

**PENGGUNAAN PENGENDALI LOGIKA *FUZZY* UNTUK
KOORDINASI PENSAKLARAN *BRAKING* RESISTOR,
REAKTOR DAN KAPASITOR PADA PERBAIKAN
STABILITAS PERALIHAN SISTEM TENAGA LISTRIK**

SKRIPSI

OLEH

DIAR FIRMAN

04 03 03 029 2



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

**PENGGUNAAN PENGENDALI LOGIKA *FUZZY*
UNTUK KOORDINASI PENSAKLARAN *BRAKING*
RESISTOR, REAKTOR DAN KAPASITOR PADA
PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN SISTEM
TENAGA LISTRIK**

SKRIPSI

OLEH

DIAR FIRMAN

04 03 03 029 2



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

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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

**PENGUNAAN PENGENDALI LOGIKA *FUZZY* UNTUK KOORDINASI
PENSAKLARAN *BRAKING* RESISTOR, REAKTOR DAN KAPASITOR
PADA PERBAIKAN 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 skripsi yang sudah diduplikasikan 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

(Diar Firman.)

0403030292

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul :

**PENGUNAAN PENGENDALI LOGIKA *FUZZY* UNTUK KOORDINASI
PENSAKLARAN *BRAKING* RESISTOR, REAKTOR DAN KAPASITOR
PADA PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN SISTEM TENAGA
LISTRIK**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen 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 TERIMA KASIH

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.

Diar Firman
NPM 04 03 03 029 2
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
DR. Ir. Rudy Setiabudy

**PENGUNAAN PENGENDALI LOGIKA *FUZZY* UNTUK KOORDINASI
PENSAKLARAN *BRAKING* RESISTOR, REAKTOR DAN KAPASITOR
PADA PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN SISTEM TENAGA
LISTRIK**

ABSTRAK

Terdapat berbagai macam metode untuk meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik. Salah satunya adalah dengan menggunakan metode pengereman dinamis (*dynamic braking*). Selain menggunakan *braking* resistor saja, sistem *braking* dapat juga melibatkan reaktor dan kapasitor untuk meningkatkan unjuk kerja pengereman. Setelah terjadi gangguan yang besar, setiap generator sinkron yang terhubung dengan sistem tenaga listrik mengalami perbedaan antara masukan daya mekanis dan keluaran daya elektris yang dapat membawa sistem menuju ketidakstabilan.

Skripsi ini membahas tentang penggunaan pengendali logika *fuzzy* untuk koordinasi pensaklaran *braking* resistor, reaktor, dan kapasitor pada perbaikan stabilitas peralihan sistem tenaga listrik.

Setelah terjadinya gangguan, variabel kecepatan rotor dari generator akan diukur dan sudut penyalaan untuk saklar *thyristor* ditentukan dari keluaran *crisp* pengendali logika *fuzzy*. Dengan mengendalikan sudut penyalaan untuk masing-masing komponen, koordinasi dari *braking* resistor, reaktor, dan kapasitor dapat mengendalikan daya percepatan dan perlambatan pada generator dan kemudian meningkatkan stabilitas peralihan.

Simulasi dilakukan dengan menggunakan gangguan tiga fasa ke tanah pada saluran transmisi paralel. Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengendalian dengan logika *fuzzy* untuk koordinasi pensaklaran *braking* resistor, reaktor dan kapasitor dapat memberikan metode yang sederhana dan efektif untuk meningkatkan kestabilan sistem tenaga listrik.

Kata Kunci : Stabilitas Peralihan, Braking Resistor, Reaktor, Kapasitor, Logika Fuzzy

Diar Firman
NPM 04 03 03 029 2
Electrical Departement Faculty of Engineering

Counsellor :
DR. Ir. Rudy Setiabudy

IMPLEMENTATION OF FUZZY LOGIC CONTROLLER FOR SWITCHING COORDINATION OF BRAKING RESISTOR, REACTOR, AND CAPACITOR IN POWER SYSTEM TRANSIENT STABILITY IMPROVEMENT

ABSTRACT

There are several method to improve the power system stability. One of the method that can be used is dynamic braking. Beside of braking resistor only, the braking system can also involve reactor and capacitor to enhance the braking performace. Following a major disturbance, each synchronous generator connected to a power system experiences a net difference between its mechanical power input and electrical power output which leads to instability of the system.

This paper deals with the implementation of fuzzy logic controller for switching coordination of braking resistor, reactor, and capacitor in power system transient stability improvement.

Following a fault, variable rotor speed of the generator is measured and the firing-angle for the thyristor switch is determined from the crispy output of the fuzzy controller. By controlling the firing-angle for each component, the coordination of braking resistor, reactor, and capacitor can control the accelerating and decelerating power in generator and thus improves the transient stability.

The simulations is doing by considering Three-phase-to-ground fault in the parallel transmission lines. Simulation results clearly indicate that the proposed fuzzy control strategy provides a simple and effective method of transient stability enhancement of synchronous power system.

Keyword : Transient Stability, Braking Resistor, Reactor, Capacitor, Fuzzy Logic

DAFTAR ISI

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 SIMBOL	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 TUJUAN PENELITIAN	2
1.3 BATASAN MASALAH	2
1.4 METODOLOGI PENELITIAN	2
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN	3
BAB 2 TEORI STABILITAS TENAGA LISTRIK DAN PENGANTAR LOGIKA FUZZY	4
2.1 PENGERTIAN STABILITAS	4
2.1.1 Stabilitas Tunak	4
2.1.2 Stabilitas Dinamik	5
2.1.3. Stabilitas Peralihan	5
2.2 PERSAMAAN AYUNAN	6
2.3 PERSAMAAN SUDUT DAYA	11
2.4 <i>EQUAL AREA CRITERION</i>	14
2.5 SUDUT PEMUTUSAN KRITIS	16
2.6 PENGERTIAN DASAR LOGIKA FUZZY	18
2.7 FUNGSI KEANGGOTAAN HIMPUNAN FUZZY	19
2.8 OPERASI HIMPUNAN FUZZY	20

2.9 FUZZIFIKASI	21
2.10 INFERENSI	22
2.11 DEFUZZIFIKASI	23
2.12 BASIS PENGETAHUAN	25
BAB 3 PERANCANGAN MODEL SIMULASI DAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY	27
3.1 PERANCANGAN MODEL SISTEM TENAGA LISTRIK	27
3.1.1 Penjelasan Model Pembangkit	28
3.1.2 Penjelasan Model Saluran Transmisi	30
3.1.3 Penjelasan Sumber Gangguan	31
3.2 PERANCANGAN MODEL BRAKING	32
3.3 PERANCANGAN THYRISTOR	35
3.4 PERANCANGAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY	37
3.4.1 Fuzzifikasi	38
3.4.2 Aturan Fuzzy	41
3.4.3 Defuzzifikasi	42
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS	46
4.1 UMUM	46
4.2 SIMULASI	47
4.2.1 Kasus 1 : Gangguan tiga fasa ke tanah dengan durasi 0.1 s.	47
4.2.2 Kasus 2 : Gangguan tiga fasa ke tanah dengan durasi 0,15 s	49
4.2.3 Kasus 2 : Gangguan tiga fasa ke tanah dengan durasi 0,32 s	51
4.3 ANALISIS	54
4.3.1 Analisis Kasus 1	54
4.3.2 Analisis Kasus 2	55
4.3.3 Analisis Kasus 3	55
4.3.4 Analisis Grafik	55
4.3.4.1 Grafik kecepatan rotor terhadap waktu	56
4.3.4.2 Grafik daya keluaran elektris	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Arah torsi pada generator sinkron	7
Gambar 2.2 Sistem yang diwakili rangkaian 4 kutub	11
Gambar 2.3 Kurva daya P vs δ	16
Gambar 2.4 Penentuan sudut pemutusan kritis berdasarkan kriteria sama luas	17
Gambar 2.5 Hubungan antara ruang input dan ruang output dalam logika fuzzy	19
Gambar 2.6 Grafik fungsi keanggotaan pernyataan linguistic “orang yang tinggi” dalam (a) logika klasik, dan (b) logika fuzzy	20
Gambar 2.7 : Operasi pada himpunan fuzzy himpunan A dan B (b) Gabungan (c) Irisan (d) Komplemen	21
Gambar 2.8 Metode inferensi max – min	23
Gambar 2.9 Metode inferensi max product	23
Gambar 2.10 Metode defuzzifikasi keanggotaan maksimum	24
Gambar 2.11 Metode defuzzifikasi centroid	24
Gambar 2.12 Metode nilai rata-rata berbobot	25
Gambar 2.13 Metode keanggotaan mean-max	25
Gambar 2.14 Diagram blok konfigurasi dasar pengendali logika fuzzy	26
Gambar 3.1 Diagram garis tunggal dari model system	27
Gambar 3.2 Kotak dialog pengaturan mesin serempak	29
Gambar 3.3 Model saluran transmisi paralel	30
Gambar 3.4 Kotak dialog blok saluran transmisi	31
Gambar 3.5 Kotak dialog <i>fault generator</i>	32
Gambar 3.6 Kotak dialog pengaturan untuk beban R	34
Gambar 3.7 Kotak dialog pengaturan untuk beban L	34
Gambar 3.8 Kotak dialog pengaturan untuk beban C	35
Gambar 3.9 Rangkaian Pemicu <i>Thyristor</i>	36
Gambar 3.10 Rangkaian model <i>thyristor</i> untuk saluran 3 fasa	37
Gambar 3.11 kotak dialog pengaturan <i>Thyristor</i>	37

Gambar 3.12 Blok diagram dari pengendali logika fuzzy	38
Gambar 3.13 Fuzzifikasi untuk $\Delta\omega$.	39
Gambar 3.14 Fuzzifikasi untuk αR	40
Gambar 3.15 Fuzzifikasi untuk αL	40
Gambar 3.16 Aturan fuzzy	41
Gambar 3.17 Diagram alir dari pengendalian <i>fuzzy</i>	43
Gambar 3.18 Diagram alir perbaikan stabilitas dengan <i>braking</i> resistor, reaktor, dan kapasitor	44
Gambar 3.19 Diagram blok pengendalian sistem dengan logika fuzzy	45
Gambar 4.1 Grafik perbandingan kecepatan rotor tanpa perbaikan, <i>braking</i> R dan <i>braking</i> RLC periode gangguan 0,15 s	48
Gambar 4.2 Grafik perbandingan daya listrik tanpa perbaikan, <i>braking</i> R dan <i>braking</i> RLC periode gangguan 0,15 s	48
Gambar 4.3 Grafik perbandingan simpangan sudut rotor tanpa perbaikan, <i>braking</i> R dan <i>braking</i> RLC periode gangguan 0,15 s	49
Gambar 4.4 Grafik perbandingan kecepatan rotor sistem tanpa perbaikan dan dengan <i>braking</i> RLC periode gangguan 0,25 s	49
Gambar 4.5 Grafik perbandingan daya listrik sistem tanpa perbaikan dan dengan <i>braking</i> RLC periode gangguan 0,25 s	50
Gambar 4.6 Grafik perbandingan simpangan sudut rotor sistem tanpa perbaikan dan dengan <i>braking</i> RLC periode gangguan 0,25 s	50
Gambar 4.7 Grafik perbandingan kecepatan rotor sistem tanpa perbaikan dan dengan <i>braking</i> RLC periode gangguan 0,38 s	51
Gambar 4.8 Grafik perbandingan daya listrik sistem tanpa perbaikan dan dengan <i>braking</i> RLC periode gangguan 0,38 s	52
Gambar 4.9 Grafik perbandingan simpangan sudut rotor sistem tanpa perbaikan dan dengan <i>braking</i> RLC periode gangguan 0,38 s	52
Gambar 4.10 Grafik sudut penyalan resistor untuk durasi gangguan 0.38 s	53
Gambar 4.11 Grafik sudut penyalan reaktor untuk durasi gangguan 0.38 s	53

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Load Flow dan Inisialisasi Mesin

28



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Model Simulink Sistem Tenaga Listrik dan <i>Braking</i>	62
Lampiran 2 Model Simulink Rangkaian <i>Thyristor</i>	63
Lampiran 3 Model Simulink Rangkaian <i>Pulse Generator</i>	64
Lampiran 4 Listing Program Pengendali Logika <i>Fuzzy</i>	65

DAFTAR SIMBOL

J	:	Momen inersia rotor
t	:	Waktu
E_1'	:	Tegangan transient internal dari pembangkit pada bus 1.
E_2'	:	Tegangan penerima pada infinite bus.
V_t	:	Tegangan terminal pembangkit
I_{gen}	:	Arus pembangkit
X_{sys}	:	Reaktansi sistem
X_L	:	Reaktansi transmisi
X_t	:	Reaktansi transformator
X_{total0}	:	Reaktansi total sebelum gangguan
X_{totalf}	:	Reaktansi total setelah gangguan berakhir
Y_{bus}	:	Admitansi pada bus
Y_{aa}	:	Admitansi yang terhubung dengan bus a
Y_{ab}	:	Admitansi gandeng antara bus a dan bus b
T_e	:	Torsi listrik mesin
T_m	:	Torsi mekanis mesin
T_a	:	Torsi akselerasi
P_e	:	Daya listrik keluaran mesin
P_m	:	Daya mekanis masukan mesin
P_a	:	Daya akselerasi mesin
P_{max0}	:	Daya listrik maksimum sebelum gangguan
P_{maxf}	:	Daya listrik maksimum setelah gangguan berakhir
P_{mech0}	:	Daya mekanis sebelum gangguan
P_k	:	Daya listrik nyata pada bus k
jQ_k	:	Daya listrik semu pada bus k
S	:	Daya kompleks

pf	:	Faktor daya
ω_{sm}	:	Kecepatan sudut mekanis relatif terhadap kecepatan serempak mesin
ω_s	:	Kecepatan serempak
θ_m	:	Sudut mekanis rotor
θ_{ab}	:	Sudut fasor reaktansi yang menghubungkan bus a dan bus b
δ	:	Sudut daya
δ_m	:	Sudut daya mekanis
δ_0	:	Sudut daya antara bus pembangkit dan infinite bus sebelum gangguan
δ_{max}	:	Sudut daya terbesar pada daerah deselerasi pertama sebelum sistem bekerja tidak serempak
$\delta(t)$:	Sudut daya sebagai fungsi waktu
δ_{cr}	:	Sudut daya kritis
δ_a	:	Sudut fasor tegangan pada bus a
p	:	jumlah kutub pembangkit serempak
H	:	Rasio daya kinetis rotor pada kecepatan serempak dengan rating pembangkit
M	:	Konstanta inersia pembangkit
G	:	Tahanan resistif
B	:	Reaktansi induktif
R	:	Rasio impedansi sistem sebelum gangguan dengan setelah gangguan berakhir

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan bagian yang penting dalam ketenagalistrikan khususnya stabilitas generator. Apabila mengalami gangguan yang besar dan tiba-tiba, generator akan mengalami ayunan. Generator dapat kehilangan kestabilannya apabila gangguan tersebut tidak dibersihkan tepat pada waktunya.

Agar generator stabil maka dilakukan penentuan kestabilan yang dilakukan dengan menggunakan kriteria sama luas. Metode ini cukup representatif dalam menganalisis stabilitas peralihan satu generator terhubung ke sistem tenaga listrik. Dari metode ini, akan didapatkan sudut pemutusan kritis.

Untuk meningkatkan kestabilan generator, dapat digunakan berbagai metode. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah metode perbaikan stabilitas generator dengan menggunakan *dynamic braking* (pengereman dinamis). Apabila terjadi gangguan, rotor generator cenderung akan mengalami percepatan. Dengan adanya pengereman ini, energi kinetik berlebih yang terjadi dapat diserap sehingga percepatan rotor generator dapat dikurangi. Selain itu, penggunaannya juga dapat meningkatkan keluaran daya listrik generator. Hal ini dapat meningkatkan ketahanan generator terhadap gangguan. Selain dengan hanya menggunakan braking resistor saja, pengereman dinamis juga dapat melibatkan komponen reaktor, dan kapasitor yang melengkapi kerja dari pengereman.

Agar unjuk kerja dari pengereman lebih optimal, diperlokkan suatu pengendali yang dapat mengkoordinasikan pensaklaran ketiga komponen tersebut. Pada skripsi ini akan dibahas tentang penggunaan logika fuzzy untuk koordinasi pensaklaran komponen-komponen tersebut.

1.2 TUJUAN PENELITIAN

Menerapkan pengereman dinamis menggunakan *braking* resistor, reaktor, dan kapasitor untuk memperbaiki stabilitas peralihan sistem tenaga listrik yang dikoordinasikan dengan menggunakan pengendali logika *fuzzy*.

1.3 BATASAN MASALAH

Penulisan skripsi ini dibatasi oleh beberapa hal :

- Terbatas pada stabilitas peralihan.
- Metode perbaikan stabilitas yang digunakan adalah pengereman dinamis dengan menggunakan koordinasi pensaklaran *braking* resistor, reaktor, dan kapasitor.
- Pengendali yang digunakan untuk pensaklaran adalah pengendali dengan logika *fuzzy*.
- Sistem yang digunakan adalah sistem dimana generator sinkron dihubungkan dengan sistem jala-jala.
- Pada simulasi, Impedansi pada pembangkit, saluran transmisi, dan transformator dianggap konstan.
- Sistem proteksi tidak disimulasikan
- Gangguan yang diberikan pada saluran transmisi adalah gangguan tiga fasa ke tanah.
- Daya masukan mekanik generator diasumsikan konstan selama periode simulasi.
- Tegangan eksitasi pada generator diasumsikan konstan.
- Logika *Fuzzy* tidak dibahas detail proses pengendalinya hanya dipakai hasil keluarannya untuk meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik.

1.4 METODOLOGI PENELITIAN

Pembahasan tentang teori stabilitas sistem tenaga listrik dan metode logika *fuzzy* yang diterapkan dalam rangka perbaikan dari stabilitas sistem tenaga listrik tersebut dilakukan dengan studi pustaka dengan menggunakan beberapa buku referensi dan jurnal ilmiah.

Untuk simulasi akan dihasilkan data berupa grafik yang diperoleh dari hasil simulasi menggunakan *Simulink Power System* dari program Matlab 7.1. Karena menggunakan fasilitas *Simulink* pada *Matlab* maka hasil simulasi akan mendekati keadaan yang sebenarnya pada sistem.

1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi 5 bab. Pada bab satu, yaitu pendahuluan dibahas tentang latar belakang permasalahan yang terkait dengan stabilitas sistem tenaga listrik secara umum, tujuan, pembatasan masalah, metode penulisan dan sistematika penulisan.

Kemudian pada bab dua, teori stabilitas sistem tenaga listrik dan pengantar logika *fuzzy*, dibahas mengenai dasar teori tentang stabilitas tenaga listrik beserta persamaan sudut daya, persamaan ayunan. Disamping itu juga diberikan tentang dasar teori tentang pengendali logika *fuzzy*.

Pada bab tiga, perancangan model simulasi dan pengendali logika *fuzzy*, berisi metodologi penelitian yang dilakukan untuk simulasi perbaikan stabilitas peralihan generator terhadap gangguan dan metode logika *fuzzy* yang diterapkan untuk perbaikan stabilitas peralihan

Selanjutnya pada bab empat, yaitu simulasi dan analisis dibahas mengenai simulasi perbaikan stabilitas peralihan sistem tenaga listrik dengan *braking* resistor, reaktor, dan kapasitor dengan pengendali logika *fuzzy* menggunakan perangkat lunak *Simulink Power System* dari Matlab versi 7.1

Terakhir adalah bab lima. Isi dari bab ini adalah kesimpulan yang didapat dari hasil penelitian.

BAB 2

TEORI STABILITAS TENAGA LISTRIK DAN PENGANTAR LOGIKA *FUZZY*

2.1 PENGERTIAN STABILITAS

Suatu sistem tenaga listrik yang baik harus dapat memenuhi 3 persyaratan utama dalam pengoperasiannya, yaitu : *reliability*, *quality*, dan *stability*. *Reliability* adalah kemampuan sistem untuk menyalurkan daya atau energi secara terus menerus. *Quality* adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk menghasilkan besaran-besaran standart yang ditetapkan untuk tegangan dan frekuensi. *Stability* menurut pengertiannya adalah kemampuan alat untuk kembali kepada kondisi normal apabila terjadi gangguan.

Suatu sistem dikatakan memiliki stabilitas yang baik jika terkena gangguan sistem akan dapat kembali ke keadaan titik seimbangya dalam kondisi tertentu, dan bila stabilitas dari sistem tidak baik maka setelah terjadi gangguan sistem tersebut tidak dapat kembali ke titik normalnya.

Dalam sistem tenaga listrik stabilitas dibagi menjadi tiga:

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

2.1.1 Stabilitas Tunak

Stabilitas tunak adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk berada pada keadaan setimbang (sinkron) setelah terkena gangguan yang kecil dalam waktu yang singkat. Gangguan ini dapat berupa perubahan beban atau daya yang kecil, reaksi dari *governor*, serta reaksi dari AVR (*Automatic Voltage Regulator*). Setelah mengalami gangguan, sistem akan tetap berada pada titik kesetimbangannya atau keadaan tunaknya. Dalam stabilitas tunak, tidak terjadi perubahan dalam sistem karena sistem tetap dalam keadaan serempak. Batasan

dari stabilitas tunak (*steady state stability limit*) adalah batasan daya maksimum yang dapat ditransfer oleh generator tanpa kehilangan kestabilannya.

