoleh grafik-grafik hasil simulasi seperti gambar dibawah ini :



Gambar 4.5 Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 1 fasa ke tanah 0,2s

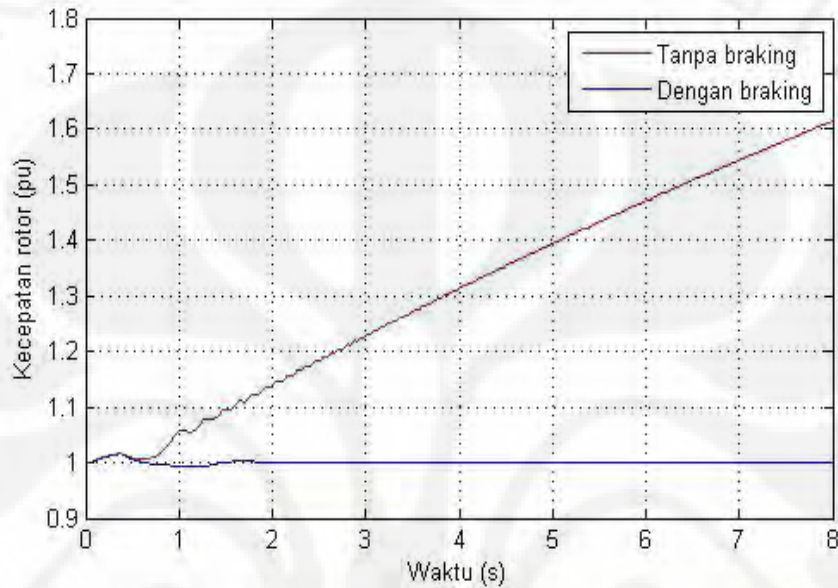


Gambar 4.6 Grafik daya listrik untuk gangguan 1 fasa ke tanah 0,2s

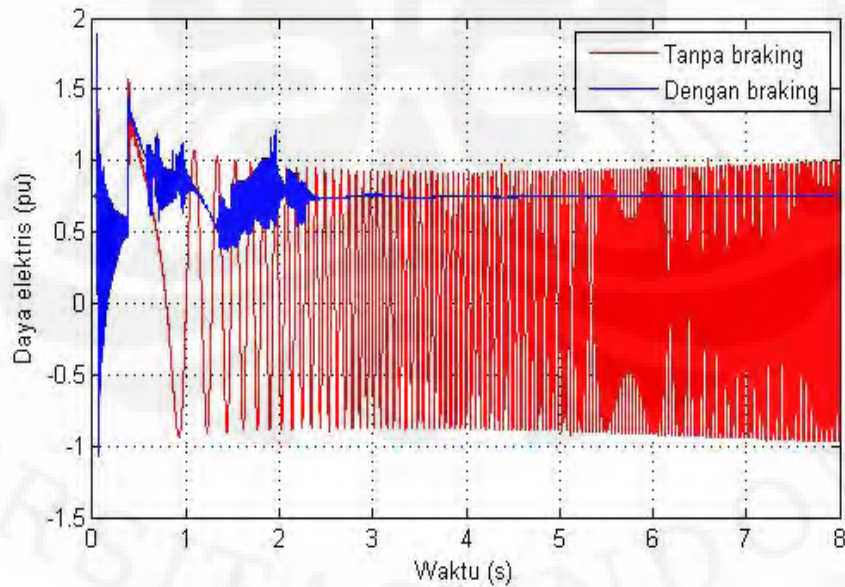
#### 4.1.2 Kasus 2 : Durasi Gangguan > Waktu Pemutusan Kritis (0,33s)

##### 4.1.2.1 Gangguan 3 Fasa Ke Tanah 0,33s

Berdasarkan simulasi gangguan 3 fasa ke tanah dengan durasi 0,33s, diperoleh grafik-grafik hasil simulasi seperti gambar dibawah ini :



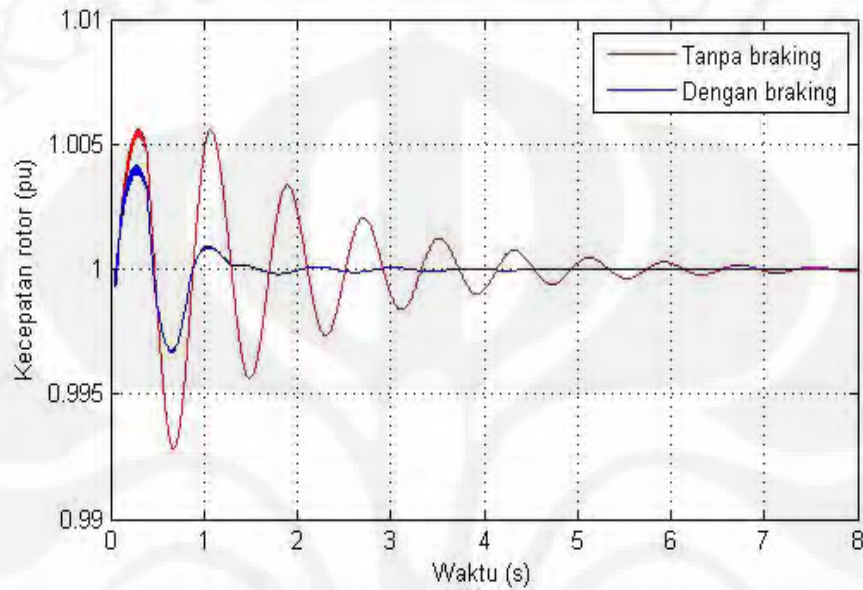
Gambar 4.7 Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 3 fasa ke tanah 0,33s



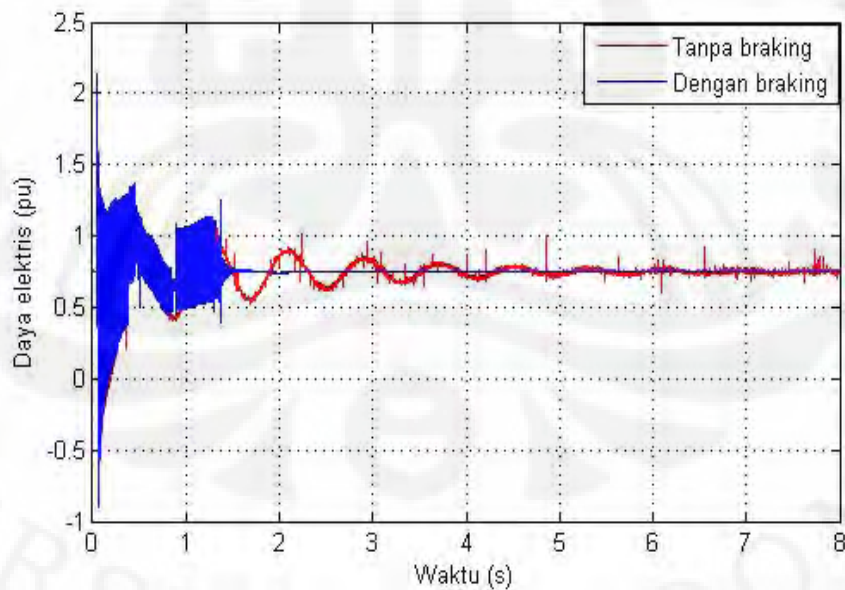
Gambar 4.8 Grafik daya listrik untuk gangguan 3 fasa ke tanah 0,33s

#### 4.1.2.2 Gangguan 2 Fasa Ke Tanah 0,33s

Berdasarkan simulasi gangguan 2 fasa ke tanah dengan durasi 0,33s, diperoleh grafik-grafik hasil simulasi seperti gambar dibawah ini :



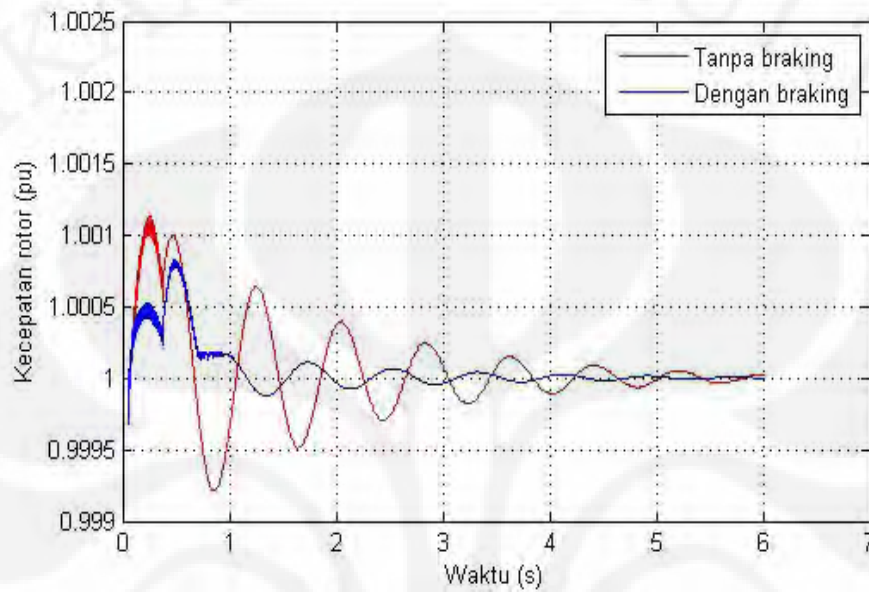
Gambar 4.9 Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,33s



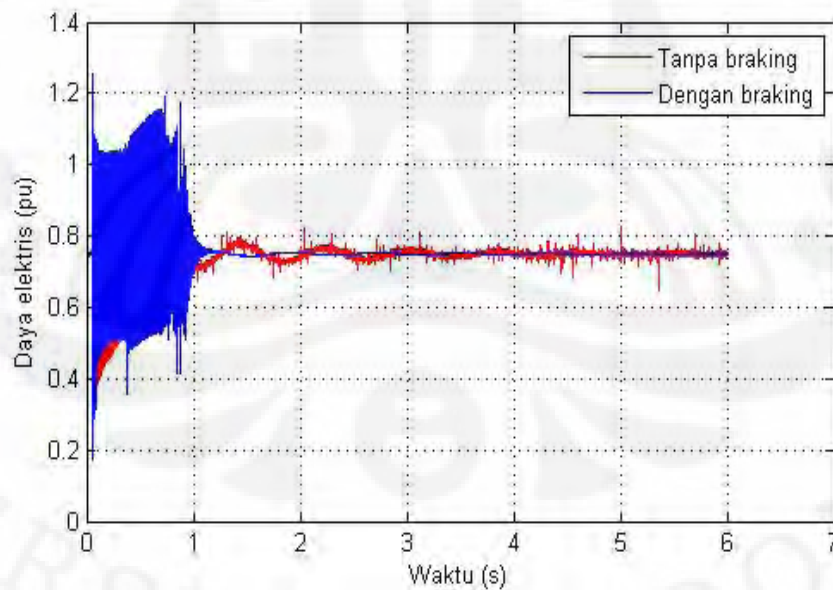
Gambar 4.10 Grafik daya listrik untuk gangguan 2 fasa ke tanah 0,33s

#### 4.1.2.3 Gangguan 1 Fasa Ke Tanah 0,33s

Berdasarkan simulasi gangguan 1 fasa ke tanah dengan durasi 0,2s, diperoleh grafik-grafik hasil simulasi seperti gambar dibawah ini :



Gambar 4.11 Grafik kecepatan rotor untuk gangguan 1 fasa ke tanah 0,33s



Gambar 4.12 Grafik daya listrik untuk gangguan 1 fasa ke tanah 0,33s



## 4.2 ANALISIS

### 4.2.1 Analisa Kasus

Sebelum membahas mengenai analisis terhadap proses simulasi yang telah dilakukan, perlu diberitahukan bahwa perubahan besaran-besaran listrik yang disebabkan oleh terjadinya gangguan juga tidak dibahas dalam skripsi ini. Selain itu, sistem proteksi juga tidak diikutsertakan dalam perancangan simulasi sistem tenaga listrik ini. Tujuan dari tidak diikutsertakannya sistem proteksi ini adalah agar karakteristik dari sistem pada saat terkena gangguan dengan durasi yang cukup lama dapat diamati. Dengan demikian dapat diketahui apakah saat terkena gangguan yang cukup lama tersebut sistem tetap stabil atau tidak.

#### 4.2.1.1 Analisis Gangguan 3 Fasa Ke Tanah

Sebagaimana telah diberitahukan sebelumnya bahwa setelah dilakukan simulasi tanpa menggunakan pengendali JST *braking resistor-reactor*, diperoleh waktu pemutusan kritis untuk gangguan 3 fasa ke tanah adalah sebesar 0,32s. Itu artinya ketika sistem terkena gangguan 3 fasa ke tanah selama 0,32s maka generator akan lepas sinkron. Jika kondisi terus dibiarkan dan tidak segera diatasi maka generator dapat mengalami kerusakan. Oleh karena itu, generator harus diputus dari sistem atau dengan kata lain pada kondisi sistem tenaga listrik yang sebenarnya, sistem proteksilah yang akan bekerja dengan cara memutuskan generator.

Namun, kondisi tersebut tidak berlaku ketika pada sistem tenaga listrik ditambahkan dengan pengendali JST *braking-resistor*, dimana sistem tetap berada dalam keadaan stabil meskipun sistem telah terkena gangguan 3 fasa ke tanah selama 0,32s. Bahkan, ketika durasi gangguan telah diperbesar menjadi 0,33s pun sistem tetap dapat menjaga kestabilannya.