2.1.2 Stabilitas Dinamik

Stabilitas dinamik hampir sama dengan stabilitas tunak, akan tetapi, yang membedakan keduanya adalah tingkatan waktu dan jenis gangguannya. Pada stabilitas dinamik, gangguan yang terjadi lebih besar dan waktunya lebih lama. Hal ini mengakibatkan terjadinya perubahan dalam sistem, yaitu dalam sistem eksitasi generator dan sistem governor turbin sehingga terjadi variasi fluks yang diberikan rotor. Akan tetapi, perubahan ini tidak menyebabkan sistem menjadi tidak stabil, karena dengan segera, sistem akan berangsur-angsur kembali pada keadaan serempaknya.

2.1.3 Stabilitas Peralihan

Stabilitas peralihan adalah kemampuan sistem tenaga listrik untuk kembali stabil setelah mengalami gangguan yang besar dan tiba-tiba. Gangguan ini dapat berupa gangguan simetris dan asimetris, hilangnya beban yang besar secara tiba-tiba, dan lain-lain. Setelah mengalami gangguan, generator akan berada pada kondisi peralihan atau *transient* lalu berangsur-angsur kembali ke keadaan serempaknya dengan menuju titik kesetimbangan yang baru. Pada kondisi peralihan ini, sistem dapat kehilangan kestabilannya apabila gangguan yang terjadi di luar batas kemampuan sistem untuk bereaksi.

Stabilitas peralihan ini perlu diatasi karena mempunyai peluang yang lebih besar untuk terjadinya *instability* pada sistem. Karakteristik dari stabilitas peralihan ini lebih dinamis dan bersifat nonlinier. Sedangkan untuk stabilitas tunak dan stabilitas dinamik penyelesaiannya bersifat linier atau dapat dilinearisasi, sehingga penyelesaiannya jauh lebih sederhana.

Analisis dari stabilitas peralihan dilakukan pada beberapa detik pertama (*first swing*), kerana stabilitas pada sistem sangat ditentukan dari kondisi awal tersebut. *Objektif*-nya adalah bagaimana kelakuan dari generator (suplai) dan motor (beban) pada saat ada gangguan yang besar, apakah masing-masing masih

bisa mempertahankan sinkronisasi , dan kembali kepada kecepatan sinkron yang konstan.

2.2 PERSAMAAN AYUNAN

Dalam kondisi operasi normal, posisi relatif sumbu rotor dengan resutan sumbu medan magnetik adalah tetap. Sudut antara kedua sumbu ini dikenal dengan sebutan sudut daya (*power angle*) atau sudut torsi (*torque angle*). Kemudian, ketika gangguan terjadi, maka akan terjadi perubahan dimana rotor akan mengalami percepatan (*accelerate*) atau perlambatan (*decelerate*). Hal ini dapat dianalogikan sebagai sebuah bandul yang berayun, dan untuk menjelaskan situasi tersebut maka perlu diketahui terlebih dahulu mengenai persamaan ayunan. Pergerakan rotor dari generator sinkron (serempak) didasarkan pada prinsip dasar hukum dinamika benda yang menyatakan bahwa momen putar percepatan (torsi percepatan) adalah hasil kali dari momen kelembaman (momen inersia) rotor dan percepatan sudutnya. Pada kondisi yang setimbang torsi mekanik akan sama besar dengan torsi listrik yang dihasilkan, sebaliknya jika terjadi ketidaksetimbangan maka torsi mekanik akan tidak sama dengan torsi listrik yang dihasilkan. Ini akan menyebabkan rotor mengalami percepatan. Hal tersebut di atas dinyatakan dalam persamaan berikut ini [1]:

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a \quad \text{N.m.} \quad (2.1)$$

dengan :

- J = momen kelembaman total dari massa rotor (kg.m^2)
- θ_m = pergeseran sudut rotor terhadap sumbu acuan (radian)
- t = waktu (detik)

Dengan asumsi rugi-rugi torsi seperti rugi celah udara dan rugi friksi diabaikan, maka torsi percepatan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$T_a = T_m - T_e \quad \text{N.m.} \quad (2.2)$$

dengan :

- T_a = torsi percepatan (N.m.)
- T_m = torsi mekanis masukan generator (N.m.)

T_e = torsi elektrik keluaran generator (N.m.)

Jika kedua sisi pada persamaan (2.2) dikalikan dengan kecepatan angular rotor ω , maka persamaan (2.2) dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$T_a \cdot \omega = \omega(T_m - T_e)$$

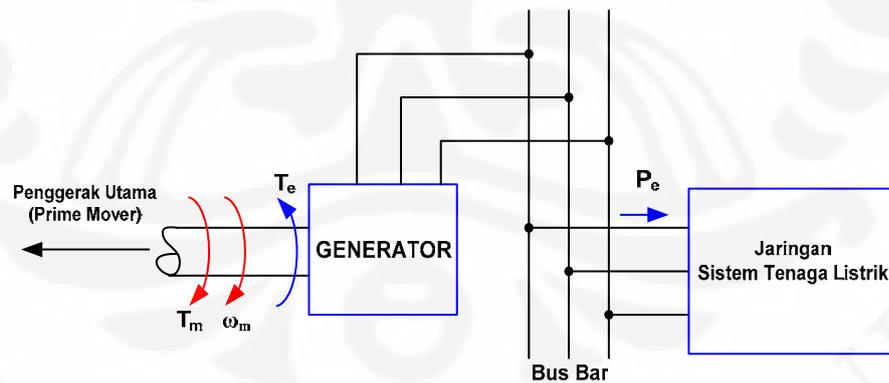
$$P_a = P_m - P_e \quad \text{Watt} \quad (2.3)$$

dengan : P_a = daya percepatan (Watt)

P_m = daya masukan mekanis (Watt)

P_e = daya keluaran elektrik (Watt)

Pada kondisi sinkronnya torsi mekanik masukan generator T_m adalah sama dengan torsi elektrik generator T_e (tidak ada percepatan atau perlambatan). T_m didefinisikan sebagai resultan medan putar poros yang berasal dari penggerak utama (*prime mover*) yang mempunyai arah sesuai dengan perputaran rotor, sehingga T_m bernilai positif. Sedangkan T_e adalah torsi lawan yang didefinisikan sebagai torsi celah udara, arahnya berlawanan dengan T_m . Hal ini diperlihatkan oleh gambar 2.1.



Gambar 2.1 Arah torsi pada generator sinkron [2]

Didefinisikan :

$$\theta_m = \omega_{sm} \cdot t + \delta_m \quad \text{radian} \quad (2.4)$$

dengan : ω_{sm} = kecepatan sinkron mekanis (radian/detik)

δ_m = pergeseran sudut rotor dari sumbu acuan yang berputar dengan kecepatan sinkron (radian)

Persamaan (2.4) terhadap waktu $\frac{d\theta_m}{dt}$, maka didapatkan :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad \text{radian/detik} \quad (2.5)$$

dengan : $\frac{d\theta_m}{dt}$ = kecepatan angular mekanis rotor

Percepatan angular mekanis rotor didapat dengan menurunkan persamaan (2.5) terhadap waktu.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d\theta_m}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(\omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \right)$$

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad \text{radian/detik}^2 \quad (2.6)$$

$\frac{d\theta_m}{dt}$ didefinisikan sebagai perbedaan antara kecepatan mekanis rotor dengan kecepatan sinkronnya. Kecepatan sudut rotor $\frac{d\theta_m}{dt}$ akan bernilai konstan atau sama dengan kecepatan sinkron ω_{sm} jika $\frac{d^2\delta_m}{dt^2}$ bernilai nol.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.1), (2.2), dan (2.3), maka diperoleh:

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

Pada persamaan (2.7) variabel $J \cdot \omega_m$ merupakan konstanta inersia yang dinotasikan dengan M . Nilai M tidak selalu konstan setiap waktu, karena ω_m tidak selalu sama dengan kecepatan serempak pada semua keadaan kerja. Nilai M dihitung pada keadaan sinkron dan tetap dianggap konstan.

Nilai konstanta M berpengaruh terhadap energi kinetik dari massa yang berputar, W_k , yang dinyatakan oleh persamaan (2.8):

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_m^2 = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \omega_m \quad \text{Joule}$$

atau

$$M = \frac{2W_k}{\omega_m} \quad \text{J.s/rad} \quad (2.8)$$

Persamaan ayunan generator dalam bentuk konstanta inersia M menjadi :

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{J.s/rad} \quad (2.9)$$

Persamaan ayunan generator (2.9) juga bisa dituliskan dalam bentuk sudut elektrik δ . Jika p merupakan jumlah dari kutub pada generator sinkron, maka hubungan antara sudut mekanis δ_m dengan sudut elektrik δ dapat dinyatakan oleh persamaan :

$$\delta = \frac{p}{2} \delta_m \quad \text{radian} \quad (2.10)$$

$$\omega = \frac{p}{2} \cdot \omega_m \quad \text{radian/sekon} \quad (2.11)$$

Dengan menggunakan persamaan (2.7), (2.9), (2.10), dan (2.11), maka persamaan ayunan generator dapat dituliskan dalam bentuk :

$$\frac{2}{p} \cdot M \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad \text{watt} \quad (2.12)$$

Persamaan ayunan generator juga dapat dituliskan dalam bentuk per-unit dengan membagi persamaan (2.12) dengan basis daya, S_B , dan mensubsitusikannya ke dalam persamaan (2.8) diperoleh :

$$\frac{2}{p} \cdot \frac{2W_k}{\omega_{sm} \cdot S_B} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad (2.13)$$

Dalam studi kestabilan diperlukan konstanta H atau konstanta inersia per-unit yang dinyatakan sebagai :

$$H = \frac{\text{Daya kinetik pada } \omega_{sm}}{\text{rating mesin (VA)}} \quad \text{detik} \quad (2.14)$$

dan

$$H = \frac{W_k}{S_B} \quad (2.15)$$

Nilai dari H berkisar antara 0-10 tergantung dari *rating* dan tipe generatornya. S_B adalah *rating* generator dalam MVA. Persamaan (2.15) disubsitusikan ke dalam persamaan (2.13) sehingga diperoleh :

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

dengan : $P_{m(pu)}$ = daya masukan mekanis dalam pu

$P_{e(pu)}$ = daya keluaran elektris dalam pu

atau dalam bentuk elektrik :

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

Persamaan (2.17) dapat juga dinyatakan dalam bentuk frekuensi f (hertz), sehingga menjadi [1]:

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

δ pada persamaan di atas dinyatakan dalam radian listrik. Jika δ dinyatakan dalam derajat listrik persamaan tersebut menjadi :

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

2.3 PERSAMAAN SUDUT DAYA

Parameter yang sangat penting dalam menganalisis dan menyelesaikan soal dari stabilitas peralihan ini adalah besaran sudut daya. Karena dengan mengetahui apa yang terjadi pada sudut daya maka keadaan dari stabilitas peralihan sistem juga dapat diketahui. Dalam analisis dari stabilitas peralihan, sudut daya didefinisikan sebagai besarnya perbedaan sudut fasor antara tegangan pada bus pembangkit dengan tegangan di bus penerima. Suatu sistem yang mengalami gangguan akan membuat sudut daya menyimpang dari sudut daya pada waktu sistem belum mengalami gangguan. Pada saat terjadi gangguan, sudut daya akan membesar dan terus membesar dan akan mengecil jika gangguan sudah dapat distabilkan. Pada jenis stabilitas peralihan yang stabil, bila gangguan sudah selesai atau berakhir maka sudut daya akan kembali pada saat belum terjadi gangguan setelah melalui satu atau beberapa kali ayunan disekitar sudut serempaknya.

Untuk dapat menyelesaikan permasalahan perhitungan maka dapat dianalogikan dengan suatu sistem yang terdiri dari pembangkit, jaringan transmisi dan sisi penerima, yang dapat disederhanakan menjadi jaringan 4 kutub seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.2 Sistem yang diwakili rangkaian 4 kutub

Pada sistem diatas yang diketahui adalah :

E_1' : tegangan transient internal dari pembangkit pada bus 1

E_2' : tegangan penerima pada infinite bus

Admitansi pada bus dengan jumlah node 2 bila dinyatakan dalam matrix adalah sebagai berikut:

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

Dan dengan menggunakan persamaan aliran daya Gauss-Seidel [1]:

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

dengan: $k = 1$
 $N = 2$

V pada persamaan (2.21) digantikan dengan E_2' , sehingga persamaan (2.20) menjadi:

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

dengan: $E_1' = |E_1| \angle \delta_1$ Volt

$E_2' = |E_2| \angle \delta_2$ Volt

$Y_{11} = G_{11} + jB_{11}$ Ω^{-1}

$Y_{12} = |Y_{12}| \angle \theta_{12}$ Ω^{-1}

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

dimana: $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta = 1$

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

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

dimana: $\cos(\alpha - \beta) = (\cos \alpha \cos \beta + \sin \alpha \sin \beta)$

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

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

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

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

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

2 \rightarrow

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

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

0 + 1 + 2 =

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

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

$P_1 + jQ_1 =$

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

sehingga :

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

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

Dengan menentukan :

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

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

Sehingga didapat :

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

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

Persamaan (2.22) dapat ditulis dalam bentuk sederhana sebagai :

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

dimana :

$$P_e = P_1$$

$$P_e = G_{11}|E_1|^2$$

$$P_{\max} = |Y_{12}||E_1||E_2|$$

G_{11} dan φ bernilai nol apabila resistansi saluran transmisi bernilai nol, sehingga :

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

atau dapat juga ditulis sebagai [1]:

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

Pada studi kestabilan generator sinkron P_{\max} merupakan batas dari kesetimbangan tunak (*steady-state stability*), dan akan tercapai bila nilai $\sin \delta$ bernilai satu atau maksimum. P_e merupakan persamaan sudut daya dan merepresentasikan keluaran daya listrik dari generator.

2.4 KRITERIA SAMA LUAS (*EQUAL AREA CRITERION*)

Metode kriteria sama luas digunakan untuk memprediksikan stabilitas peralihan dari generator sinkron yang terinterkoneksi dengan sistem tenaga listrik. Dengan metode ini juga dapat dilihat besar sudut daya kritis δ_{cr} yang merupakan batasan sudut agar sistem dikatakan stabil, tetapi tidak untuk mendapatkan besaran waktu pemutusan kritis t_{cr} . Metode ini didasarkan pada representasi grafis dari energi yang tersimpan pada rotor yang berputar untuk menentukan

apakah generator masih stabil setelah terkena gangguan. Keterbatasan dari metode ini adalah bahwa metode ini hanya terbatas pada satu generator yang terhubung pada jala-jala tak hingga.

Berdasarkan persamaan ayunan rotor pada persamaan (2.19) :

$$\frac{H}{\pi \cdot f_o} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a$$

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk [3]:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\pi \cdot f_o}{H} \cdot (P_m - P_e)$$

Kedua ruas dikalikan dengan $\frac{2d\delta}{dt}$, didapatkan :

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

Atau :

$$d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_o}{H} \cdot (P_m - P_e) d\delta \quad (2.27)$$

Dengan mengintegrasikan kedua ruas pada persamaan di atas dan menyelesaikannya untuk $\frac{d\delta}{dt}$, didapatkan :

$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2\pi f_o}{H} \cdot \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta} \quad (2.28)$$

Untuk kestabilan kecepatan angular ini bernilai nol untuk suatu waktu sesudah gangguan. Berdasarkan pada persamaan (2.28), maka didapatkan kriteria kestabilan sebagai berikut [3]:

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.29)$$

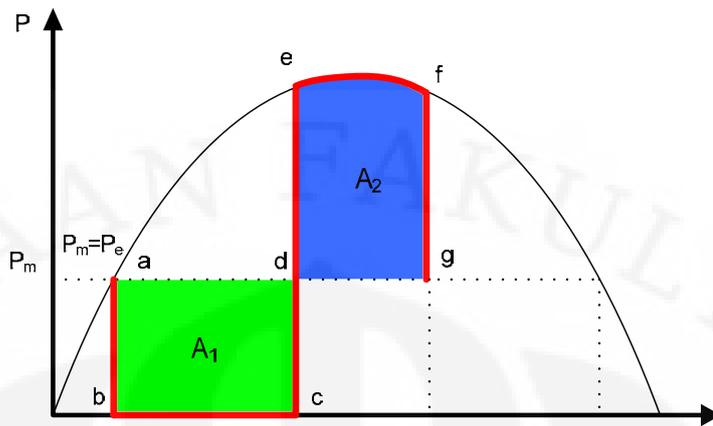
Jadi agar sistem stabil, maka area di bawah fungsi $P_m - P_e$ yang diplot terhadap δ bernilai nol. Berdasarkan gambar 2.4, sistem dikatakan stabil jika luas area A_1 sama dengan luas area A_2 . Energi lebih yang dimiliki rotor selama percepatan ditunjukkan oleh luas area A_1 yakni :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{area a-b-c} \quad (2.30)$$

Dengan kenaikan sudut daya δ maka daya elektrik P_e akan naik, dan ketika $\delta = \delta_1$ daya elektrisnya akan mencapai keadaan setimbang dengan daya masukan mekanik P_{m1} . Pada titik ini P_a bernilai nol, dan rotor masih berjalan dengan kecepatan di atas kecepatan sinkronnya. Dengan demikian P_e akan terus naik sampai pada titik dimana $\delta = \delta_{\max}$. Karena P_e terus naik maka kondisinya menjadi $P_m < P_e$ maka rotor akan mengalami perlambatan sampai kecepatan sinkronnya terpenuhi. Pada gambar 2.3 energi yang diberikan rotor untuk perlambatan ditandai dengan area A_2 yakni :

$$\int_{\delta_1}^{\delta_{\max}} (P_{m1} - P_e) d\delta = \text{area bde} \quad (2.31)$$

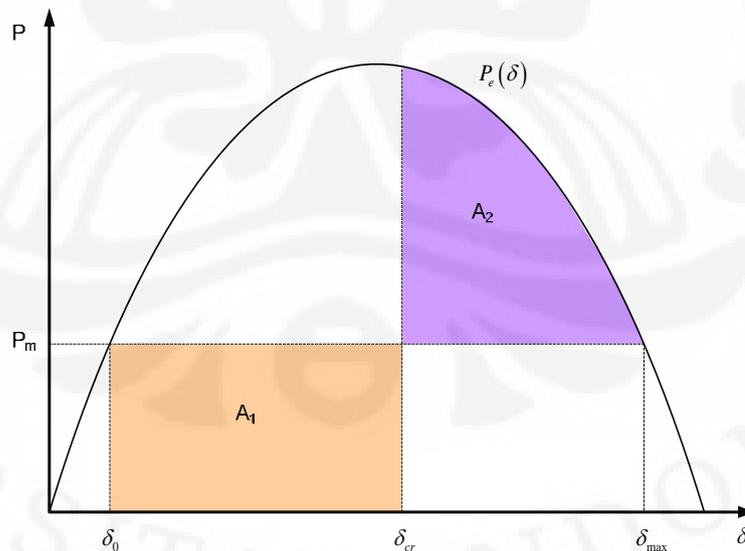
Sistem akan stabil jika luas area A_1 dan luas area A_2 adalah sama. Dengan demikian pada sistem yang stabil ia akan berosilasi antara titik δ_0 dan δ_{\max} .



Gambar 2.3 Kurva daya P vs δ [3]

2.5 SUDUT PEMUTUSAN KRITIS

Sudut pemutusan kritis δ_{cr} untuk pemutusan gangguan yang terjadi merupakan persyaratan agar kriteria sama luas terpenuhi. Sudut pemutusan kritis, sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar 2.5, menentukan apakah sistem akan stabil atau sebaliknya. Jika gangguan dibersihkan pada $\delta > \delta_{cr}$ maka ketidakstabilan akan terjadi.



Gambar 2.4 Penentuan sudut pemutusan kritis berdasarkan kriteria sama luas [3]

Berdasarkan gambar 2.4 maka perhitungan sudut pemutusan kritis δ_{cr} adalah sebagai berikut :

Luas area A1 dan A2 dinyatakan oleh persamaan berikut ini :

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} P_m d\delta = P_m (\delta_{cr} - \delta_0) \quad (2.32)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta - P_m) d\delta \\ &= \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_{max} \sin \delta) d\delta - \int_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} (P_m) d\delta \\ &= -P_{max} \cos \delta \Big|_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} - P_m \delta \Big|_{\delta_{cr}}^{\delta_{max}} \\ &= P_{max} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{max}) - P_m (\delta_{max} - \delta_{cr}) \end{aligned} \quad (2.33)$$

Dengan menggunakan kriteria sama luas, maka :

$$\begin{aligned} A_1 &= A_2 \\ P_m \delta_{cr} - P_m \delta_0 &= P_{max} \cos \delta_{cr} - P_{max} \cos \delta_{max} - P_m \delta_{max} + P_m \delta_{cr} \\ P_{max} \cos \delta_{cr} &= P_{max} \cos \delta_{max} + P_m \delta_{max} - P_m \delta_0 \\ \cos \delta_{cr} &= \cos \delta_{max} + \frac{P_m}{P_{max}} (\delta_{max} - \delta_0) \end{aligned} \quad (2.34)$$

dimana:

$$\begin{aligned} \delta_{max} &= \pi - \delta_0 \\ P_m &= P_{max} \sin \delta_0 \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan δ_{max} dan P_m ke dalam persamaan (2.34), maka didapatkan [3]:

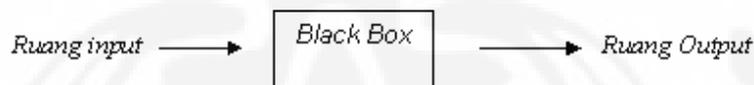
$$\begin{aligned} \cos \delta_{cr} &= \cos(\pi - \delta_0) + \frac{P_{max} \sin \delta_0}{P_{max}} (\pi - \delta_0 - \delta_0) \\ &= -\cos \delta_0 + \sin \delta_0 (\pi - 2\delta_0) \end{aligned}$$

$$\delta_{cr} = \cos^{-1} [(\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0] \quad (2.35)$$

2.6 PENGERTIAN DASAR LOGIKA FUZZY

Pengertian paling dasar dari logika *fuzzy* adalah metode untuk menangani segala sesuatu yang bersifat tidak pasti, ambigu dari suatu sistem. Logika *fuzzy* pertama kali diperkenalkan oleh Zadeh pada tahun 1965. Dalam tulisannya yang menyatakan bahwa banyak sekali pengambil keputusan dalam dunia nyata tidak mengetahui dengan pasti hasil, konsekuensi yang diperoleh dari keputusan yang sudah dibuatnya, maka dibuatlah suatu metode untuk mengurangi pengaruh dari ketidakpastian tersebut. Ketidakpastian inilah yang menjadi dasar yang paling utama dalam logika *fuzzy*. Logika *fuzzy* sengaja dibuat sebagai generalisasi dari semua teori yang konvensional, sehingga akibatnya logika *fuzzy* tetap menjadi bidang yang membutuhkan keahlian analisis dan matematis yang sangat baik. Logika *fuzzy* mencoba untuk menyelesaikan hal-hal yang tidak pasti dalam bidang teknik dengan mengikut sertakan semua parameter yang pasti yang nantinya digunakan untuk membuat pernyataan menjadi jelas.

Logika *fuzzy* merupakan suatu metode yang tepat untuk memetakan ruang input ke dalam ruang output. Sehingga dengan menggunakan logika *fuzzy* ini, output yang diinginkan merupakan hasil penjawantahan dari input yang ada dengan menggunakan aturan-aturan yang terkait. Di bawah ini dapat dilihat gambar hubungan antara ruang input dan ruang output dalam logika *fuzzy*.



Gambar 2.5 Hubungan antara ruang input dan ruang output dalam logika *fuzzy*

Sebagai suatu metode logika, logika *fuzzy* mempunyai beberapa keunggulan bila dibandingkan dengan metoda logika lainnya, seperti:

- Logika *fuzzy* lebih mudah untuk dimengerti
- Sifatnya yang lebih flexible
- Toleransi yang cukup besar terhadap data yang tidak pasti
- Dapat digunakan untuk sistem yang nonlinier dan kompleks, terutama untuk sistem yang tidak dapat dengan mudah dibuat persamaan model matematis antara masukan dan keluaran sistem

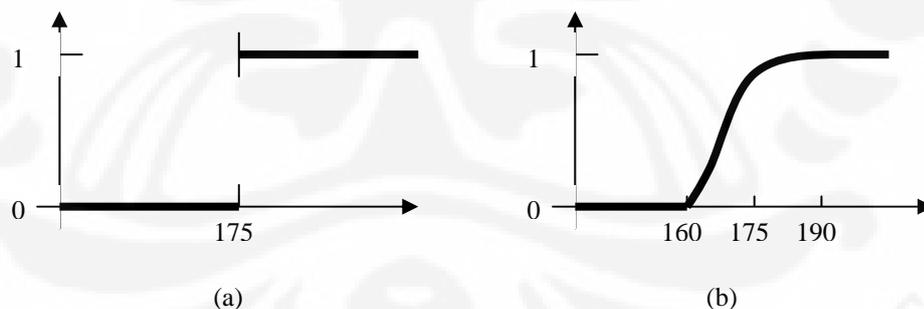
- Bahasa yang dipakai dalam logika *fuzzy* adalah bahasa yang biasanya dipakai oleh manusia (*variable linguistic*) sehingga akan lebih mudah untuk dipahami

2.7 FUNGSI KEANGGOTAAN HIMPUNAN FUZZY

Sebagai suatu algoritma yang merepresentasikan keadaan yang tidak pasti, maka dalam logika *fuzzy* ini dikenal dengan apa yang disebut sebagai fungsi keanggotaan (*membership function*). Fungsi keanggotaan ini menyatakan suatu harga yang berfungsi untuk memetakan tiap elemen himpunan (A) kedalam suatu tingkat keanggotaan tertentu untuk suatu pernyataan *linguistic* yang mempunyai nilai antara 0 dan 1. Bila dinyatakan dalam bentuk matematis, maka himpunan *fuzzy* (A) dapat dinyatakan dalam persamaan berikut [4]:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)); x \in X \} \quad (2.36)$$

dengan: $\mu_A(x)$ = fungsi keanggotaan x dalam A. Dimana nilai dari A tersebut berada diantara (0) dan (1). Untuk memudahkan memahami perbedaan dari logika konvensional dengan logika *fuzzy* lihat diagram perbedaan antara kedua logika tersebut:



Gambar 2.6 Grafik fungsi keanggotaan pernyataan linguistik “orang yang tinggi” dalam (a) logika klasik, dan (b) logika *fuzzy*

Grafik diatas menunjukkan perbedaan keanggotaan antara logika klasik untuk gambar (a) dengan logika *fuzzy* yang diwakili oleh gambar (b) tentang himpunan definisi orang tinggi. Terlihat dengan jelas bahwa untuk himpunan dengan logika klasik bila tinggi orang tersebut kurang 175 cm maka orang itu dikatakan pendek.

Tetapi pada gambar (b) orang yang mempunyai tinggi badan 174.5 cm bisa dibidang tinggi tergantung definisi himpunan dari logika *fuzzy* yang diberikan.

Secara umum, penulisan himpunan *fuzzy* dapat diklasifikasikan kedalam 2 kelompok, yaitu:

- Untuk semesta yang diskrit
- Untuk semesta yang kontinu

2.8 OPERASI HIMPUNAN FUZZY

Operasi pada himpunan *fuzzy* bertujuan untuk melakukan manipulasi sistematis pada himpunan *fuzzy* dengan cara melakukan operasi pada fungsi keanggotaan. Berikut ini akan dibahas beberapa operasi pada himpunan *fuzzy* jika diberikan dua buah himpunan *fuzzy* A dan B pada himpunan semesta U [4].

1. *Intersection* (irisan)

Gabungan dari dua himpunan *fuzzy* A dan B dengan fungsi keanggotaan masing-masing μ_A dan μ_B direpresentasikan dalam persamaan:

$$C = A \cap B$$
$$\mu_C(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.37)$$

2. *Union* (gabungan)

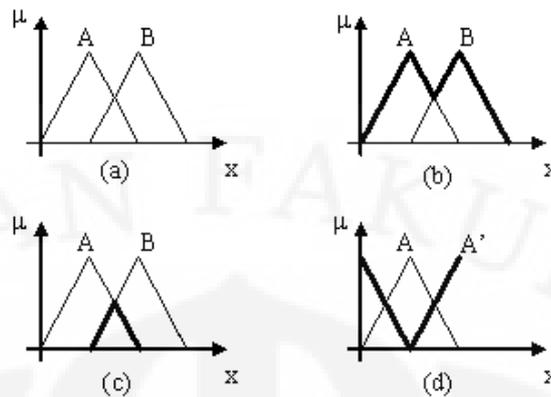
Irisan dari dua himpunan *fuzzy* A dan B dengan fungsi keanggotaan masing-masing μ_A dan μ_B ditunjukkan dalam persamaan:

$$C = A \cup B$$
$$\mu_C(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, x \in X \quad (2.38)$$

3. *Complement* (komplemen)

Komplemen dari dua himpunan *fuzzy* A dan B dengan fungsi keanggotaan masing-masing μ_A dan μ_B ditunjukkan dalam persamaan:

$$A = A'$$
$$\mu_A(x) = 1 - \mu_A(x), x \in X \quad (2.39)$$



Gambar 2.7 : Operasi pada himpunan *fuzzy*

(a) himpunan A dan B (b) Gabungan (c) Irisan (d) Komplemen

2.9 FUZZIFIKASI

Fuzzifikasi merupakan suatu proses untuk menentukan fungsi keanggotaan sistem *fuzzy*. Proses ini memetakan masukan *fuzzy* yang berupa data tunggal (*crisp*) menjadi variabel *fuzzy* yang berupa pernyataan linguistik.

Fungsi keanggotaan *fuzzy* baik yang simetris maupun non simetris harus representatif dalam membangun suatu kaidah *fuzzy* terhadap data masukan yang ada. Ada beberapa metode yang biasa digunakan untuk membangun fungsi keanggotaan *fuzzy*, yaitu [4]:

- Intuisi
Metode ini menggunakan kapasitas/kemampuan manusia untuk membangun fungsi keanggotaan dengan menggunakan kecerdasan dan kepandaian masing-masing.
- Inferensi
Pada metode ini digunakan ilmu pengetahuan untuk menarik atau menduga kesimpulan dalam membuat suatu fungsi keanggotaan.
- Pengurutan ranking
Metode ini menggunakan penilaian pilihan oleh individu, kelompok, atau metode opini lainnya untuk menentukan nilai fungsi keanggotaan ke bentuk *fuzzy*.

- Jaringan saraf tiruan

Jaringan saraf tiruan merupakan suatu teknik untuk untuk membuat fungsi keanggotaan dengan menggunakan model yang mensimulasikan cara kerja jaringan neuron pada otak manusia.

2.10 INFERENSI

Inferensi merupakan metode pengambilan keputusan yang didasarkan atas basis aturan *fuzzy* di atas. Pada suatu keadaan di mana terjadi beberapa aturan yang berlaku secara bersamaan tetapi menghasilkan keluaran yang berbeda-beda, maka diperlukan suatu teknik yang digunakan untuk metode pengambilan keputusan yang disebut inferensi. Ada beberapa teknik pengambilan keputusan yang digunakan pada inferensi, yaitu [4]:

- 1) Metode max-min

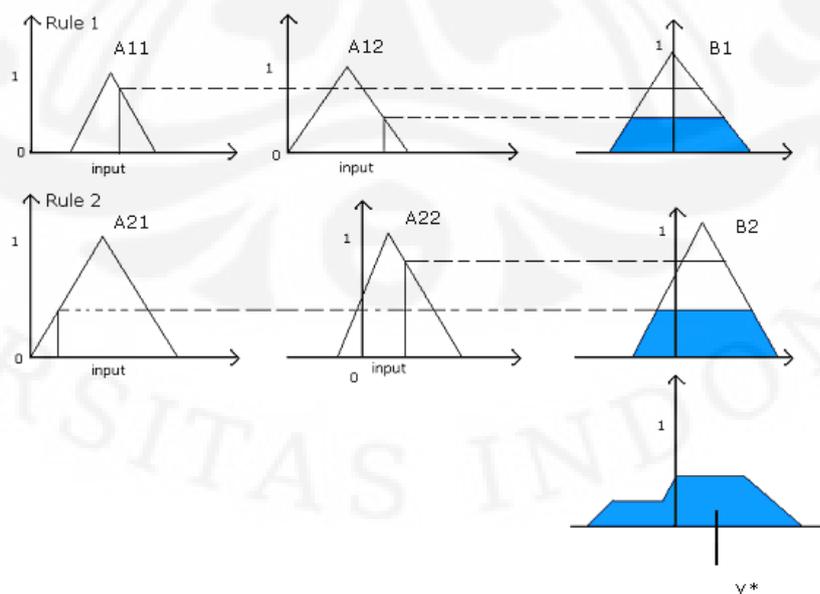
Aturan yang berlaku pada metoda max-min adalah:

$$\mu_A(y) = \max \left\{ \min [\mu_{A_1}(x), \mu_{R_1}(x, y)] \right\} ; x \in X \quad (2.40)$$

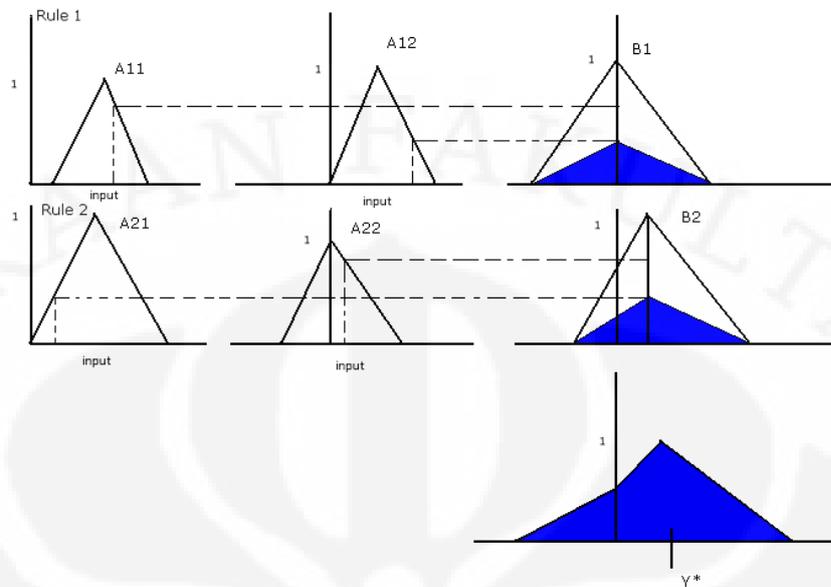
- 2) Metode perkalian maksimum (maximum product)

Aturan yang berlaku pada metoda perkalian maksimum adalah:

$$\mu_A(x) = \max [\mu_{A_1} \cdot \mu_{R_1}(x, y)] ; x \in X \quad (2.41)$$



Gambar 2.8 Metode inferensi max – min



Gambar 2.9 Metode inferensi max product

2.11 DEFUZZIFIKASI

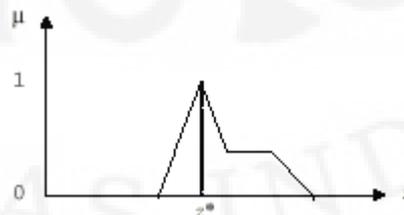
Defuzzifikasi merupakan proses yang memetakan atau mengkonversi dari himpunan *fuzzy* ke dalam suatu himpunan *crisp* yang nantinya akan diterapkan menjadi sinyal kendali ke dalam sistem yang akan dikendalikan. Sehingga dengan proses ini hasil yang akan diperoleh sudah bukan lagi merupakan pernyataan-pernyataan linguistik lagi namun sudah merupakan suatu nilai yang sudah pasti.

Beberapa metode defuzzifikasi yang sering digunakan adalah [4]:

- a. Prinsip keanggotaan maksimum (*max membership principle*)

Metode ini dinyatakan dengan pernyataan aljabar berikut ini

$$\mu_c(z^*) \geq \mu_c(z) \text{ untuk semua } z \in Z$$



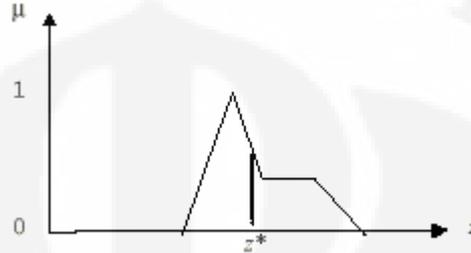
Gambar 2.10 Metode defuzzifikasi keanggotaan maksimum

b. Metode centroid

Metode ini sering disebut metode pusat gravitasi atau metode pusat area.

Nilai dari fuzzifikasinya dinyatakan dengan persamaan:

$$z^* = \frac{\int \mu_c(z) \cdot z dz}{\int \mu_c(z) dz} \quad (2.42)$$



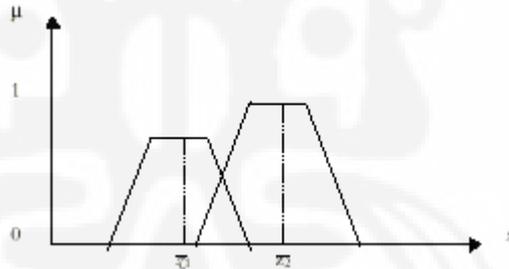
Gambar 2.11 Metode defuzzifikasi centroid

c. Nilai rata-rata berbobot (*weighted average method*)

Metode ini hanya berfungsi untuk keanggotaan output yang simetris.

Persamaan dari nilai rata-rata berbobot adalah:

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(\bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum \mu_c(\bar{z})} \quad (2.43)$$

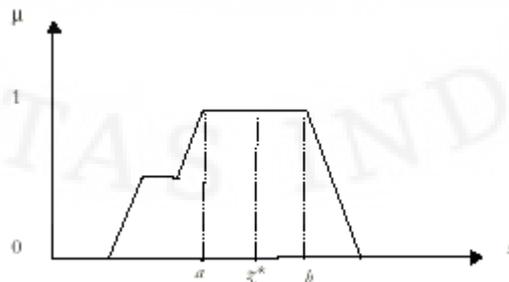


Gambar 2.12 Metode nilai rata-rata berbobot

d. Keanggotaan mean-max (*mean-max membership*)

Metode ini disebut juga metode nilai tengah dari maksimum (*middle of maxima*) dan dinyatakan dalam persamaan;

$$z^* = \frac{a+b}{2} \quad (2.44)$$



Gambar 2.13 Metode keanggotaan mean-max

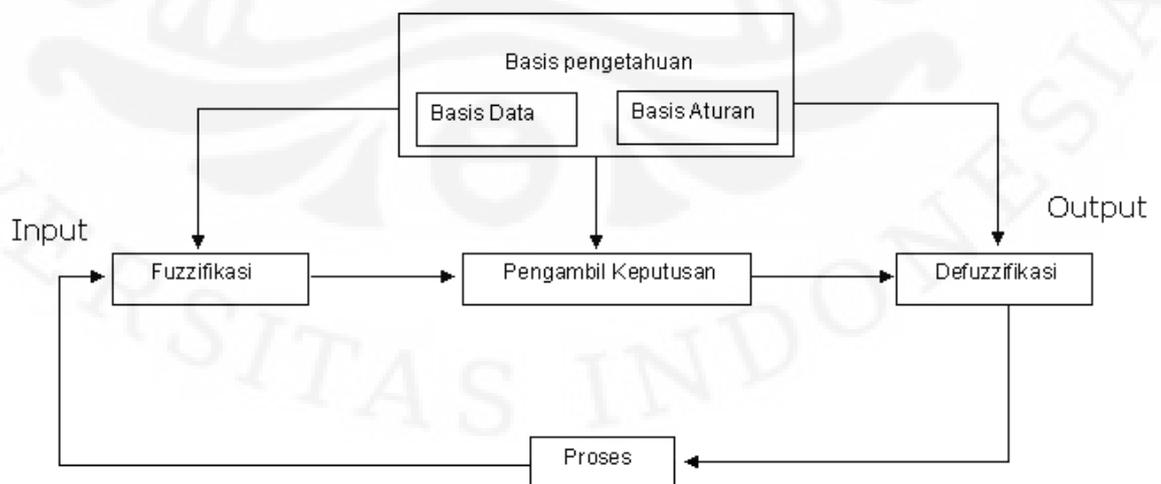
2.12 BASIS PENGETAHUAN

Basis pengetahuan sistem *fuzzy* berisi seperangkat aturan yang berperan untuk mengolah data masukan untuk terjadinya proses pengambilan keputusan. Dalam hal ini data masukan merupakan himpunan *fuzzy* yang telah difuzzifikasi sebelumnya. Peraturan yang ada dibuat sedemikian rupa dengan menggunakan variabel linguistik yang akan sangat berperan dalam proses pengambilan keputusan. Pengetahuan yang mendalam tentang sistem yang dikendalikan dan pengalaman dalam mengoperasikannya merupakan salah satu syarat dalam membuat basis pengetahuan sistem *fuzzy* ini, sehingga dapat diperoleh keluaran sistem yang diinginkan.