Meskipun waktu pemutusan kritis dari sistem bertambah lama dengan ditambahkan pengendali JST *braking resistor-reactor* ke sistem, namun kondisi tersebut juga tidak berlangsung selamanya. Ketika durasi gangguan diperbesar lagi menjadi 0,34s, sistem dengan pengendali JST *braking resistor-reactor* akhirnya kehilangan kestabilannya atau dengan kata lain waktu pemutusan kritisnya dari sistem adalah sebesar 0,34s. Akan tetapi, hal ini juga menunjukkan

bahwa dengan ditambahkan pengendali JST *braking-resistor-reactor* maka sistem menjadi memiliki redaman yang semakin besar sehingga waktu pemutusan kritis sistem bertambah dari 0,32s menjadi 0,34s. Selain itu, melalui hasil simulasi juga dibuktikan bahwa pengendali JST *braking-resistor-reactor* berfungsi untuk mempercepat sistem dalam mencapai kestabilannya.

#### 4.2.1.2 Analisis Gangguan 2 Fasa Ke Tanah

Berbeda dengan gangguan 3 fasa ke tanah, gangguan 2 fasa ke tanah merupakan salah satu jenis gangguan asimetris. Oleh karena itu pada sistem tanpa pengendali JST *braking resistor-reactor*, apabila sistem terkena gangguan ini, sistem masih dapat kembali ke kondisi stabilnya meskipun gangguan yang terjadi telah berlangsung cukup lama. Hal itu dapat dilihat pada hasil simulasi, yaitu ketika diberikan gangguan 2 fasa ke tanah selama 0,33s, sistem tidak kehilangan kestabilannya padahal kondisi tersebut tidak berlaku pada kasus gangguan 3 fasa ke tanah. Namun, sama halnya dengan kasus gangguan 3 fasa ke tanah, kasus gangguan 2 fasa ke tanah ini juga memiliki waktu pemutusan kritisnya, yaitu sebesar 2,15s.

Dengan menambahkan pengendali JST *braking resistor-reactor* maka kestabilan sistem lebih cepat tercapai dan waktu pemutusan kritisnya pun juga menjadi semakin besar, yaitu menjadi sebesar 2,25s.

#### 4.2.1.3 Analisis Gangguan 1 Fasa Ke Tanah

Gangguan 1 fasa ke tanah merupakan jenis gangguan yang mempunyai dampak sangat kecil terhadap ketidakstabilan. Dan sama halnya dengan gangguan 2 fasa ke tanah, gangguan ini juga termasuk gangguan asimetris.

Pada kasus gangguan 1 fasa ke tanah ini, waktu pemutusan kritis dari sistem tidak dapat ditentukan padahal dalam sistem belum ditambahkan pengendali JST *braking resistor-reactor*. Kondisi ini dapat terjadi karena meskipun durasi gangguan telah diperbesar hingga mencapai 6s, sistem tetap tidak kehilangan kestabilannya.

Oleh karena itulah maka pada kasus gangguan 1 fasa ke tanah ini, penambahan pengendali JST *braking resistor-reactor* tidak berfungsi untuk

memperbesar waktu pemutusan kritis dari sistem melainkan hanya mempercepat tercapainya kestabilan sistem.

#### 4.2.2 Analisis Grafik

Dalam proses simulasi yang telah dilakukan ini, dihasilkan beberapa output grafik yang menjelaskan karakteristik kestabilan dari sistem. Berdasarkan grafik-grafik tersebut ada beberapa hal yang dapat dianalisis, yaitu :

##### 4.2.2.1 Grafik Kecepatan Rotor

Pada grafik ini, dijelaskan mengenai kecepatan rotor terhadap waktu yang dialami oleh generator pada saat terkena gangguan dan saat berada dalam kondisi peralihan untuk kembali ke keadaan stabilnya. Nilai dari kecepatan rotor generator ini dinyatakan dalam sistem per unit (pu).

Melalui grafik dapat dilihat bahwa ketika sistem terkena gangguan maka kecepatan rotor akan meningkat akibat adanya kelebihan daya masukan mekanis yang tidak terkonversi menjadi daya listrik. Apabila gangguan yang terjadi tersebut masih dapat ditangani oleh sistem maka kecepatan rotornya akan beresilasi mengalami percepatan dan perlambatan hingga sistem mencapai kestabilannya. Namun, jika gangguan tersebut terlalu besar dan lama maka sistem menjadi tidak dapat menanganinya sehingga kecepatan rotor dari generator menjadi meningkat terus tanpa terkendali dan akibatnya sistem menjadi tidak stabil, contohnya adalah pada kasus gangguan 3 fasa ke tanah (0,33s) atau seperti yang diperlihatkan oleh gambar 4.7.

Sementara dalam grafik juga dapat dilihat, adanya tambahan pengendali *JST braking resistor-reactor* membuat waktu yang dibutuhkan oleh sistem untuk mencapai kestabilan menjadi jauh lebih cepat, dimana sistem dapat kembali stabil rata-rata pada detik ke-5 dari periode simulasi. Sedangkan pada sistem tanpa pengendali *JST braking resistor-reactor*, rata-rata pada detik ke-8 pun sistem belum mencapai kestabilan.

#### 4.2.2.2 Grafik Daya Listrik

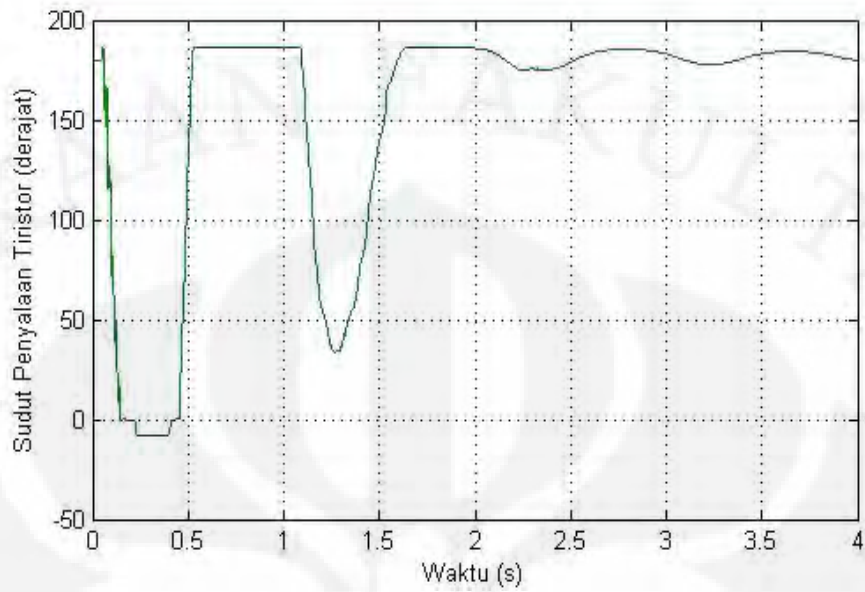
Grafik ini menjelaskan kondisi daya yang dihasilkan generator, dalam hal ini daya listrik, ketika sistem terkena gangguan. Berdasarkan grafik terlihat bahwa ketika sistem terkena gangguan, daya listrik akan beresilasi meningkat dan menurun secara drastis dengan sangat cepat akibat adanya percepatan dan perlambatan yang dialami oleh rotor. Kondisi yang terjadi pada rotor ini juga berkaitan dengan osilasi yang dialami sudut daya sehingga daya listrik yang disuplai oleh generator juga menjadi berubah-ubah nilainya sesuai dengan persamaan sudut daya.