Basis pengetahuan dalam sistem *fuzzy* menggunakan logika manusia untuk menentukan keputusan. Metode yang dipakai untuk merepresentasikan pengetahuan manusia dalam mengambil keputusan adalah dengan menggunakan bentuk sebagai berikut :

IF (premis/antecedent) *THEN* (kesimpulan/konsekuensi)

Bentuk aturan di atas lebih dikenal dengan bentuk basis aturan (*rule base*) IF-THEN. Bentuk ini merupakan bentuk ekspresi bila diketahui suatu fakta (premis, hipotesa) maka dapat diturunkan atau ditarik kesimpulan atau pemecahannya. Dari bentuk basis pengetahuan ini maka nantinya dapat dibuat suatu *fuzzy associative memory (fam)*



Gambar 2.14 Diagram blok konfigurasi dasar pengendali logika *fuzzy* [4]

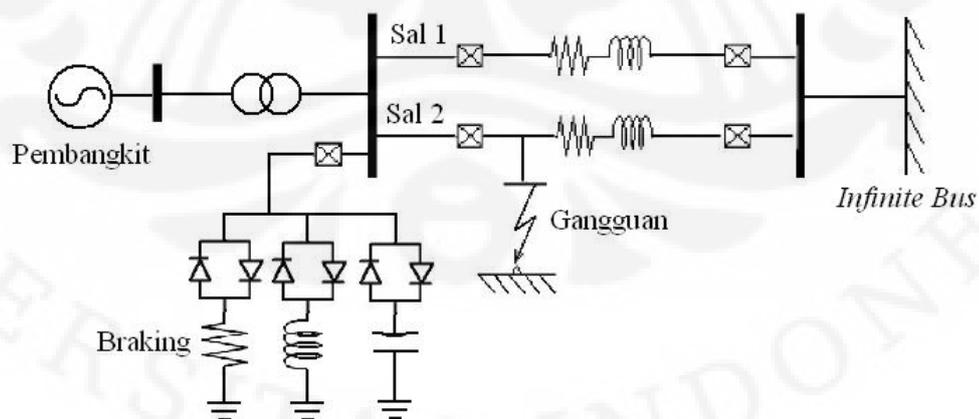
BAB 3

PERANCANGAN MODEL SIMULASI DAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY

Pada bab ini akan dijelaskan perancangan model yang akan digunakan untuk simulasi perbaikan stabilitas peralihan dengan braking resistor, reaktor, dan kapasitor dengan koordinasi pengendali logika *fuzzy*. Simulasi dilakukan dengan bantuan *Simulink Power System* dari perangkat lunak Matlab 7.1.

3.1 PERANCANGAN MODEL SISTEM TENAGA LISTRIK

Model dari sistem tenaga listrik yang digunakan adalah sistem dengan mesin tunggal. Sistem tersebut terdiri dari sebuah generator serempak yang mensuplai jala-jala yang sangat besar, yang didekati dengan sebuah *infinite bus* melalui dua saluran transmisi yang paralel. Sistem *Braking* dihubungkan ke sisi tegangan tinggi dari trafo pembangkit melalui rangkaian *thyristor*. Gangguan diberikan pada saluran transmisi dua. Skema *one line diagram* dari sistem tersebut dapat dilihat pada gambar 3.1



Gambar 3.1 One line diagram dari model sistem

3.1.1 Penjelasan Model Pembangkit

Untuk pembangkit, menggunakan blok mesin serempak dari simulink. Blok mesin serempak ini dapat beroperasi sebagai motor atau generator. Mode operasi dari blok mesin ini ditentukan dari penandaan daya mekaniknya. Jika P_m positif maka mesin akan berfungsi sebagai motor sedangkan jika P_m negatif maka mesin akan berfungsi sebagai generator.

Pengaturan parameter dari mesin yang akan digunakan pada simulink ini dilakukan pada kotak dialog seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.2. Nilai parameter-parameter dan ketentuan-ketentuan yang digunakan pada kotak dialog mesin serempak MATLAB seperti diperlihatkan pada gambar 3.2 didapatkan dari file demo simulink yang menggunakan generator serempak. Pengaturan tersebut juga merupakan pengaturan yang digunakan untuk menjalankan simulasi dalam skripsi ini.

Pengaturan generator agar berjalan dalam keadaan steady-state dilakukan secara otomatis dengan bantuan blok *Power GUI*. Dalam blok ini terdapat pengaturan *load flow and machine initialization* yang berguna untuk mengatur kondisi awal mesin pada saat simulasi dijalankan berdasarkan kondisi beban yang ada pada sistem yang dimodelkan.

Pengaturan yang dilakukan pada mesin untuk simulasi ini adalah:

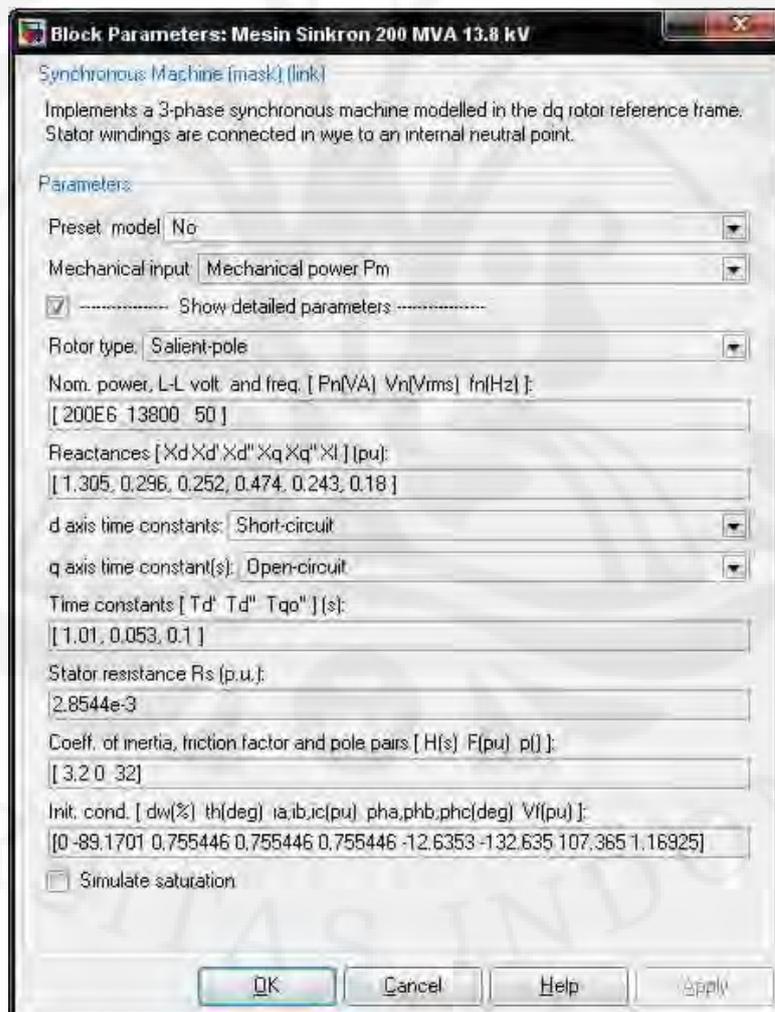
Daya aktif keluaran Generator : 150 MW
Tegangan Terminal (Vrms) : 13800 V

Dari dasar pengaturan yang diinginkan diatas, blok *Power GUI* akan melakukan perhitungan secara otomatis dan mengatur parameter dari mesin agar sesuai dengan yang diinginkan. Hasil dari perhitungan *Power GUI* untuk simulasi ini dapat dilihat pada tabel 3.1

Tabel 3.1 Load Flow dan Inisialisasi Mesin

Nama Mesin	Mesin Sinkron 200 MVA 13.8 kV
Nilai Nominal	200 MVA 13.8 kV rms
Tipe Bus:	P&V generator
Fasa Uan	-19.52°

Uab	13800 Vrms [1 pu] 10.48°
Ubc	13800 Vrms [1 pu] -109.52°
Uca	13800 Vrms [1 pu] 130.48°
Ia	6321.1 Arms [0.7554 pu] -12.64°
Ib	6321.1 Arms [0.7554 pu] -132.63°
Ic	6321.1 Arms [0.7554 pu] 107.36°
Daya Aktif (P):	1.5e+008 W [0.75 pu]
Daya Reaktif (Q):	-1.8109e+007 Vars [-0.0954 pu]
Daya Mekanis:	1.5033e+008 W [0.7516 pu]
Torsi:	1.5312e+007 N.m [0.7516 pu]
Tegangan Eksitasi (Vf):	1.1692 pu

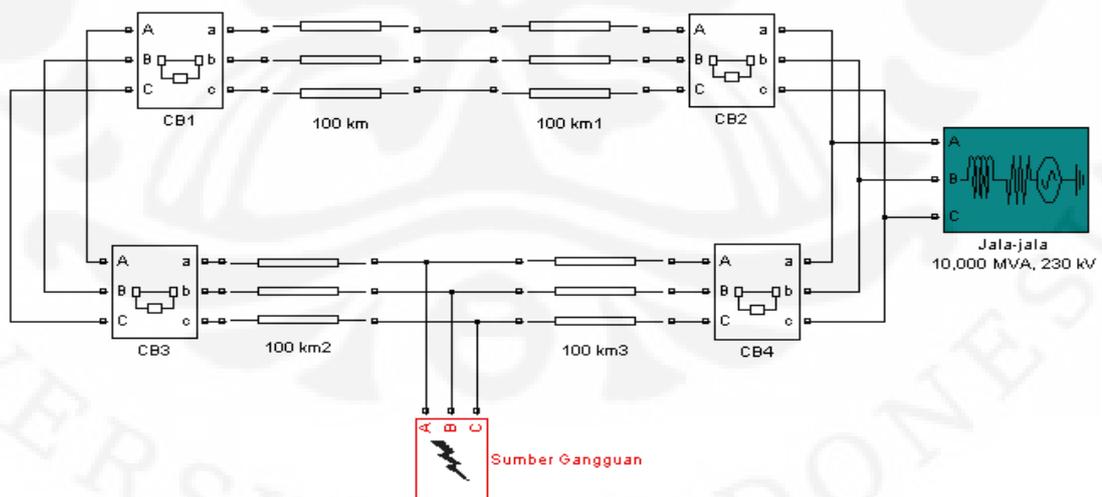


Gambar 3.2 Kotak dialog pengaturan mesin serempak

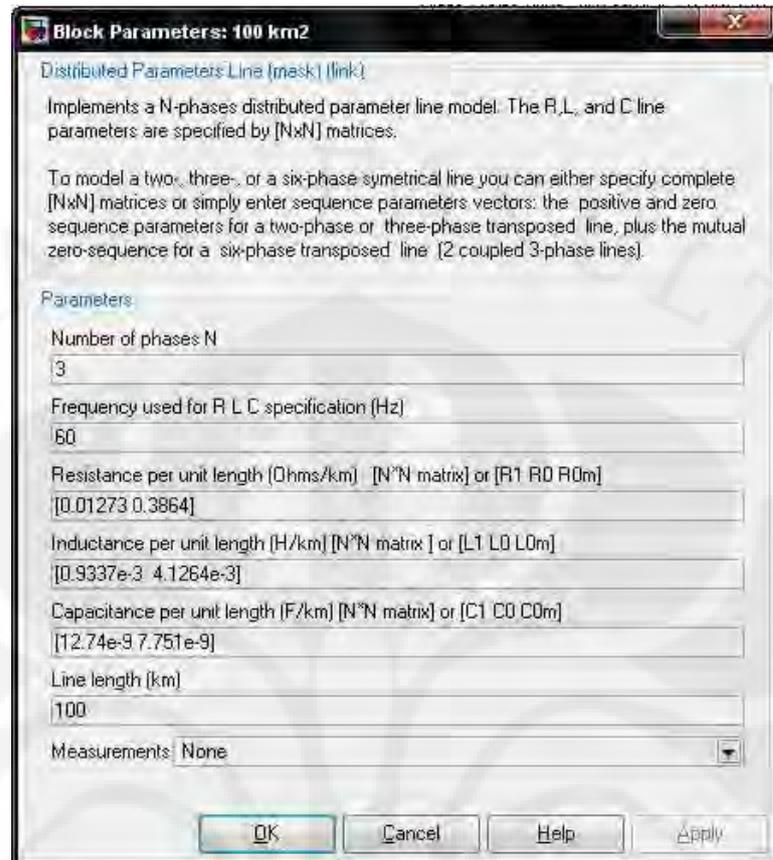
3.1.2 Penjelasan Model Saluran Transmisi

Model saluran transmisi yang digunakan ditunjukkan pada kotak dialog seperti terlihat pada gambar 3.3. Kotak dialog tersebut memperlihatkan pengaturan untuk menentukan parameter terdistribusi dari saluran transmisi seperti jumlah fasa, frekuensi yang digunakan, nilai Resistansi, induktansi dan kapasitansi per kilometer, dan panjang saluran transmisi. Parameter dari saluran transmisi yang digunakan menggunakan pengaturan default dari blok *simulink*. Model dari sistem menggunakan saluran transmisi paralel sepanjang 200 km yang terdiri dari dua saluran 100km.

Pada simulasi ini kedua saluran transmisi dilengkapi dengan *Circuit Breaker* (CB) yang akan berfungsi untuk mengisolasi saluran ketika mengalami gangguan. Karena hanya bertujuan untuk mengetahui pengaruh gangguan pada sistem, proses pemutusan saluran pada simulasi ini tidak menggunakan komponen rele seperti pada system tenaga listrik sesungguhnya, tetapi dilakukan dengan cara manual yaitu dengan menentukan pada detik ke berapa CB akan memutus rangkaian. Dalam simulasi ini gangguan diberikan pada detik ke 0,05 dan CB saluran transmisi membuka pada detik ke 0,15 yang berarti durasi gangguan yang dialami sistem adalah selama 0,1 detik.



Gambar 3.3 Model saluran transmisi paralel



Gambar 3.4 Kotak dialog blok saluran transmisi

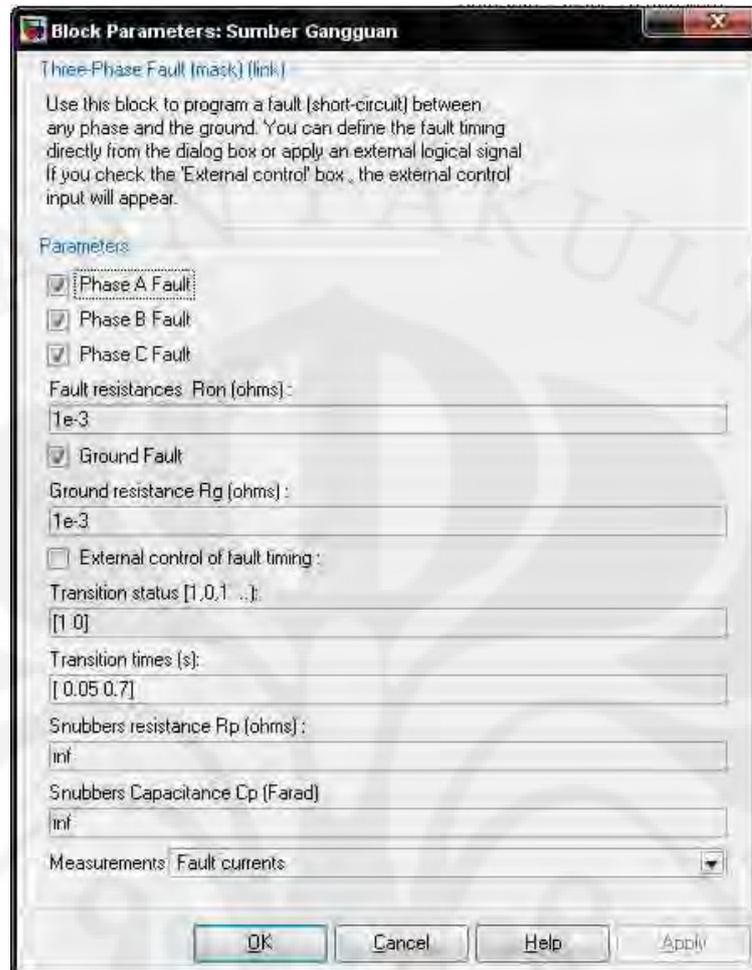
3.1.3 Penjelasan Sumber Gangguan

Sumber pada simulasi ini menggunakan blok *Fault Generator* dari simulink. Pada blok ini, dapat ditentukan gangguan seperti apa yang akan diberikan ke sistem, yaitu bisa berupa:

- Gangguan Antar fasa (1 fasa, 2 fasa, atau 3 fasa)
- Gangguan fasa ke tanah (1 fasa, 2 fasa, atau 3 fasa)

Selain itu pada blok ini juga ditentukan lamanya waktu gangguan. Kotak dialog untuk pengaturan yang digunakan pada simulasi ini dapat dilihat pada gambar 3.4.

Pada simulasi ini, digunakan gangguan tiga fasa ke tanah, dimana gangguan diberikan selama 0,1 detik sebelum pada akhirnya saluran yang mengalami gangguan diisolasi oleh *circuit breaker*.



Gambar 3.5 Kotak dialog *fault generator*

3.2 PERANCANGAN MODEL BRAKING

Pengereman Dinamis (*Dymanic Braking*) menggunakan konsep dengan menggunakan beban listrik buatan saat peralihan gangguan untuk meningkatkan daya keluaran dari generator dan kemudian mengurangi percepatan rotor [5]

Sistem *Braking* dihubungkan ke sisi tegangan tinggi dari trafo pembangkit melalui rangkaian *thyristor*. Braking pada simulasi ini dimodelkan sebagai beban tiga fasa yang masing adalah:

- Beban daya aktif untuk Resistor
- Beban daya reaktif untuk reaktor
- Beban daya reaktif positif untuk kapasitor

Representasi persamaan dinamika sistem dengan pendekatan persamaan ayunan generator diberikan oleh [6]:

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

Dengan :

P_m = Input daya mekanis

P_e = Daya keluaran elektrik

P_b = Daya yang diserap oleh *braking* resistor

δ = Posisi angular rotor

M = Inersia Generator

D = Koefisien Peredam

Dengan memasukan *braking* resistor keluar dan masuk rangkaian, maka besarnya daya yang diserap oleh *braking* resistor (P_b) dapat bervariasi antara maksimum dan nol. Diasumsikan pada waktu tertentu *braking* resistor dan kapasitor atau *shunt* reaktor akan dimasukan.

Pensaklaran masuk resistor adalah *load injection* yang akan menaikkan daya keluaran elektrik dari generator. *Braking* resistor dapat dipandang sebagai pemberian beban secara cepat untuk menyerap energi transien yang berlebih yang disebabkan oleh gangguan. Dengan dimasukkannya resistor ke dalam sistem maka akan mengurangi percepatan pada rotor generator.

Kemudian *pensaklaran* kapasitor *shunt* digunakan untuk menyuplai daya reaktif meningkatkan tegangan pada suatu daerah lokal. Kapasitor *shunt* ini digunakan pada banyak bagian sistem dan dengan berbagai jenis ukurannya [5]. Hal tersebut akan memberikan keuntungan bagi kestabilan.

Sedangkan *pensaklaran shunt* reaktor berfungsi untuk mengurangi daya keluaran elektrik dengan menekan tegangan terminal ketika rotor mengalami perlambatan [7]. Dengan demikian dapat diketahui bahwa dengan memasukan *shunt* reaktor ke dalam sistem akan mengurangi perlambatan pada rotor generator.

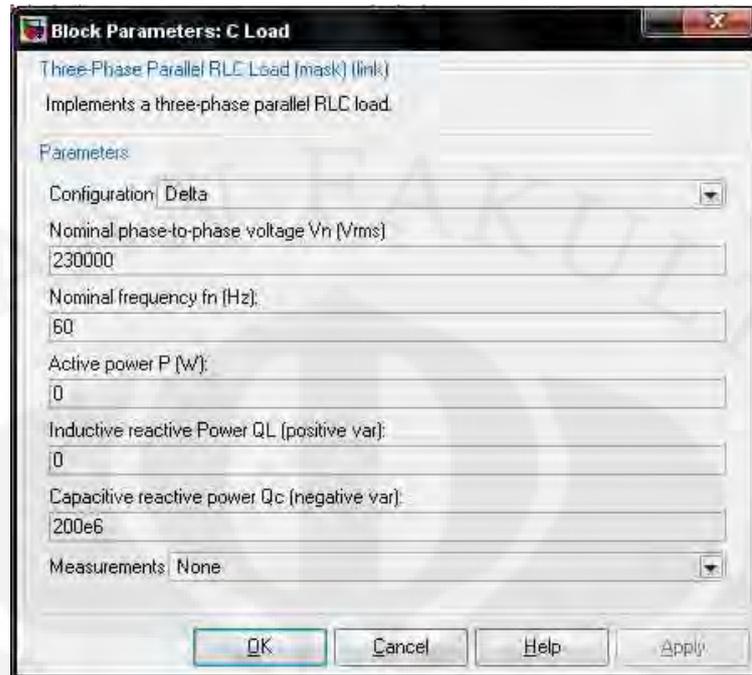
Koordinasi ketiga komponen tersebut akan memberikan perbaikan stabilitas yang lebih baik dibandingkan jika hanya menggunakan salah satu komponen saja dimana ketiga komponen tersebut akan bekerja saling melengkapi untuk mengembalikan kestabilan sistem.



Gambar 3.6 Kotak dialog pengaturan untuk beban R



Gambar 3.7 Kotak dialog pengaturan untuk beban L



Gambar 3.8 Kotak dialog pengaturan untuk beban C

3.4 PERANCANGAN *THYRISTOR*

Rangkaian *thyristor* digunakan untuk pensaklaran keluar dan masuk dari sistem braking. *Thyristor* sendiri adalah komponen elektronika daya yang dapat berfungsi sebagai mekanisme pensaklaran yang mekanismenya diatur dengan memvariasikan sinyal pemicu pada gate *thyristor*. Selain itu *thyristor* dapat memberikan fungsi pensaklaran dengan phase control dimana dengan mengatur sudut penyalan (α) dapat diatur besarnya arus yang melalui *thyristor*.

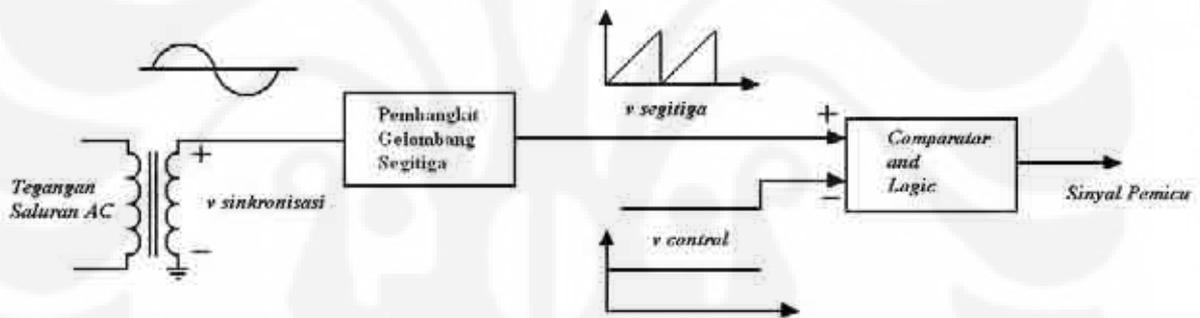
Sebagai pensaklaran untuk sistem *braking*, penggunaan *thyristor* mempunyai keuntungan yaitu besarnya *braking* yang dimasukan ke dalam sistem dapat ditentukan dengan menentukan besarnya sudut penyalan (α), sehingga dapat mencegah terjadinya *braking* yang berlebihan yang dapat mengakibatkan peredaman berlebihan (*overdamped*). Prinsip kerja dari rangkaian pulse generator akan dijelaskan pada bagian berikut.

Untuk menghasilkan sudut penyalan yang tepat bagi *thyristor* digunakan rangkaian *pulse generator*. Dalam rangkaian tersebut terdapat pembangkit gelombang segitiga yang telah disinkronisasi dengan tegangan saluran AC, kemudian gelombang segitiga yang telah disinkronisasi tersebut dikurangi dengan

tegangan pengaturan $v_{control}$ yang akan menghasilkan gelombang segitiga dengan nilai puncak yang berbeda-beda. Kemudian, gelombang segitiga tersebut akan melewati rangkaian logika dimana nilai keluaran akan bernilai 1 jika masukan lebih besar dari 0. Keluaran rangkaian logika tersebut akan berupa gelombang kotak (*square wave*) dengan waktu yang berbeda-beda yang akan menentukan besarnya sudut penyalan yang akan dihasilkan oleh rangkaian *pulse generator*.

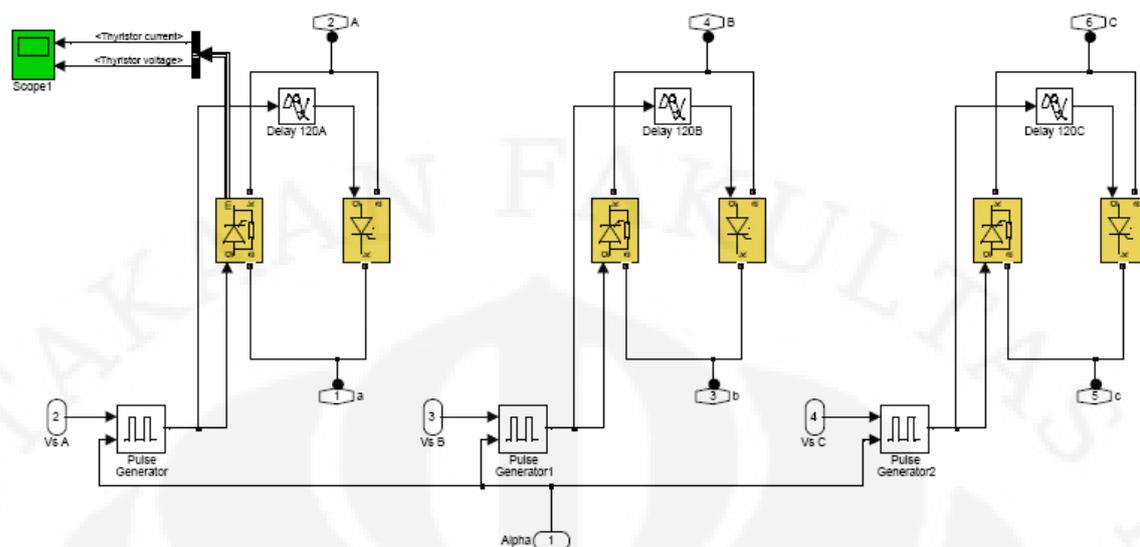
Secara matematis, besarnya sudut penyalan (α) dapat diatur dengan menentukan besarnya nilai tegangan pengaturan ($V_{control}$) dan nilai puncak dari gelombang segitiga yang telah disinkronisasi [8].

$$\alpha^\circ = 180^\circ \frac{v_{control}}{v_{segitiga}} \quad (3.2)$$



Gambar 3.9 Rangkaian Pemacu *Thyristor* [8]

Pada simulasi ini digunakan rangkaian *thyristor* tiga fasa agar dapat melakukan pensaklaran untuk sistem *braking* yang merupakan beban tiga fasa. Gambar rangkaian *thyristor* tiga fasa dapat dilihat pada gambar 3.10. Seperti terlihat pada gambar, setiap fasa mempunyai *thyristor* yang dipasang secara *anti-parallel* agar dapat melewati arus bolak-balik. Selain itu sinkronisasi juga dilakukan per fasa.



Gambar 3.10 Rangkaian model *thyristor* untuk saluran 3 fasa



Gambar 3.11 kotak dialog pengaturan *Thyristor*

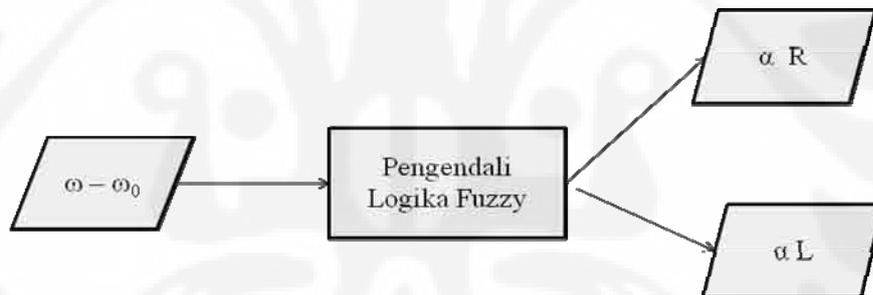
3.5 PERANCANGAN PENGENDALI LOGIKA FUZZY

Dalam usaha untuk menstabilkan sistem yang telah kehilangan kestabilannya kadang diperlukan reaksi yang sangat cepat dalam membuat sistem kembali stabil. Hal ini disebabkan karena sistem saling terkoneksi satu dengan

yang lain maka walaupun gangguan berasal dari suatu pembangkit namun pembangkit lain juga akan merasakan adanya gangguan dalam sistem mereka. Agar sistem tidak menjadi terganggu semuanya dan secara langsung juga akan menghindari terjadinya *black out* maka waktu dari ayunan sudut daya yang sedang berosilasi juga harus dibuat sesingkat mungkin. Untuk memenuhi hal tersebut diperlukan suatu kendali otomatis sebagai penunjang perbaikan sistem tenaga listrik. Pengendali tersebut antara lain adalah pengendali logika *fuzzy*.

Pengendali logika *fuzzy* ini telah banyak digunakan baik dalam bidang tenaga listrik maupun dalam bidang teknik kendali. Karakter dari pengendali logika *fuzzy* ini sangat cocok dengan karakteristik dari fenomena stabilitas peralihan dimana keduanya akan membuat linier sistem yang sebenarnya tidak linier agar lebih mudah dalam menganalisis fenomena tersebut.

Secara umum pengendali logika *fuzzy* yang digunakan untuk meningkatkan kestabilan sistem tenaga listrik adalah sebagai berikut:



Gambar 3.12 Blok diagram dari pengendali logika *fuzzy*

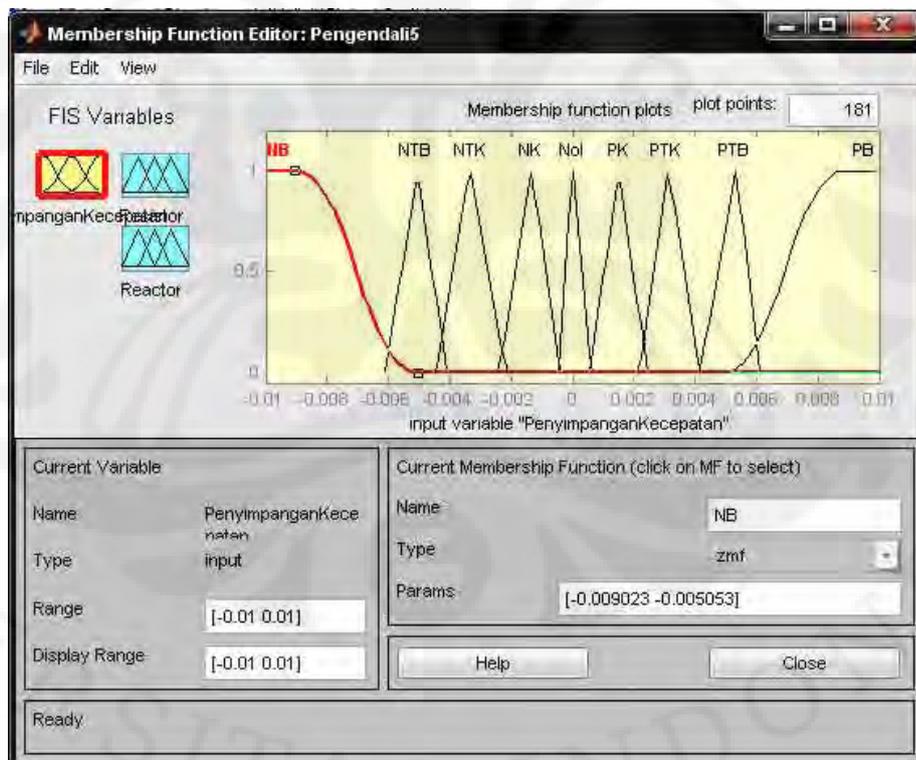
Langkah-langkah dalam merancang pengendali logika *fuzzy* untuk koordinasi *braking* akan dijelaskan pada bagian berikut.

3.5.1 Fuzzifikasi

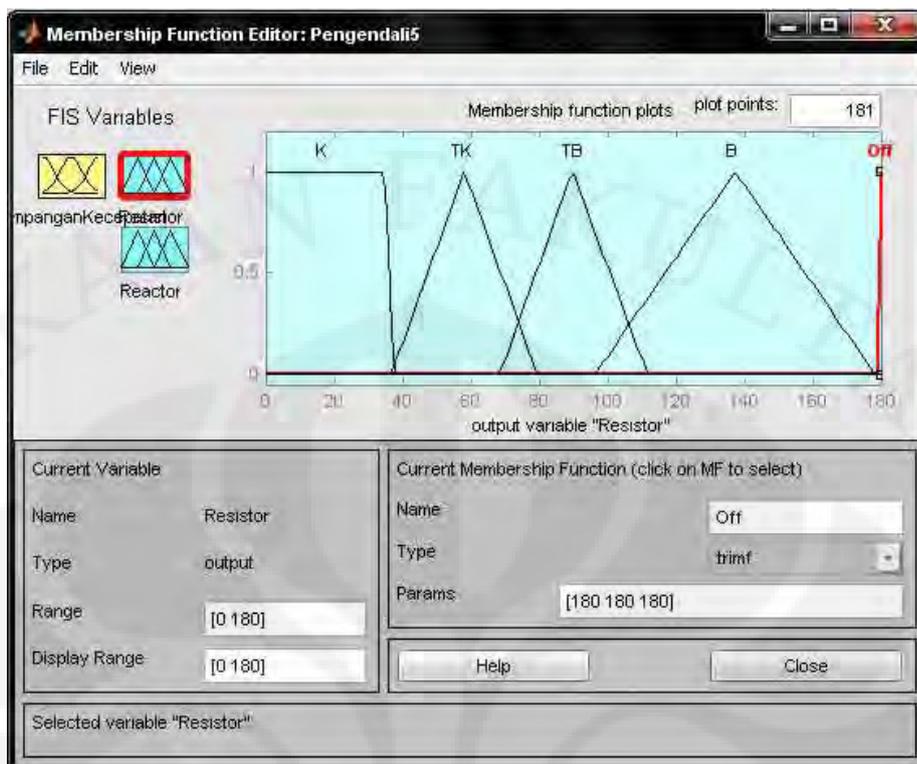
Langkah awal dalam merancang pengendali logika *fuzzy* adalah menentukan masukan (*input*) untuk pengendali logika *fuzzy*. Masukan yang digunakan dalam pengendali koordinasi *braking* ini adalah penyimpangan kecepatan sudut dari rotor generator ($\Delta\omega$).

Langkah selanjutnya adalah menentukan keluaran (*output*) dari pengendali logika *fuzzy*. Pada pengendali logika *fuzzy* untuk koordinasi *braking* ini terdapat dua keluaran yaitu sudut penyalaan (α) untuk resistor dan sudut penyalaan untuk reaktor. Untuk kapasitor, pensaklarannya tidak menggunakan sudut penyalaan, tetapi hanya *on/off* saja.

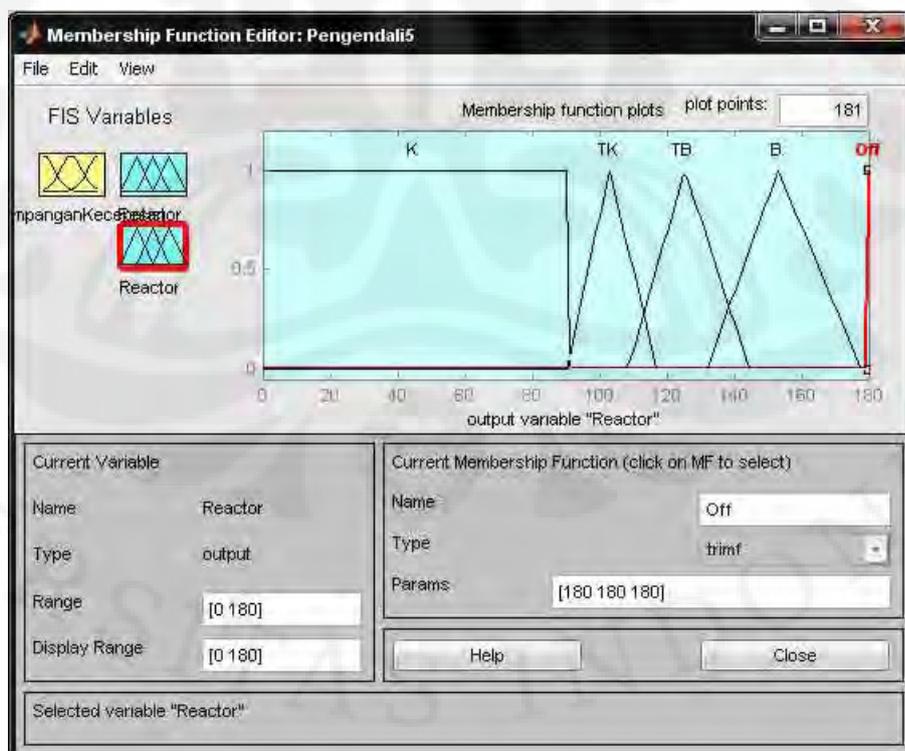
Kemudian ditentukan fungsi keanggotaan (*membership function*) untuk merepresentasikan masukan dan keluaran dalam bentuk *fuzzy set*, Fungsi keanggotaan yang digunakan adalah fungsi segitiga. Pada pengendali ini representasi *fuzzy* dalam bentuk variabel linguistik untuk masukan penyimpangan kecepatan generator adalah PB (positif besar), PTB (positif tengah besar), PTK (positif tengah kecil), PK (positif kecil), nol, NK (negatif kecil), NTK (negatif tengah kecil), NTB (negatif tengah besar), NB (negatif besar). Sedangkan representasi untuk keluaran sudut penyalaan (α) adalah K (kecil), TK (tengah keci), TB (tengah besar) dan Off.



Gambar 3.13 Fuzzifikasi untuk $\Delta\omega$.



Gambar 3.14 Fuzzifikasi untuk αR



Gambar 3.15 Fuzzifikasi untuk αL

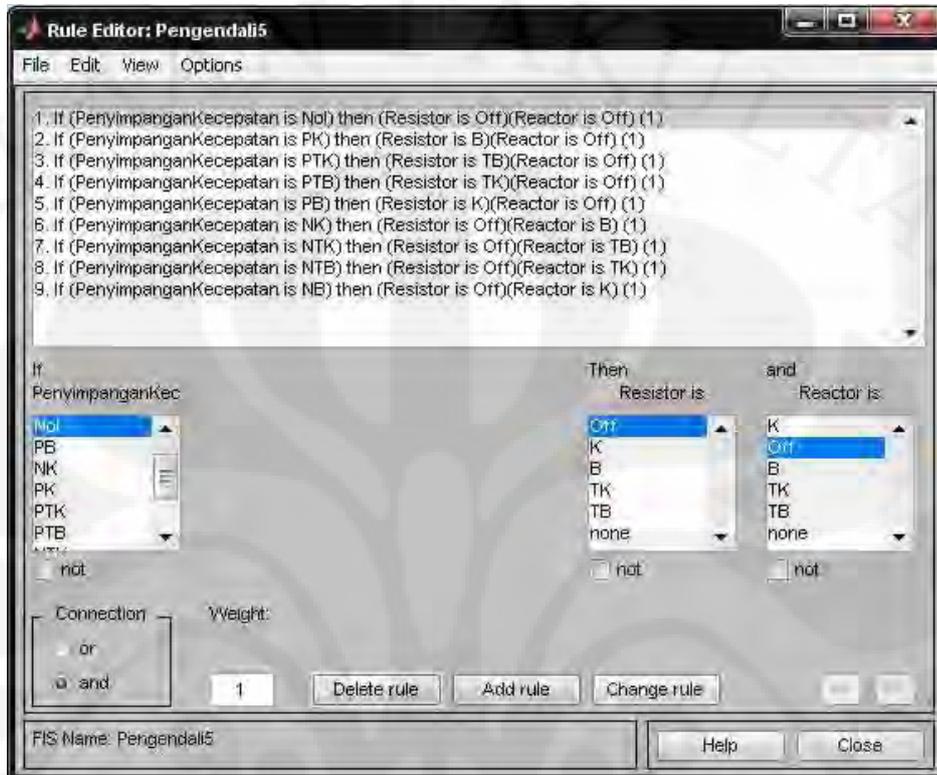
3.5.2 Aturan Fuzzy

Setelah ditentukan masukan dan keluaran dari pengendali selanjutnya adalah menentukan aturan *fuzzy (rules)* yang merupakan dasar pengetahuan dari pengendali untuk menentukan respon atas perubahan yang terjadi pada inputnya. Berikut adalah aturan yang digunakan pada pengendali:

- *If (PenyimpanganKecepatan is PB) then (Resistor is K) (Reactor is Off) (1)*
- *If (PenyimpanganKecepatan is PTB) then (Resistor is TK) (Reactor is Off) (1)*
- *If (PenyimpanganKecepatan is PTK) then (Resistor is TB) (Reactor is Off) (1)*
- *If (PenyimpanganKecepatan is PK) then (Resistor is B) (Reactor is Kecil) (1)*
- *If (PenyimpanganKecepatan is NB) then (Resistor is Off) (Reactor is K) (1)*
- *If (PenyimpanganKecepatan is NTB) then (Resistor is Off) (Reactor is TK) (1)*
- *If (PenyimpanganKecepatan is NTK) then (Resistor is Off) (Reactor is TB) (1)*
- *If (PenyimpanganKecepatan is NK) then (Resistor is Off) (Reactor is B) (1)*
- *If (PenyimpanganKecepatan is Nol) then (Resistor is Off) (Reactor is Off) (1)*

Aturan *fuzzy* diatas didasarkan oleh bahwa ketika sistem mengalami gangguan, rotor mengalami percepatan dimana kecepatan sudut rotor akan menjadi semakin besar sehingga penyimpangan kecepatan menjadi positif. Pada kondisi tersebut dilakukan pensaklaran masuk *braking* resistor yang akan meningkatkan daya keluaran elektris dari generator sehingga mengurangi percepatan dari rotor. Pada kondisi Ini *shunt* reaktor dalam kondisi off. Pada simulasi ini pensaklaran kapasitor dilakukan bersama-sama dengan *braking*

resistor, tetapi pada kapasitor tidak dilakukan phase control yang berarti tidak menggunakan variasi sudut penyalan, hanya *on* atau *off* saja.



Gambar 3.16 Aturan fuzzy

Sedangkan ketika rotor mengalami perlambatan hingga kecepatan rotor menjadi lebih lambat yang berarti penyimpangan kecepatan menjadi negatif maka akan dilakukan pensaklaran masuk shunt reaktor yang akan mengurangi daya keluaran listrik generator sehingga perlambatan generator akan berkurang. Pada kondisi ini *braking* resistor dalam kondisi off.