Pada grafik untuk sistem dengan pengendali JST *braking resistor-reactor* juga dapat diketahui bahwa daya listrik lebih cepat mencapai nilai stabilnya meskipun kecepatan rotor masih beresilasi. Selain itu, pada sistem dengan pengendali JST *braking resistor-reactor* dapat dilihat bahwa grafik daya listriknya lebih lama mengalami fluktuasi dibandingkan dengan sistem tanpa pengendali. Hal ini dikarenakan, selain disebabkan oleh pengaruh gangguan, pada sistem dengan pengendali JST *braking resistor-reactor* terjadi juga fenomena *transient* yang diakibatkan oleh pensaklaran yang dilakukan oleh resistor dan reaktor dalam rangka memperbaiki kestabilan sistem. Kondisi ini sebenarnya bukanlah masalah, karena efek *transient* tersebut tidak sampai mempengaruhi kestabilan sistem.

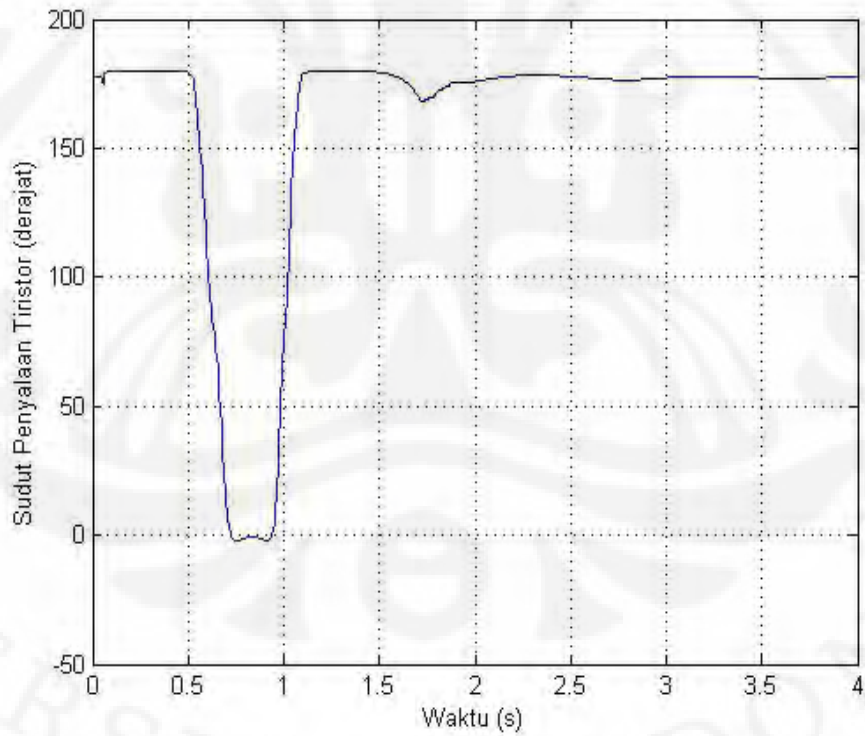
Selain itu, melalui grafik juga dapat dilihat bahwa pada sistem dengan pengendali JST *braking resistor-reactor*, daya listrik lebih cepat mencapai nilai stabilnya dibandingkan sistem tanpa pengendali JST *braking resistor-reactor*.

#### 4.2.2.3 Grafik Sudut Penyalaan Tiristor

Khusus untuk grafik sudut penyalaan tiristor, sengaja tidak ditampilkan dalam bagian studi kasus karena besar sudut penyalaan tiristor yang digunakan untuk berbagai jenis dan durasi gangguan adalah sama. Acuan yang digunakan untuk menentukan sudut penyalaan tiristor tersebut adalah dengan berdasarkan pada gangguan 3 fasa ke tanah. Berikut ini adalah sudut penyalaan tiristor resistor dan reaktor untuk gangguan 3 fasa ke tanah selama 0,3s :



Gambar 4.13 Grafik sudut penyalan untuk resistor



Gambar 4.14 Grafik sudut penyalan untuk reaktor

Melalui grafik-grafik diatas dapat dilihat bahwa saat sistem terkena gangguan, resistor langsung bekerja dengan berdasarkan pada sudut penyalan tiristornya, mulai dari  $180^\circ$  hingga mencapai nilai nol sesuai dengan besar penyimpangan kecepatan rotornya. Besar sudut penyalan tiristor tersebut berbanding terbalik dengan simpangan kecepatan rotornya sesuai dengan yang metode pembelajaran yang dilakukan pada JST yang digunakan, dimana ketika sudut penyalan semakin kecil maka resistor akan semakin besar menyerap daya mekanisnya dalam rangka mereduksi penyimpangan kecepatan rotor dan mengantisipasi besar gangguan yang terjadi pada sistem.

Hal yang sama juga terjadi pada reaktor, yang membedakan hanyalah reaktor bekerja saat simpangan kecepatan rotor bernilai negatif dalam rangka untuk menyerap daya listrik dengan cara mengurangi besar tegangan terminal generatornya.

Berdasarkan kedua grafik diatas juga terlihat bahwa pensaklaran kedua beban tidak hanya berlangsung sekali melainkan berulang kali hingga kestabilan sistem tercapai sepenuhnya.

#### **4.2.3 Analisis Secara Keseluruhan**

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada simulasi, baik itu melalui grafik ataupun studi kasus, dapat diketahui bahwa lamanya durasi gangguan berpengaruh terhadap karakteristik kestabilan sistem dimana semakin lama durasi gangguan maka semakin lama pula waktu yang diperlukan sistem untuk kembali stabil.

Sedangkan dari ketiga jenis gangguan yang diberikan pada sistem, diketahui bahwa gangguan 1 fasa ke tanah adalah jenis gangguan yang memberikan dampak ketidakstabilan paling kecil. Sebaliknya, gangguan 3 fasa ke tanah adalah gangguan yang memberikan dampak ketidakstabilan paling besar dibandingkan ketiganya.

Telah disebutkan sebelumnya bahwa meskipun sistem telah ditambahkan oleh pengendali JST *braking resistor-reactor*, sistem tetap memiliki keterbatasan dalam menangani gangguan yang terjadi. Hal ini ditunjukkan dengan adanya waktu pemutusan kritis dari sistem, meskipun sistem telah memiliki pengendali JST *braking resistor-reactor*. Faktor keterbatasan yang dimiliki oleh pengendali

JST *braking resistor-reactor* ini adalah suatu hal yang mutlak terjadi dan tidak dapat dihilangkan. Akan tetapi, faktor keterbatasan dari pengendali JST *braking resistor-reactor* ini sebenarnya masih dapat ditingkatkan dengan cara memperbesar nilai nominal dari beban *braking* yang digunakan sehingga batas kestabilan sistem juga dapat menjadi bertambah besar.