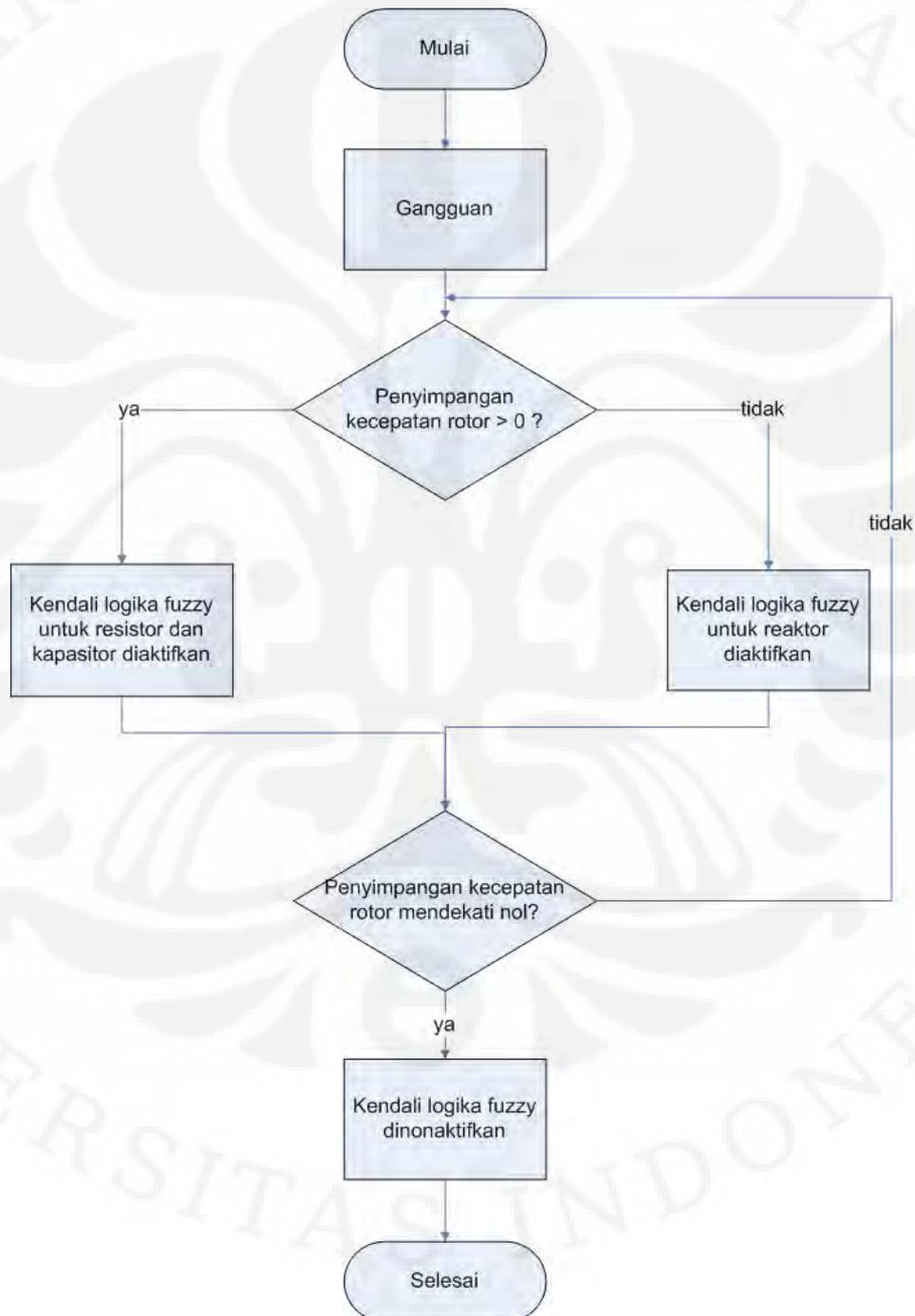
Ketika sistem masih dalam keadaan *steady-state* atau telah kembali ke keadaan stabilnya maka semua komponen perbaikan stabilitas diputuskan (Off) dari sistem.

3.5.3 Defuzzifikasi

Seperti telah dijelaskan pada bab sebelumnya, defuzzifikasi merupakan proses untuk mengkonversi dari himpunan *fuzzy* menjadi himpunan *crisp* yang akan diterpkan menjadi sinyal kendali. Metode yang digunakan untuk

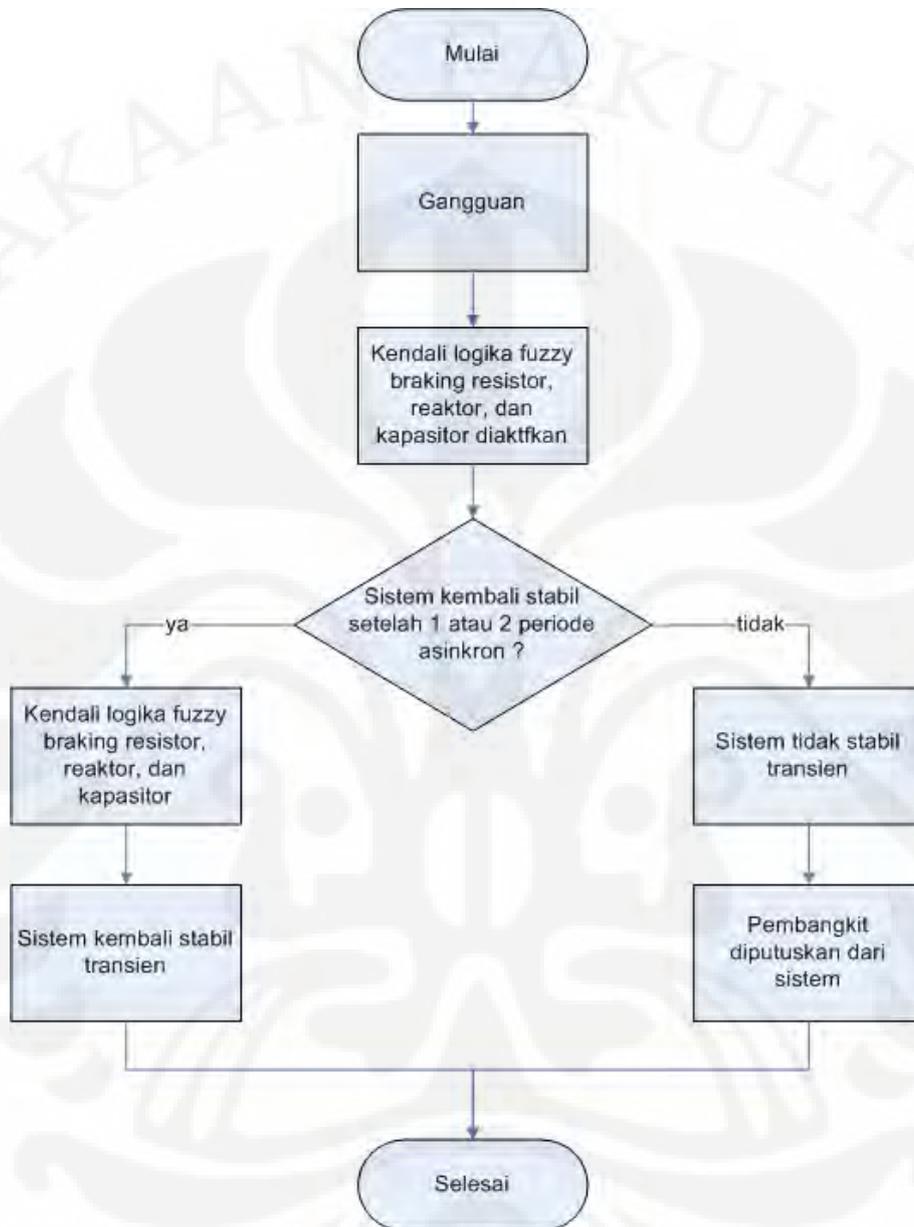
defuzzifikasi. Pada pengendali ini metode yang digunakan adalah *centroid* atau disebut juga sebagai metode pusat area, dimana hasil dari defuzzifikasinya adalah titik pusat area dari fungsi keanggotaan keluarannya.

Hasil keluaran pengendali *fuzzy* ini berupa sudut penyalan yang dihubungkan dengan *thyristor* sebagai acuan berapa besar sudut penyalan yang akan digunakan pada *thyristor*.



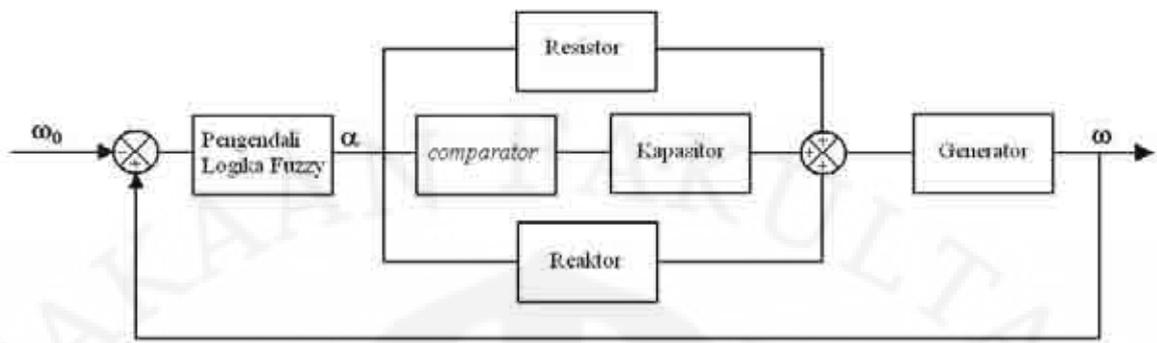
Gambar 3.17 Diagram alir dari pengendalian *fuzzy*

Untuk diagram alir secara keseluruhan perbaikan stabilitas dengan *braking* resistor, reaktor, dan kapasitor ditunjukkan pada gambar 3.18



Gambar 3.18 Diagram alir perbaikan stabilitas dengan *braking* resistor, reaktor, dan kapasitor

Sedangkan diagram blok dari pengendali logika *fuzzy*, sistem braking dan keseluruhan sistem ditunjukkan pada gambar 3.19



Gambar 3.19 Diagram blok pengendalian sistem dengan logika fuzzy

BAB 4

SIMULASI DAN ANALISIS

4.1 UMUM

Pada bab ini akan disimulasikan kondisi dari pembangkit saat sistem mengalami gangguan yang berskala besar dan menyebabkan pembangkit akan mengalami masa peralihan. Untuk simulasi kasus ini digunakan bantuan komputer dengan menggunakan program untuk simulasi perangkat lunak MATLAB V7.1. Model yang digunakan adalah model yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya. Iterasi yang digunakan adalah *15s stiff variable step*.

Hasil yang diperoleh dari simulasi tersebut untuk melakukan analisis adalah:

- Grafik daya listrik terhadap waktu
- Grafik kecepatan putar rotor terhadap waktu
- Grafik penyimpangan sudut rotor terhadap waktu
- Sudut penyalakan thyristor

Pengambilan data simulasi dilakukan dengan variasi lamanya waktu gangguan. Perhatian utama pengamatan pada simulasi ini adalah tanggapan sistem atas gangguan yang dialami oleh sistem tersebut dengan cara membandingkan bila sistem hanya menggunakan braking resistor saja dengan sistem yang menggunakan braking resistor, reaktor dan kapasitor. Selain itu, juga akan dibandingkan sistem yang tidak menggunakan perbaikan dengan sistem yang dilengkapi dengan braking resistor, *shunt* reaktor, dan *shunt* kapasitor dengan koordinasi pengendali logika *fuzzy*.

Untuk variasi lamanya gangguan pada simulasi ini antara lain adalah ketika sistem mengalami gangguan kurang dari waktu pemutusan kritisnya dan ketika sistem mengalami gangguan dengan durasi di sekitar waktu pemutusan kritisnya.

Waktu pemutusan kritis untuk sistem yang digunakan ini adalah 0,3699 s. Nilai ini didapatkan melalui hasil simulasi yang dilakukan dengan cara memvariasikan durasi gangguan yang meningkat secara bertahap. Dengan kata lain dengan melakukan *trial-and-error*.

Berdasarkan hal diatas maka studi kasus yang akan dilakukan pada simulasi adalah :

1. Simulasi perbaikan akibat gangguan tiga fasa ke tanah dengan durasi 0,15 s

Simulasi dengan durasi gangguan 0,15 s ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perbaikan dengan braking resistor, reaktor, dan kapasitor jika dibandingkan dengan braking resistor saja.

2. Simulasi perbaikan akibat gangguan tiga fasa ke tanah dengan durasi 0,25 s

Simulasi dengan gangguan 0,25 s ini bertujuan untuk melihat perbandingan tanggapan sistem tanpa perbaikan dengan sistem yang telah menggunakan braking dengan durasi gangguan lebih kecil dari waktu pemutusan kritisnya

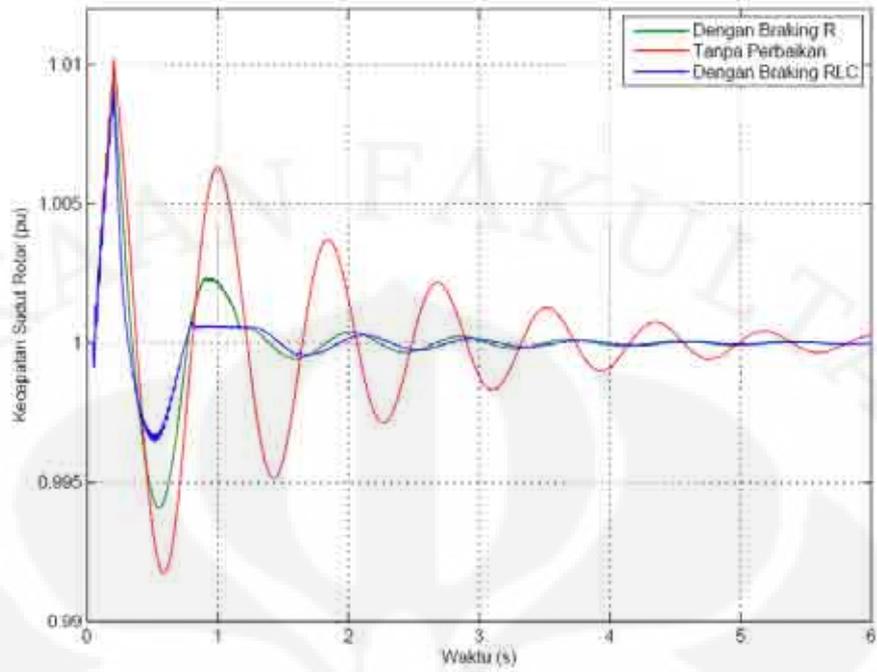
3. Simulasi perbaikan akibat gangguan tiga fasa ke tanah dengan durasi 0,38 s

Simulasi dengan durasi gangguan 0.38 s ini bertujuan untuk melihat perbandingan tanggapan sistem tanpa perbaikan dengan sistem yang telah menggunakan braking dengan durasi yang sedikit lebih besar dari waktu pemutusan kritis awalnya.

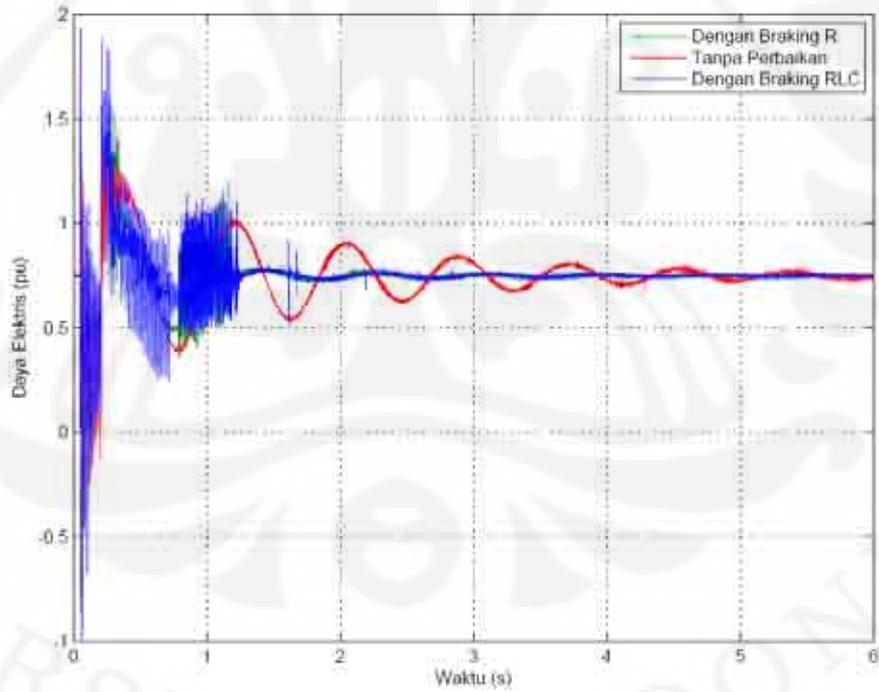
4.2 SIMULASI

4.2.1 Kasus 1 : Gangguan tiga fasa ke tanah dengan durasi 0.15 s.

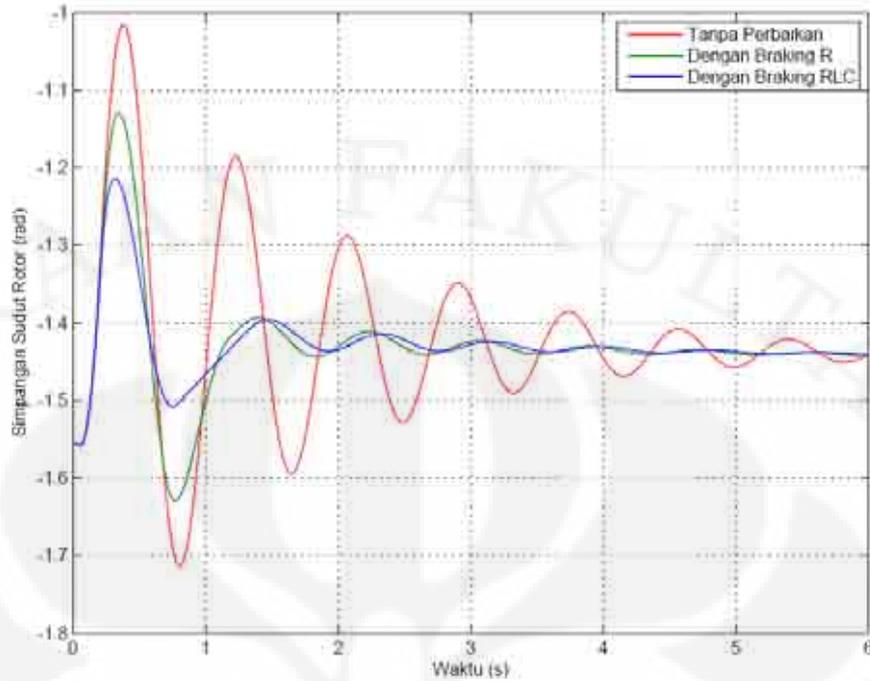
Dari hasil simulasi gangguan tiga fasa ke tanah selama 0,15 s didapat grafik seperti ditunjukkan pada gambar 4.1, gambar 4.2, dan gambar 4.3.



Gambar 4.1 Grafik perbandingan kecepatan rotor tanpa perbaikan, braking R dan braking RLC periode gangguan 0,15 s



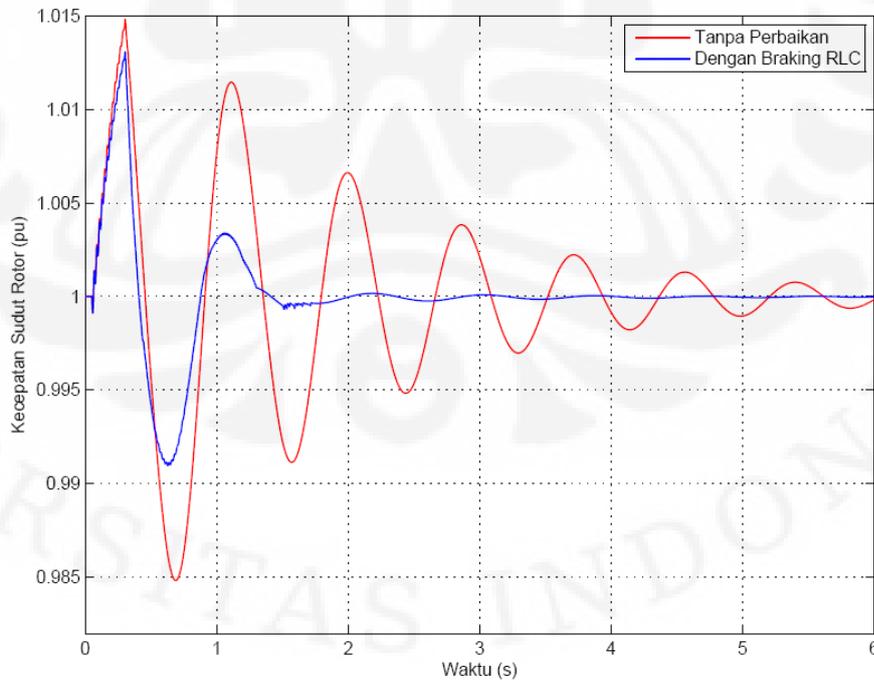
Gambar 4.2 Grafik perbandingan daya listrik tanpa perbaikan, braking R dan braking RLC periode gangguan 0,15 s



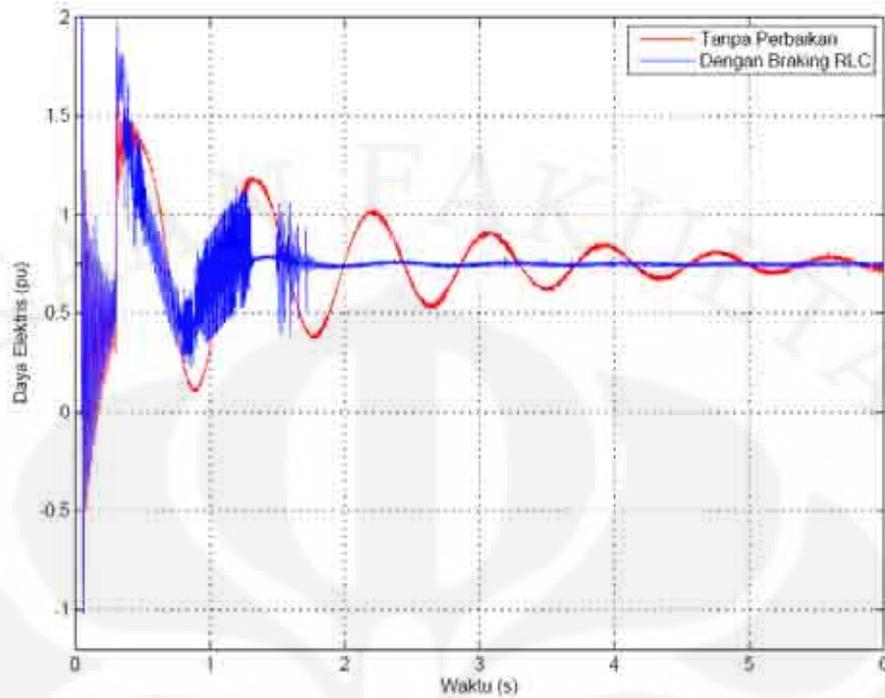
Gambar 4.3 Grafik perbandingan simpangan sudut rotor tanpa perbaikan, braking R dan braking RLC periode gangguan 0,15 s

4.2.2 Kasus 2 : Gangguan tiga fasa ke tanah dengan durasi 0,15 s

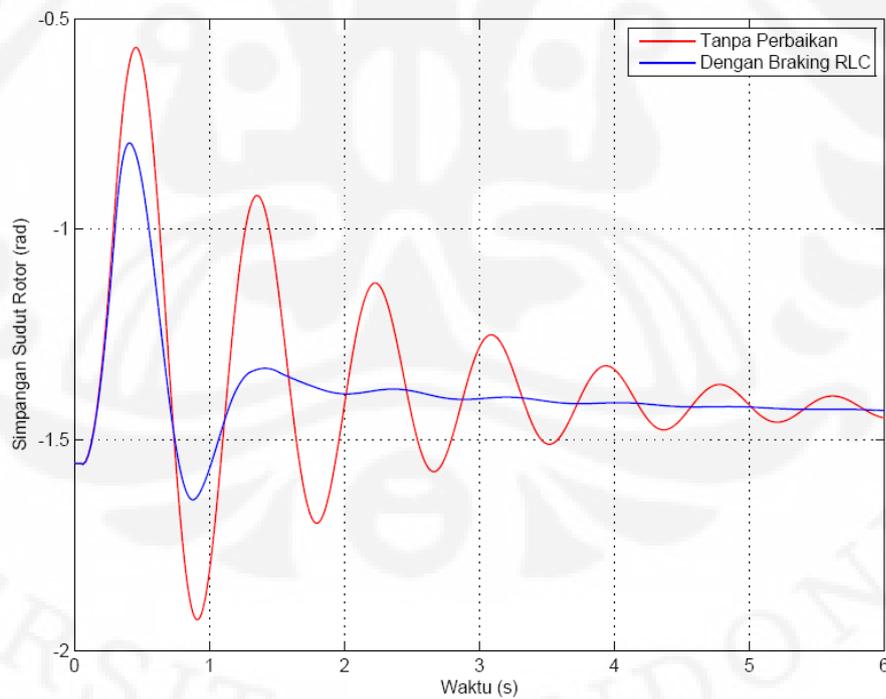
Dari hasil simulasi gangguan tiga fasa ke tanah selama 0,15 s didapat grafik seperti ditunjukkan pada gambar 4.4, gambar 4.5, dan gambar 4.6.



Gambar 4.4 Grafik perbandingan kecepatan rotor sistem tanpa perbaikan dan dengan braking RLC periode gangguan 0,25 s



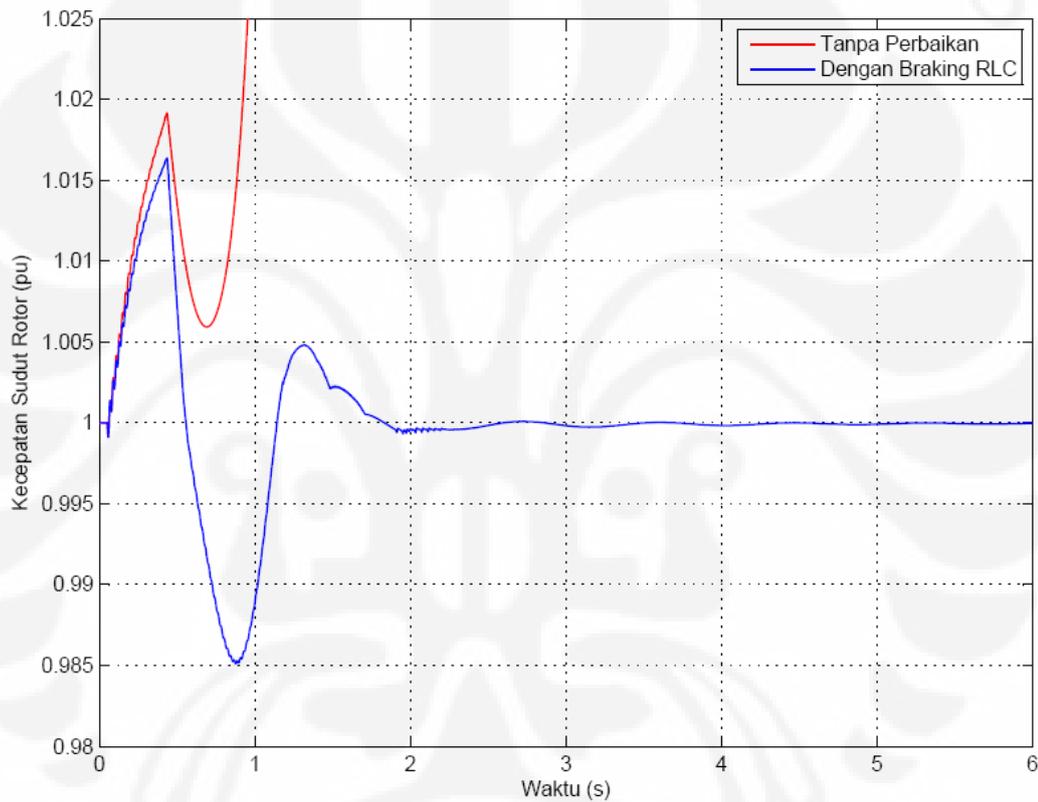
Gambar 4.5 Grafik perbandingan daya listrik sistem tanpa perbaikan dan dengan braking RLC periode gangguan 0,25 s



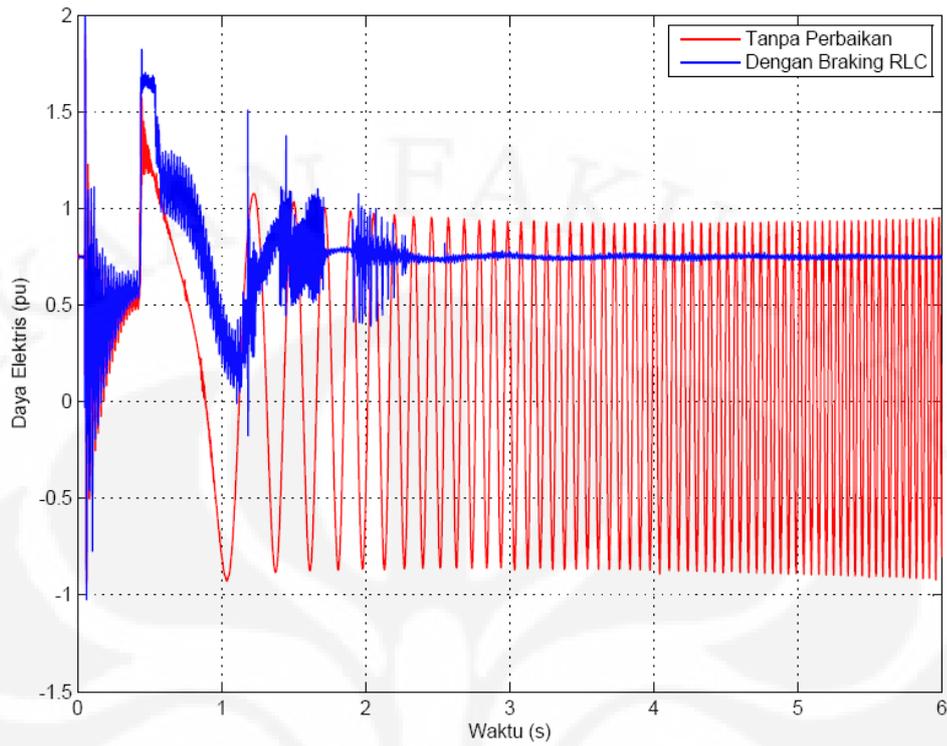
Gambar 4.6 Grafik perbandingan simpangan sudut rotor sistem tanpa perbaikan dan dengan braking RLC periode gangguan 0,25 s

4.2.3 Kasus 2 : Gangguan tiga fasa ke tanah dengan durasi 0,38 s

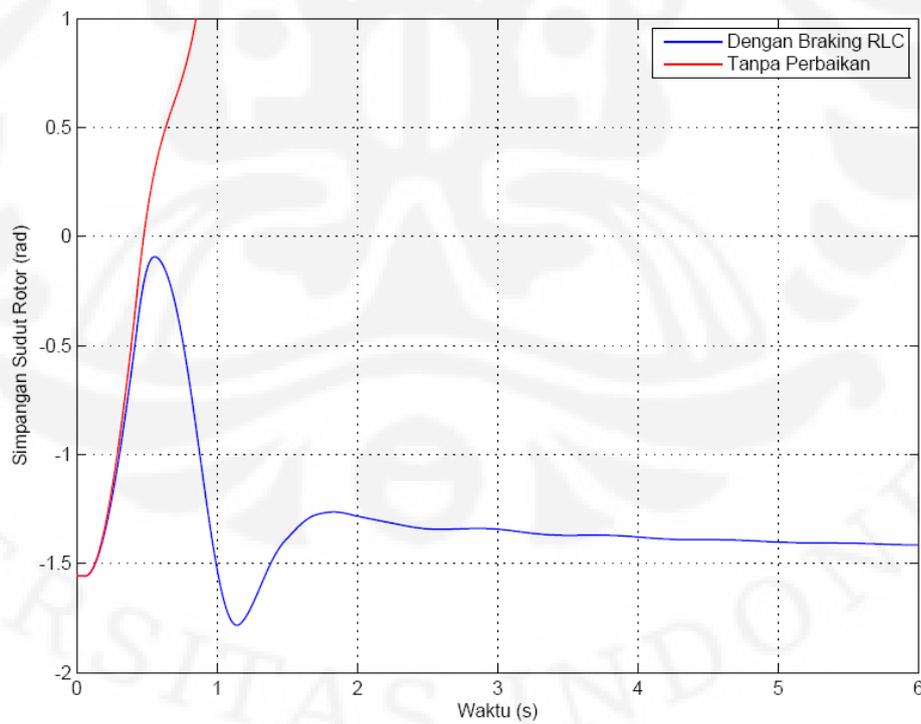
Dari hasil simulasi gangguan tiga fasa ke tanah selama 0,38 s dimana gangguan tersebut lebih besar dari waktu pemutusan kritisnya, didapat grafik seperti ditunjukkan pada gambar 4.7, gambar 4.8, dan gambar 4.9, masing-masing untuk grafik perbandingan kecepatan, daya keluaran elektris, dan sudut simpangan rotor generator.



Gambar 4.7 Grafik perbandingan kecepatan rotor sistem tanpa perbaikan dan dengan braking RLC periode gangguan 0,38 s

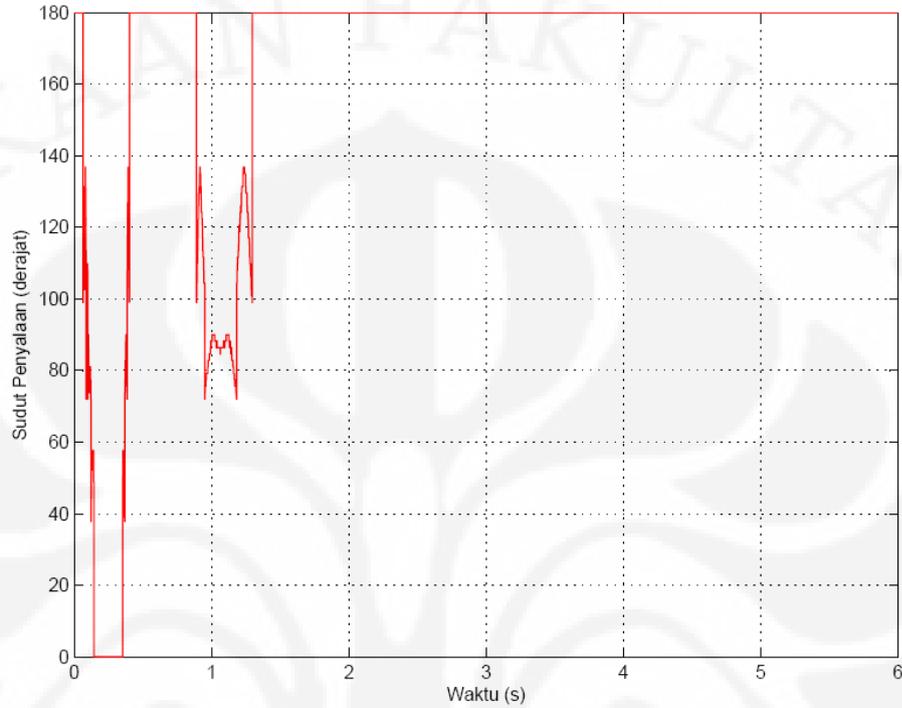


Gambar 4.8 Grafik perbandingan daya listrik sistem tanpa perbaikan dan dengan braking RLC periode gangguan 0,38 s

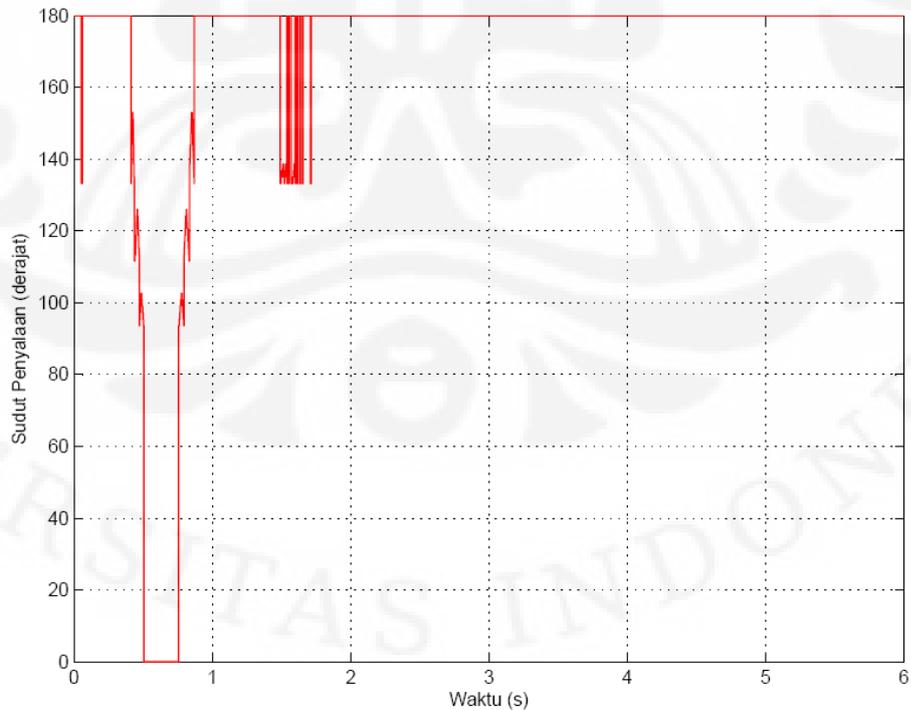


Gambar 4.9 Grafik perbandingan simpangan sudut rotor sistem tanpa perbaikan dan dengan braking RLC periode gangguan 0,38 s

Selain itu dari hasil simulasi tersebut juga diambil grafik sudut penyalan yang digunakan untuk pensaklaran resistor dan reaktor yang ditunjukkan pada gambar 4.10 dan gambar 4.11



Gambar 4.10 Grafik sudut penyalan resistor untuk durasi gangguan 0.38 s



Gambar 4.11 Grafik sudut penyalan reaktor untuk durasi gangguan 0.38 s

4.3 ANALISIS

Dari simulasi yang dilakukan dengan menggunakan simulink dari MATLAB V7.1, dengan memberikan variasi durasi gangguan. Diperoleh waktu kritis untuk metode *trial and error* sebesar 0.3699 s untuk gangguan tiga fasa ke tanah. Gangguan yang diberikan pada simulasi ini hanya gangguan tiga fasa ke tanah. Hal tersebut karena simulasi ini bertujuan untuk melihat tanggapan sistem dengan ataupun tanpa perbaikan setelah terkena gangguan yang cukup besar hingga stabilitas sistem terganggu, dalam hal ini lebih tepat digunakan gangguan tiga fasa. Selain karena alasan tersebut, untuk 2 variasi jenis gangguan yang lain (1 fasa ke tanah dan 2 fasa ke tanah) sistem cenderung tetap stabil walaupun terkena gangguan yang cukup lama. Hal ini terjadi karena pada gangguan 1 fasa ke tanah dan 2 fasa ke tanah sebenarnya aliran daya listrik tetap ada karena hanya satu atau dua fasa saja yang mengalami gangguan sedangkan untuk fasa yang tidak terkena gangguan masih dapat mengalirkan daya listrik walaupun besarnya menjadi tidak sesuai dengan kondisi waktu sebelum adanya gangguan.

4.3.1 Analisis Kasus 1

Pada kasus ini dapat dilihat bahwa penambahan sistem braking dengan komponen reaktor dan kapasitor dapat meningkatkan kemampuan sistem untuk kembali ke tunaknya dengan lebih cepat. Perbedaan dengan sistem yang hanya memiliki komponen braking resistor saja adalah, sistem braking dengan braking resistor saja hanya memperbaiki dalam hal ini meredam ayunan pada saat rotor mengalami percepatan saja.

Sedangkan setelah mengalami percepatan, seperti dijelaskan pada bab sebelumnya dalam persamaan ayunan, rotor akan mengalami delesi akibat daya keluaran listrik dari generator menjadi lebih besar dari daya mekanis yang diberikan ke turbin generator. Ketika hal ini terjadi maka peran dari reaktor akan diperlukan, karena dengan pensaklaran masuk reaktor maka tegangan terminal dari generator akan mengecil, sehingga daya keluaran listrik dari sistem akan menjadi lebih kecil dan pada akhirnya akan mengakibatkan perlambatan yang dialami rotor akan berkurang.

Kemudian pengaruh dilakukannya pensaklaran kapasitor yang bersamaan dengan braking resistor antara lain adalah untuk menaikkan tegangan terminal keluaran generator. Karena dengan meningkatnya tegangan terminal ini maka kerja dari *braking* resistor akan menjadi lebih baik, dengan meningkatnya tegangan terminal maka beban buatan yang dihasilkan oleh resistor akan lebih optimal.

4.3.2 Analisis Kasus 2

Pada simulasi ini, walaupun waktu gangguan yang diberikan terbilang kecil, yaitu jauh lebih kecil dari waktu pemutusan kritis, pensaklaran *braking* resistor, reaktor, dan kapasitor tetap dilakukan, dengan maksud untuk menambah redaman ayunan sehingga sistem lebih cepat kembali ke stabilitasnya seperti keadaan sebelum gangguan.

4.3.3 Analisis Kasus 3

Untuk gangguan yang lebih besar dari waktu pemutusan kritisnya, pensaklaran sistem braking dapat menjaga kestabilan sistem. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Ketika rotor mengalami percepatan akibat gangguan, pensaklaran braking resistor dapat memperbesar daya listrik keluaran generator sehingga luas daerah percepatan yang dialami oleh generator dapat diperkecil. Kemudian ketika rotor mengalami perlambatan, pensaklaran reaktor dapat menekan tegangan terminal dari generator yang akibatnya akan mengurangi daya keluaran listrik yang pada akhirnya akan mengurangi perlambatan yang dialami oleh generator. Dari sisi metode kriteria sama luas, dengan dilakukannya pensaklaran reaktor dapat memperkecil luas daerah perlambatan yang berlebihan karena ditekannya daya keluaran listrik agar tidak terlalu jauh dari masukan daya mekanis ada generator.