## BAB V

### KESIMPULAN

1. Penggunaan pengendali JST *braking resistor-reactor* dapat membuat proses pengembalian kestabilan sistem tenaga listrik menjadi lebih baik dan lebih cepat dimana untuk berbagai jenis gangguan, rata-rata sistem dapat kembali stabil pada detik ke-5 dari periode simulasi.
2. Waktu pemutusan kritis dari sistem menjadi semakin bertambah lama dengan ditambahkan pengendali JST *braking resistor-reactor* sehingga ketahanan sistem terhadap gangguan menjadi lebih baik.
3. Durasi gangguan mempengaruhi waktu yang dibutuhkan sistem untuk mencapai kestabilan dimana semakin lama gangguan terjadi maka semakin lama sistem mencapai kestabilan.
4. Gangguan 1 fasa ke tanah adalah gangguan yang memberikan dampak ketidakstabilan paling kecil, kemudian diikuti oleh gangguan 2 fasa ke tanah dan terakhir yang memberikan dampak ketidakstabilan terbesar adalah gangguan simetris 3 fasa ke tanah.



## DAFTAR ACUAN

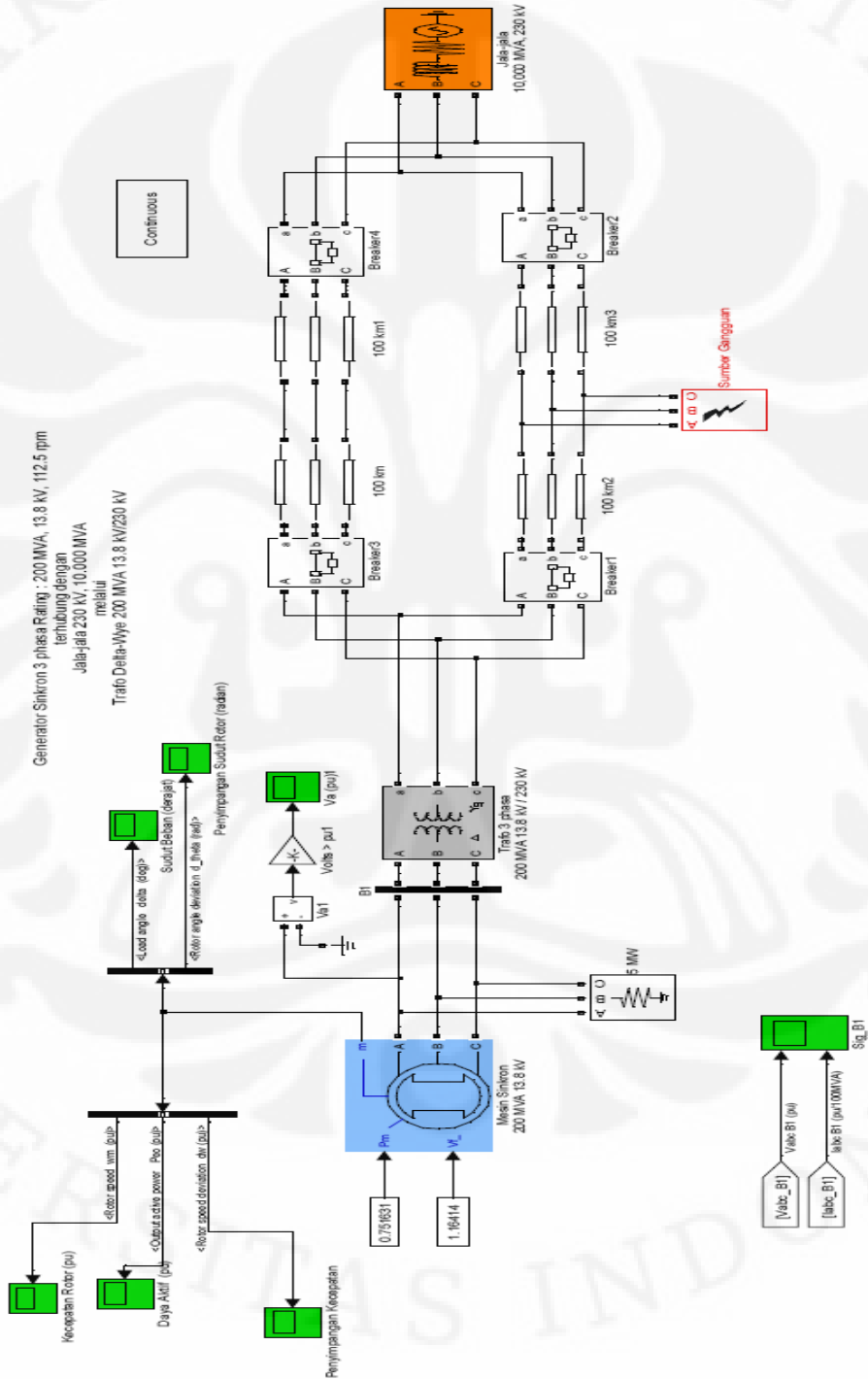
- [1] B.M Weedy, B.J Cory, *Electric Power System* 4<sup>th</sup> Edition (Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2001)
- [2] Williams D Stevenson Jr., *Elements Of Power System Analysis* Fourth Edition (Singapore : McGraw-Hill, 1982)
- [3] Sri Kusumadewi, *Membangun Jaringan Syaraf Tiruan Menggunakan MATLAB & EXCELINK* (Yogyakarta : Graha Ilmu, 2004)
- [4] Yuning C., M. E. El-Hawary, "An EAC Based Braking Resistor Approach for Transient Stability Improvement," *IEEE ISIE*, 2006 : 1869-1874
- [5] A.H.M.A. Rahim, D.A.H. Alamgir, "A Closed-Loop Quasi-Optimal Dynamic Braking Resistor and Shunt Reactor Control Strategy for Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(3), 1988 : 879-886
- [6] F. Yusivar, S. Wakao, "Minimum Requirement of Motor Vector Control Modeling and Simulation Utilizing C Mex S-Function in MATLAB/SIMULINK", *IEEE International Conference PEDS 01*, 2001 : 315-321
- [7] Aditya D. Pratomo, "Perbaikan Stabilitas Peralihan Generator Sinkron Dengan Braking Resistor", Skripsi Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, 2007