4.3.4 Analisis Grafik

Pada simulasi ini, waktu gangguan diberikan mulai dari detik ke 0,05 sampai dengan waktu yang diinginkan sebagai variasi data simulasi.

4.3.4.1 Grafik kecepatan rotor terhadap waktu

Grafik ini menggambarkan kecepatan putaran rotor pada pembangkit selama masa gangguan dan masa peralihan. Pada detik ke 0,05, yaitu saat terjadinya gangguan, kecepatan rotor akan bertambah. Hal ini diakibatkan karena pembangkit yang tadinya berbeban menjadi kehilangan beban karena akibat gangguan. Karena daya mekanis yang tidak tersalurkan menjadi daya listrik akan menimbulkan daya percepatan ($P_a = P_m - P_e$) maka rotor akan cenderung meningkat kecepatannya. Pada gambar 4.7 diperlihatkan kondisi dari sistem yang tidak stabil, yaitu rotor akan terus dipercepat. Sedangkan untuk keadaan yang stabil setelah berakhirnya gangguan rotor mulai melakukan perlambatan dan percepatan yang atau berosilasi dengan redaman sampai sistem kembali mencapai stabilitasnya.

Dengan adanya sistem braking maka proses peredaman osilasi akan terjadi lebih cepat, sehingga sistem lebih cepat mencapai posisi stabilnya kembali.

4.3.4.2 Grafik daya keluaran listrik terhadap waktu

Grafik ini menggambarkan keluaran dari pembangkit yang berupa daya listrik selama masa gangguan dan masa peralihan. Pada saat gangguan berlangsung, daya listrik akan meningkat secara cepat untuk sesaat kemudian turun secara drastis dan berosilasi dengan frekuensi yang sangat cepat. Walaupun daya listrik terlihat meningkat, tetapi sebenarnya rata-rata dari osilasi daya tersebut mempunyai nilai yang lebih kecil dari daya mekanis pada generator. Pada masa ini maka rotor akan mengalami percepatan. Kemudian, setelah gangguan berakhir daya keluaran listrik dari sistem akan melonjak dan berosilasi di atas nilai daya mekanis kemudian secara perlahan menurun dan kembali menjadi lebih kecil dari daya mekanis. Pada masa ini, rotor akan mengalami perlambatan dan secara perlahan kembali mengalami percepatan. Osilasi ini terjadi terus-menerus.

Pada sistem yang tidak stabil, osilasi pada suatu waktu tiba-tiba akan menjadi membesar dan terus membesar dan semakin cepat seperti terlihat pada gambar 4.8. Pada sistem yang stabil osilasi yang terjadi akan terus teredam hingga daya keluaran listrik kembali ke nilai awalnya yaitu dalam simulasi ini 0,75 pu.

4.3.4.3 Grafik simpangan sudut rotor terhadap waktu

Simpangan sudut rotor ini merupakan simpangan sudut antara rotor dengan titik acuan awalnya terhadap stator. Pada masalah kestabilan, simpangan sudut rotor ini merupakan indikator yang cukup penting. Pada sistem yang stabil, osilasi simpangan sudut rotor akibat gangguan tidak sampai melewati sudut kritisna, yaitu sudut dimana kekuatan penahan magnetik (magnetic coupling) antara rotor dan stator masih cukup kuat. Pada sistem yang tidak stabil, atau sistem yang terkena gangguan melewati waktu pemutusan kritisnya seperti pada gambar 4.9 maka simpangan sudut rotor akan melewati sudut kritisnya sehingga rotor akan “lepas” atau tidak lagi memiliki sinkronisasi dengan medan putar dari stator. Pada saat kestabilan tercapai simpangan sudut rotor tidak harus sama dengan ketika sebelum terjadi gangguan.

4.3.4.5 Grafik sudut penyalaan

Pada grafik sudut penyalaan ini dapat dilihat sudut penyalaan yang merupakan keluaran pengendali logika *fuzzy* sehingga dapat dilihat kapan terjadi pensaklaran resistor, reaktor dan kapasitor. Pada gambar 4.10 terlihat pada saat gangguan terjadi yaitu pada detik ke 0,05 pensaklaran pada thyristor untuk resistor mulai terjadi. Hal ini dapat dilihat dari grafik dimana nilai sudut penyalaan berubah dari 180° yang berarti “off” menjadi lebih kecil dari 180° yang berarti “on”. Sesuai dengan aturan dari pengendali logika *fuzzy*, semakin besar simpangan kecepatan rotor maka besarnya sudut penyalaan thyristor akan semakin kecil sehingga besarnya daya yang diserap sistem *braking* dapat semakin besar untuk mengimbangi pengaruh akibat gangguan. Sedangkan pensaklaran untuk reaktor baru mulai terjadi pada sekitar detik ke 0,5 yaitu ketika penyimpangan sudut rotor sudah menjadi negatif. Sama seperti pada resistor, semakin besar simpangan kecepatan maka sudut penyalaan akan menjadi semakin kecil.

Mulai pada sekitar detik ke 2,1 dapat dilihat bahwa kedua sudut penyalaan menjadi konstan 180° yang berarti simpangan kecepatan rotor sudah sangat kecil. Hal ini menandakan bahwa sistem sudah kembali ke keadaan tunaknya.

BAB 5

KESIMPULAN

1. Koordinasi *braking* resistor dengan *shunt* reaktor dan kapasitor dengan logika *fuzzy* dapat memperbaiki stabilitas peralihan sistem tenaga listrik dengan cara mengurangi percepatan dan perlambatan rotor. Sehingga osilasi yang dialami oleh generator lebih cepat teredam.
2. Dengan menggunakan *braking* resistor, *shunt* reaktor, dan kapasitor yang dikoordinasikan dengan pengendali logika fuzzy di dapat waktu pemutusan kritis yang lebih lama. Sehingga sistem dapat dikatakan lebih tahan terhadap gangguan yang lama.
3. Penggunaan logika *fuzzy* dalam koordinasi pensaklaran sangat sederhana dan mudah digunakan karena hanya perlu menggunakan satu masukan dan aturan pengendalinya merupakan variabel linguistik.

DAFTAR ACUAN

- [1] Williams D., Stevenson Jr., *Analisis Sistem Tenaga Listrik* Edisi Keempat, terj. Ir. Kemal Idris (Jakarta : Erlangga, 1983)
- [2] Nagrath, I.J., Kothari, D.P., "*Modern Power System Analysis*", McGraw-Hill, New Delhi, 1983
- [3] Saadat, Hadi, "*Power System Analysis*", McGraw-Hill, Singapore, 1999
- [4] Andrie K., "*Perbaikan Stabilitas Peralihan Sistem Tenaga Listrik dengan Koordinasi Pengendali Eksitasi dan Penggerak Utama Pembangkit oleh Pengendali Logika Fuzzy*," Skripsi Departemen Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Depok 2004
- [5] Kundur, Prabha, *Power System Stability and Control* (California : McGraw-Hill, 1993)
- [6] A. H. M. A. Rahim Ph.D., D.H.A. Alamgir., "a Closed-loop Quasi-optimal Dynamic Braking Resistor and Shunt Reactor Control Strategy for Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, (vol. 3 no.3 Agustus 1988) page 879-886
- [7] 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
- [8] Mohan, Ned. Undeland, Tore M. Robbins, William P., *Power Electronics Converter, Applications and Design*. Singapore : John Wiley & Sons. 2003

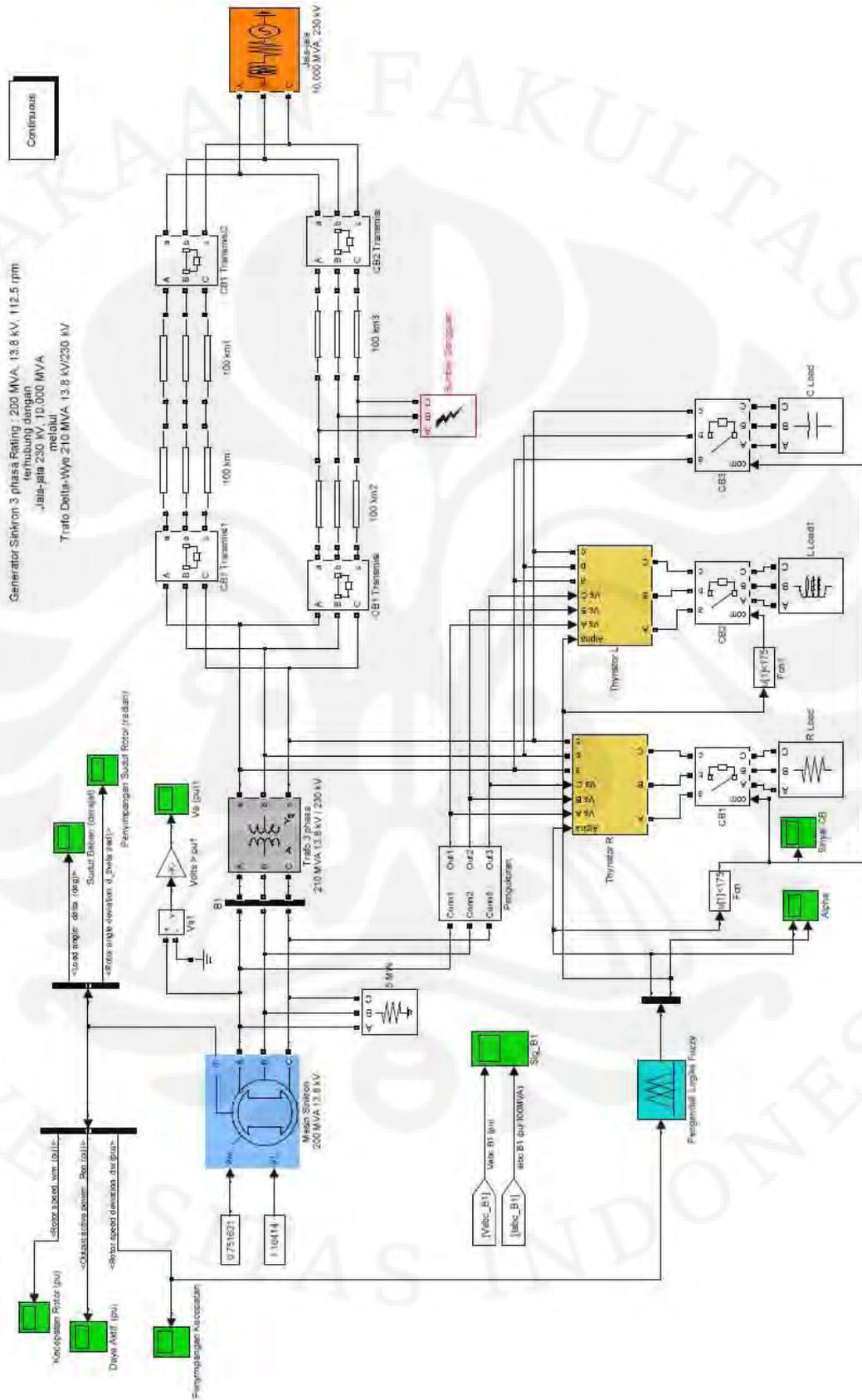
DAFTAR PUSTAKA

- 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 Ph.D., D.H.A. Alamgir., "a Closed-loop Quasi-optimal Dynamic Braking Resistor and Shunt Reactor Control Strategy for Transient Stability," *IEEE Transactions on Power Systems*, (vol. 3 no.3 Agustus 1988) 879-886
- B.M Weedy, B.J Cory, *Electric Power System* 4th Edition (Chichester : John Wiley & Sons Ltd., 2001)
- Kundur, Prabha, *Power System Stability and Control* (California : McGraw-Hill,1993)
- Mohan, Ned. Undeland, Tore M. Robbins, William P., *Power Electronics Converter, Applications and Design*. Singapore : John Wiley & Sons. 2003
- Ross, Timothy J., *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. United States of America : McGraw-Hill, 1995
- Shinji I., Syunji I., Goro S., Goro F., "Experimental Study on Improvement Transient Stability with Braking Resistor," *IEEJ Transactions*, 126(9), 2006 : 894-900
- The MathWorks, Inc, *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. 1999
- TransÉnergie Technologies Inc., *SimPowerSystems User's Guide*. Under sublicense from Hydro-Québec, and The MathWorks, Inc. 2003
- Vadhera, S.S., *Power System Analysis and Stability*. New Delhi : Khanna Publishers. 1981
- Williams D., Stevenson Jr., *Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat, terj.*
Ir. Kemal Idris (Jakarta : Erlangga, 1983)
- Yuning C., M. E. El-Hawary, "An EAC Based Braking Resistor Approach for Transient Stability Improvement," *IEEE ISIE*, 2006 : 1869-1874

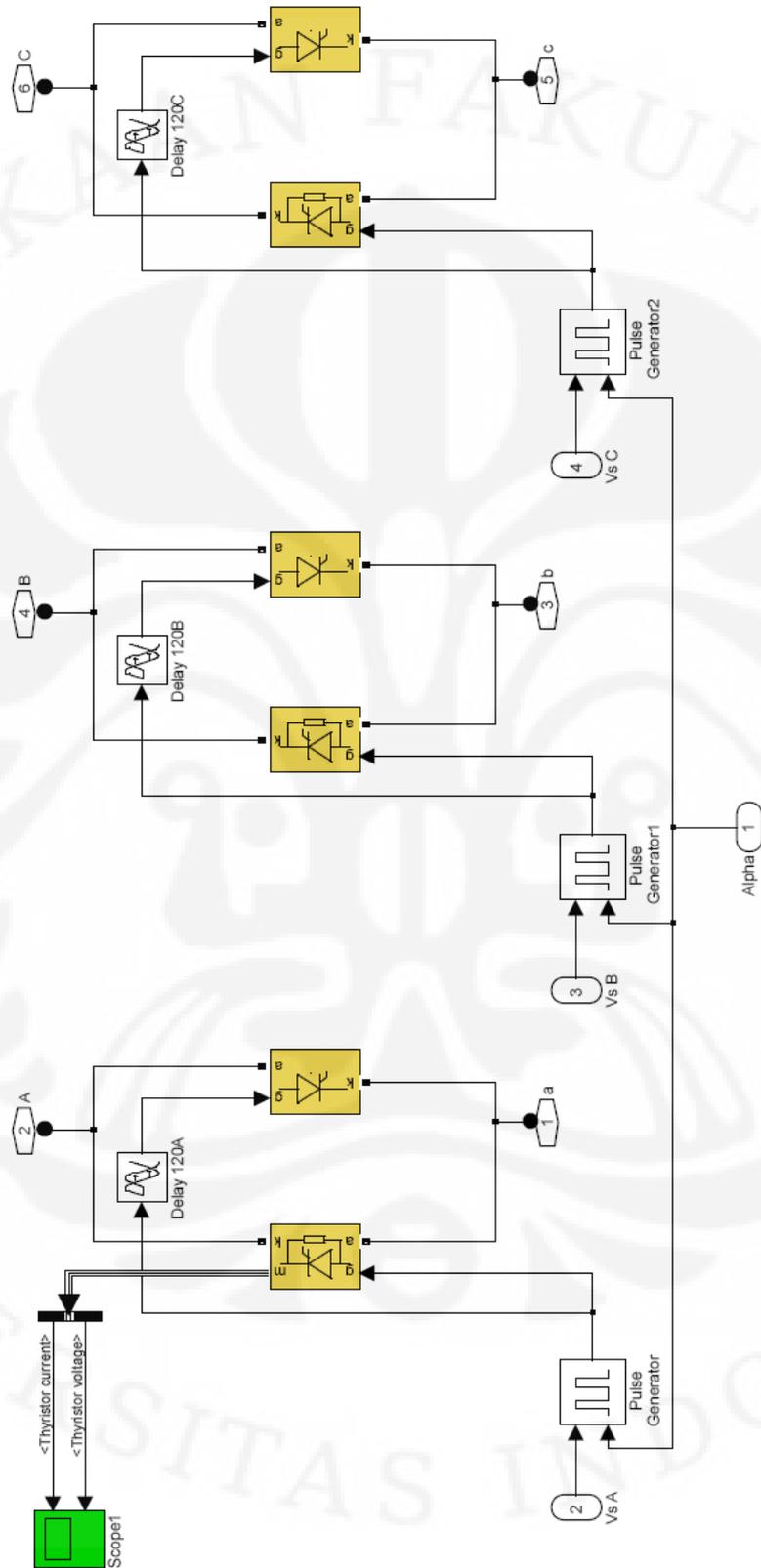
LAMPIRAN



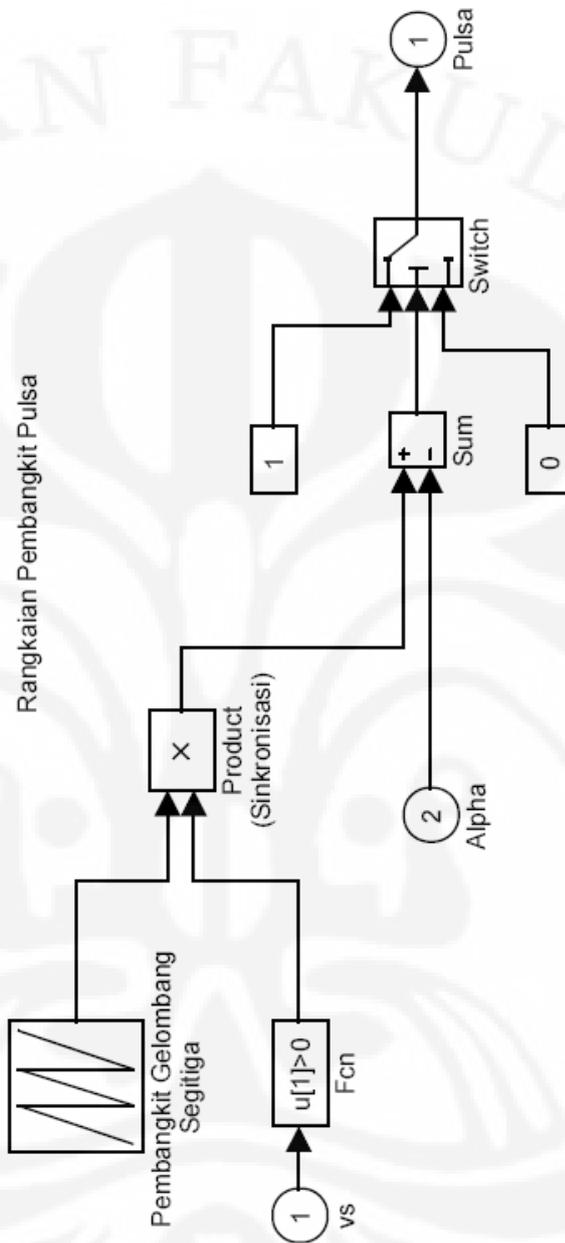
Lampiran 1 Model Simulink Sistem Tenaga Listrik dan Braking



Lampiran 2 Model Simulink Rangkaian *Thyristor*



Lampiran 3 Model Simulink Rangkaian *Pulse Generator*



Lampiran 4 Listing Program Pengendali Logika Fuzzy

```
[System]
Name='Pengendali5'
Type='mandani'
Version=2.0
NumInputs=1
NumOutputs=2
NumRules=9
AndMethod='min'
OrMethod='max'
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='som'

[Input1]
Name='PenyimpanganKecepatan'
Range=[-0.01 0.01]
NumMFs=9
MF1='NB':'zmf',[-0.00902253968253968 -0.00505253968253968]
MF2='Nol':'trimf',[-0.00044973544973545 0 0.000608]
MF3='PB':'smf',[0.00492250793650793 0.00889050793650793]
MF4='NK':'trimf',[-0.00240740740740741 -0.00134 -0.000397]
MF5='PK':'trimf',[0.000559809523809526 0.00150380952380953
0.00244780952380953]
MF6='PTK':'trimf',[0.00215 0.00313 0.00416]
MF7='PTB':'trimf',[0.00415 0.00534 0.006111111111111111]
MF8='NTK':'trimf',[-0.00447089947089947 -0.00335 -0.00215]
MF9='NTB':'trimf',[-0.00611 -0.00505291005291005 -0.0041]

[Output1]
Name='Resistor'
Range=[0 180]
NumMFs=5
MF1='Off':'trimf',[180 180 180]
MF2='K':'zmf',[34.147619047619 38.347619047619]
MF3='B':'trimf',[96.2333333333333 137.333333333333
178.333333333333]
MF4='TK':'trimf',[36.6652380952381 58.0952380952381
79.4952380952381]
MF5='TB':'trimf',[68.4095238095238 89.7095238095238
111.709523809524]

[Output2]
Name='Reactor'
Range=[0 180]
NumMFs=5
MF1='K':'zmf',[90.2 90.3]
MF2='Off':'trimf',[180 180 180]
MF3='B':'trimf',[132 153 177.857142857143]
```

```
MF4='TK': 'trimf', [90.2380952380952 103 117]
MF5='TB': 'trimf', [108.380952380952 125.380952380952
144.523809523809]
```

```
[Rules]
2, 1 2 (1) : 1
5, 3 2 (1) : 1
6, 5 2 (1) : 1
7, 4 2 (1) : 1
3, 2 2 (1) : 1
4, 1 3 (1) : 1
8, 1 5 (1) : 1
9, 1 4 (1) : 1
1, 1 1 (1) : 1
```