## DAFTAR PUSTAKA

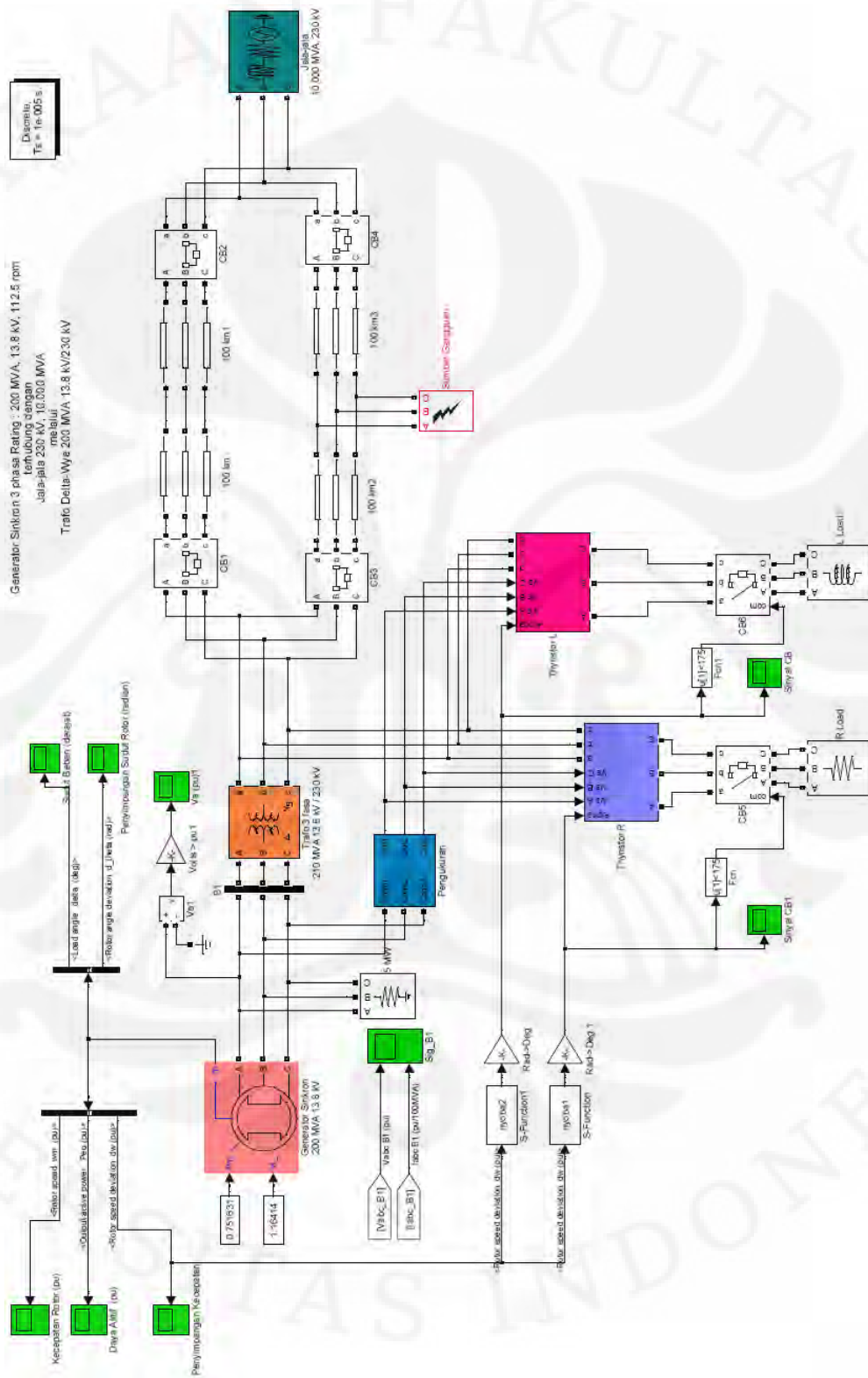
- A.H.M.A. Rahim Ph.D., A.I.J. Al-Sammak Ph.D., "Optimal Switching of Dynamic Braking Resistor, Reactor, or Capacitor for Transient Stability of Power Systems," *IEE Proceedings*, 138(1), 1991: 89-93
- A.H.M.A. Rahim, D.A.H. Alamgir, "A Closed-Loop Quasi-Optimal Dynamic Braking Resistor and Shunt Reactor Control Strategy for Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, 3(3), 1988 : 879-886
- Aditya D. Pratomo, "Perbaikan Stabilitas Peralihan Generator Sinkron Dengan Braking Resistor", Skripsi Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, 2007
- B.M Weedy, B.J Cory, *Electric Power System* 4<sup>th</sup> Edition (Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2001)
- F. Yusivar, S. Wakao, "Minimum Requirement of Motor Vector Control Modeling and Simulation Utilizing C Mex S-Function in MATLAB/SIMULINK", *IEEE International Conference PEDS 01*, 2001 : 315-321
- Kundur,P., *Power System Stability and Control* (California : McGraw-Hill,1993)
- Sri Kusumadewi, *Membangun Jaringan Syaraf Tiruan Menggunakan MATLAB & EXCELINK* (Yogyakarta : Graha Ilmu, 2004)
- Steven T. Karris, *Introduction to Simulink with Engineering Applications*. Orchard Publications. 2006
- TransÉnergie Technologies Inc., *SimPowerSystems User's Guide*. Under sublicense from Hydro-Québec, and The MathWorks, Inc. 2003
- Williams D Stevenson Jr., *Elements Of Power System Analysis* Fourth Edition (Singapore : McGraw-Hill, 1982)
- Yuning C., M. E. El-Hawary, "An EAC Based Braking Resistor Approach for Transient Stability Improvement," *IEEE ISIE*, 2006 : 1869-1874

# LAMPIRAN

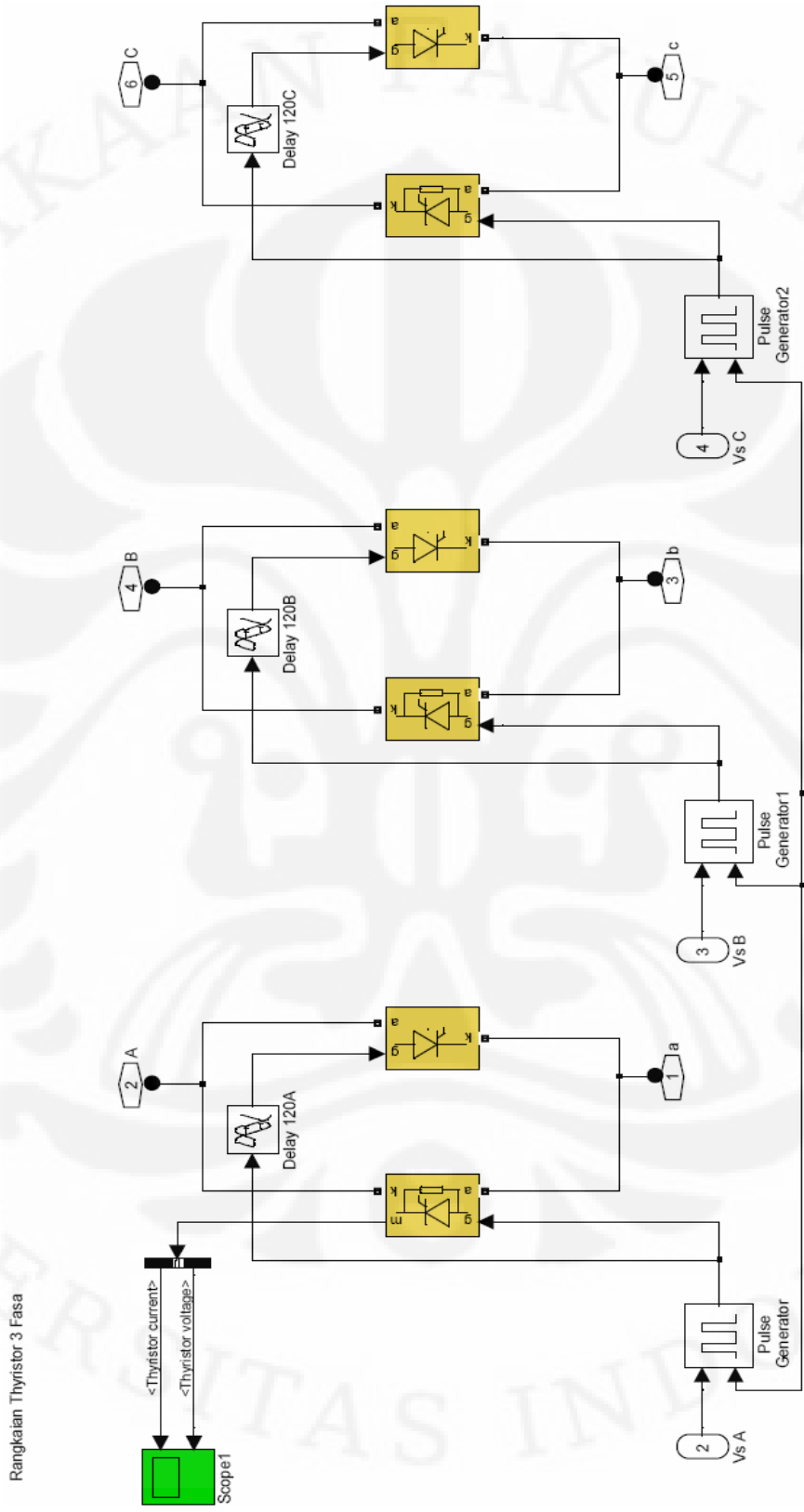
## Lampiran 1 Rangkaian Sistem Tanpa Pengendali JST *Braking Resistor-Reactor*



## Lampiran 2 Rangkaian Sistem Dengan Pengendali JST *Braking Resistor-Reactor*

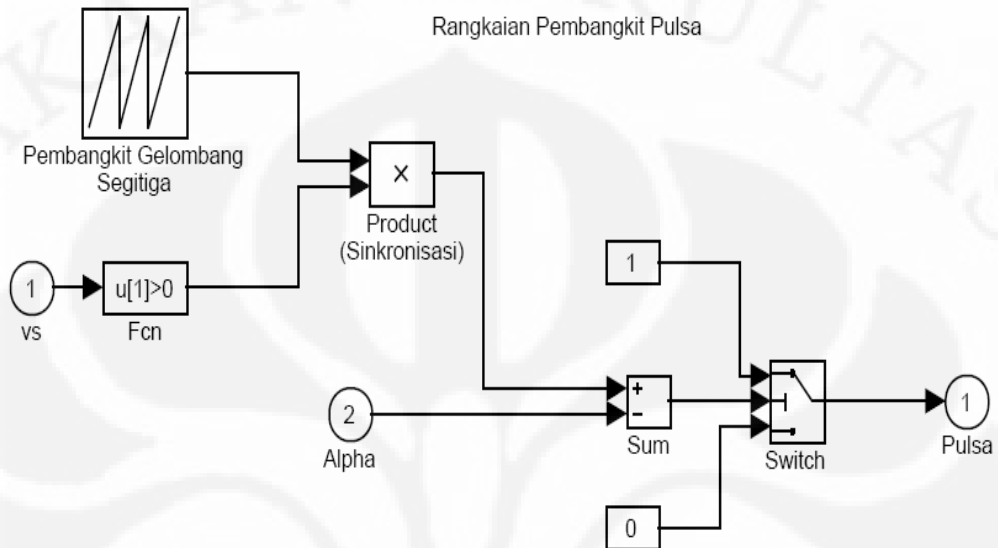


### Lampiran 3 Rangkaian Tiristor 3 Fasa



Rangkaian Thyristor 3 Fasa

#### Lampiran 4 Rangkaian *Pulse Generator*



## Lampiran 5 Listing Program m-file Untuk Pengendali Pada Resistor

```
clear;

%Pasangan input & output
I=[0 0.0005 0.001 0.0015 0.002 0.0025 0.003 0.0035 0.004 0.0045 0.005
 0.0055 0.006 0.0065 0.007 0.0075 0.008 0.0085 0.009 0.0095 0.01];
O=[pi 0.94*pi 0.86*pi 0.78*pi 0.69*pi 0.61*pi 0.47*pi 0.39*pi 0.3*pi
 0.22*pi 0.14*pi 0.05*pi 0 0 0 0 0 0 0 0];

%Membangun jaringan feedforward
net = newff(minmax(I),[12,1],{'tansig' 'purelin'}, 'trainlm');

%Melihat bobot - bobot awal input, lapisan, dan bias
BobotAwal_Input = net.IW{1,1}
BobotAwal_Bias_Input = net.b{1,1}
BobotAwal_Lapisan = net.LW{2,1}
BobotAwal_Bias_Lapisan = net.b{2,1}

%Set max epoh, goal, learning rate, momentum, dan show step
net.trainParam.epochs = 100;
net.trainParam.goal = 1e-4;
net.trainParam.lr = 0.03;
net.trainParam.mc = 0.5;
net.trainParam.show = 10;

%Melakukan Pembelajaran
net = train(net,I,O);

%Melihat bobot - bobot akhir input, lapisan, dan bias
BobotAkhir_Input = net.IW{1,1}
BobotAkhir_Bias_input = net.b{1,1}
BobotAkhir_Lapisan = net.LW{2,1}
BobotAkhir_Bias_Lapisan = net.b{2,1}

%Melakukan Simulasi
y = sim(net,I)

%Penggambaran grafik
subplot(211)
plot(I(1,:),O,'bo',I(1,:),y,'r*');
title('Perbandingan antara Target (o) dan Output Jaringan (*)');
xlabel('input');
ylabel('output');
grid;
```

## Lampiran 6 Listing Program m-file Untuk Pengendali Pada Reaktor

```
clear;

%Pasangan input & target
I=[0 -0.0005 -0.001 -0.0015 -0.002 -0.0025 -0.003 -0.0035 -0.004 -0.0045
  -0.005 -0.0055 -0.006 -0.0065 -0.007 -0.0075 -0.008 -0.0085 -0.009 -
  0.0095 -0.01];
O=[pi 0.94*pi 0.86*pi 0.78*pi 0.69*pi 0.61*pi 0.47*pi 0.39*pi 0.3*pi
  0.22*pi 0.14*pi 0.05*pi 0 0 0 0 0 0 0 0];

%Membangun jaringan feedforward
net = newff(minmax(I),[12,1],{'tansig' 'purelin'}, 'trainlm');

%Melihat bobot - bobot awal input, lapisan, dan bias
BobotAwal_Input      = net.IW{1,1}
BobotAwal_Bias_Input = net.b{1,1}
BobotAwal_Lapisan    = net.LW{2,1}
BobotAwal_Bias_Lapisan = net.b{2,1}

%Set max epoh, goal, learning rate, momentum, dan show step
net.trainParam.epochs = 100;
net.trainParam.goal   = 1e-4;
net.trainParam.lr     = 0.03;
net.trainParam.mc     = 0.5;
net.trainParam.show   = 10;

%Melakukan Pembelajaran
net = train(net,I,O);

%Melihat bobot - bobot akhir input, lapisan, dan bias
BobotAkhir_Input      = net.IW{1,1}
BobotAkhir_Bias_input = net.b{1,1}
BobotAkhir_Lapisan    = net.LW{2,1}
BobotAkhir_Bias_Lapisan = net.b{2,1}

%Melakukan Simulasi
y = sim(net,I)

%Penggabungan grafik
subplot(211)
plot(I(1,:),O,'bo',I(1,:),y,'r*');
title('Perbandingan antara Target (o) dan Output Jaringan (*)');
xlabel('input');
ylabel('output');
grid;
```



## Lampiran 7 Listing Program C-Mex Untuk Pengendali Pada Resistor

```
#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME nyobal
#include "simstruc.h"
#include <math.h>
#define U(element)(*uPtrs[element])

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
    ssSetInputPortWidth(S, 0, 1);
    ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);
    ssSetInputPortOverWritable(S, 0, 1);
    if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
    ssSetOutputPortWidth(S, 0, 1);
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE);
}

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}

static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
    real_T *Y = ssGetOutputPortRealSignal(S, 0);
    InputRealPtrsType
    uPtrs = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S, 0);
    real_T mu = 2;
    real_T
    h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, h8, h9, h10, h11, h12, z1, z2, z3, z4, z5, z
    6, z7, z8, z9, z10, z11, z12, a, p;
    //int_T k;

    p = U(0);

    h1 = (p*3360) + -34.3778;
    h2 = (p*3360) + -30.5889;
    h3 = (p*3360) + -27.4891;
    h4 = (p*-3360) + 24.4366;
    h5 = (p*-3360) + 21.3288;
    h6 = (p*-3360) + 18.1799;
    h7 = (p*3360) + -15.0316;
```

```

h8 =(p*-3360)+11.8535;
h9 =(p*3360)+-8.9783;
h10=(p*3360)+-6.2439;
h11=(p*-3360)+3.3301;
h12=(p*3360)+-0.2743;

z1 = (2/(1+exp(-mu*h1)))-1;
z2 = (2/(1+exp(-mu*h2)))-1;
z3 = (2/(1+exp(-mu*h3)))-1;
z4 = (2/(1+exp(-mu*h4)))-1;
z5 = (2/(1+exp(-mu*h5)))-1;
z6 = (2/(1+exp(-mu*h6)))-1;
z7 = (2/(1+exp(-mu*h7)))-1;
z8 = (2/(1+exp(-mu*h8)))-1;
z9 = (2/(1+exp(-mu*h9)))-1;
z10 = (2/(1+exp(-mu*h10)))-1;
z11 = (2/(1+exp(-mu*h11)))-1;
z12 = (2/(1+exp(-mu*h12)))-1;

a = ((z1*-0.0686)+(z2*-
0.0002)+(z3*0.0002)+(z4*0.0008)+(z5*-
0.0052)+(z6*0.2347)+(z7*-0.2468)+(z8*0.2344)+(z9*-
0.3214)+(z10*-0.2002)+(z11*0.2440)+(z12*-
0.1491))+1.5571;

Y[0] = a;
}

static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
#ifdef MATLAB_MEX_FILE
#include "simulink.c"
#else
#include "cg_sfun.h"
#endif
}

```

## Lampiran 8 Listing Program C-Mex Untuk Pengendali Pada Reaktor

```
#define S_FUNCTION_LEVEL 2
#define S_FUNCTION_NAME nyoba2
#include "simstruc.h"
#include <math.h>
#define U(element)(*uPtrs[element])

static void mdlInitializeSizes(SimStruct *S)
{
    if (!ssSetNumInputPorts(S, 1)) return;
    ssSetInputPortWidth(S, 0, 1);
    ssSetInputPortDirectFeedThrough(S, 0, 1);
    ssSetInputPortOverWritable(S, 0, 1);
    if (!ssSetNumOutputPorts(S, 1)) return;
    ssSetOutputPortWidth(S, 0, 1);
    ssSetNumSampleTimes(S, 1);
    ssSetOptions(S, SS_OPTION_EXCEPTION_FREE_CODE);
}

static void mdlInitializeSampleTimes(SimStruct *S)
{
    ssSetSampleTime(S, 0, CONTINUOUS_SAMPLE_TIME);
    ssSetOffsetTime(S, 0, 0.0);
}

static void mdlOutputs(SimStruct *S, int_T tid)
{
    real_T *Y = ssGetOutputPortRealSignal(S, 0);
    InputRealPtrsType
    uPtrs = ssGetInputPortRealSignalPtrs(S, 0);
    real_T mu = 2;
    real_T
    h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7, h8, h9, h10, h11, h12, z1, z2, z3, z4, z5, z
    6, z7, z8, z9, z10, z11, z12, a, p;
    //int_T k;

    p = U(0);

    h1 = (p*3360)+0.1196;
    h2 = (p*-3360)+-3.3217;
    h3 = (p*3360)+6.3575;
    h4 = (p*-3360)+-9.2542;
    h5 = (p*-3360)+-12.0077;
    h6 = (p*-3360)+-15.1085;
    h7 = (p*3360)+18.1957;
```

```

h8 =(p*3360)+21.0781;
h9 =(p*3360)+24.4146;
h10=(p*3360)+27.4881;
h11=(p*-3360)+-30.5383;
h12=(p*-3360)+-35.0298;

z1 = (2/(1+exp(-mu*h1)))-1;
z2 = (2/(1+exp(-mu*h2)))-1;
z3 = (2/(1+exp(-mu*h3)))-1;
z4 = (2/(1+exp(-mu*h4)))-1;
z5 = (2/(1+exp(-mu*h5)))-1;
z6 = (2/(1+exp(-mu*h6)))-1;
z7 = (2/(1+exp(-mu*h7)))-1;
z8 = (2/(1+exp(-mu*h8)))-1;
z9 = (2/(1+exp(-mu*h9)))-1;
z10 = (2/(1+exp(-mu*h10)))-1;
z11 = (2/(1+exp(-mu*h11)))-1;
z12 = (2/(1+exp(-mu*h12)))-1;

a = ((z1*0.1665)+(z2*-0.2428)+(z3*0.2319)+(z4*-
0.3080)+(z5*-0.2261)+(z6*-0.2429)+(z7*0.2303)+(z8*-
0.0054)+(z9*0.0005)+(z10*-0.0001)+(z11*-0.0001)+(z12*-
0.2317))+1.4116;

Y[0] = a;
}

static void mdlTerminate(SimStruct *S)
{
#ifdef MATLAB_MEX_FILE
#include "simulink.c"
#else
#include "cg_sfund.h"
#endif
}

```