

**PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN  
MENGUNAKAN BRAKING RESISTOR  
PENGENDALI LOGIKA FUZZY DENGAN METODE  
KRITERIA SAMA LUAS**

**SKRIPSI**

Oleh :

**Irsan**

**04 03 03 056X**



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

**PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN  
MENGUNAKAN BRAKING RESISTOR  
PENGENDALI LOGIKA FUZZY DENGAN METODE  
KRITERIA SAMA LUAS**

**SKRIPSI**

Oleh :

**Irsan**

**04 03 03 056X**



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

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

## **PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI**

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

### **PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN MENGGUNAKAN BRAKING RESISTOR PENGENDALI LOGIKA FUZZY DENGAN METODE KRITERIA SAMA LUAS**

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 dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di Perguruan Tinggi atau Instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 9 Juni 2008

Irsan

NPM. 040303056X

## **PENGESAHAN**

Skripsi dengan judul :

**PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN MENGGUNAKAN BRAKING  
RESISTOR PENGENDALI LOGIKA FUZZY DENGAN METODE  
KRITERIA SAMA LUAS**

dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada tanggal 25 Juni 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 25 Juni 2007

Dosen pembimbing,

Dr. Ir. Ridwan Gunawan M.T

NIP. 130 869 978

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya ucapkan kepada Bapa di kerajaan sorga yang telah datang ke dalam dunia dalam wujud Yesus Kristus dan akan selalu menyertai umat-Nya hingga akhir jaman didalam Roh Kudus atas segala berkat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya mengucapkan terimakasih kepada :

**Dr. Ir. Ridwan Gunawan, M.T.**

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

Irsan  
NPM 04 03 03 056 X  
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing  
Dr.Ir. Ridwan Gunawan, M.T.

**PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN MENGGUNAKAN BRAKING RESISTOR PENGENDALI LOGIKA FUZZY DENGAN METODE KRITERIA SAMA LUAS**

**ABSTRAK**

Dalam suatu sistem tenaga listrik yang terdiri dari beberapa pembangkit, stabilitas sistem tenaga listrik dalam menyalurkan energi listrik menjadi masalah yang harus diperhatikan. Pada sistem yang saling terkoneksi adanya gangguan pada sistem baik itu pada saluran transmisi, pembangkit, atau beban akan menyebabkan pembangkit lain ikut merasakan adanya gangguan tersebut. Untuk gangguan kecil biasanya sistem dapat mengatasi gangguan tersebut dan tidak akan mempengaruhi stabilitas sistem secara keseluruhan. Namun untuk gangguan yang skalanya cukup besar dan terjadi pada jangka waktu yang cukup lama, dapat mengakibatkan sistem menjadi tidak stabil. Akibatnya aliran energi listrik ke beban terganggu. Untuk kondisi yang terburuk dapat mengakibatkan terjadinya *black out*.

Tulisan ini membahas tentang perbaikan stabilitas peralihan pada sistem tenaga listrik menggunakan *braking resistor* pengendali logika fuzzy dengan metode kriteria sama luas. Dengan cara ini diharapkan sistem akan lebih cepat mencapai kestabilannya setelah terjadi gangguan.

Metode ini menggunakan selisih dari daerah percepatan dengan daerah perlambatan yang didapatkan melalui perhitungan selisih perubahan kecepatan putar rotor untuk dijadikan inputan pada pengendali fuzzy. Pengendali fuzzy akan menentukan berapa besar arus yang akan masuk ke *braking resistor* dengan cara memberi output sudut penyalan pada *thyristor*.

**Kata kunci : Stabilitas Peralihan, Braking Resistor, Logika Fuzzy, Kriteria Sama Luas**

Irsan  
NPM 04 03 03 056 X  
Electrical Engineering Department

Counsellor  
Dr.Ir. Ridwan Gunawan, M.T.

**TRANSIENT STABILITY IMPROVEMENT USING BRAKING  
RESISTOR CONTROLLED BY FUZZY LOGIC WITH EQUAL AREA  
CRITERION**

**ABSTRACT**

In an electric power system which contains some generator, electric power system stability become problem that must be consider to conduct electric power. In an interconnected system, disturbance that happen on a system wheater in transmission, generator, or load will make another generator endure the disturbance. For small disturbance usually the system can handle the disturbance and will not cause change the whole system stability. But for much bigger scale of disturbance and happen for enough long time, can cause system instability. The result is electric energy flow interruption to the load. For the worst condition can cause black out.

This paper will discuss about transient stability improvement in electric power system using braking resistor controlled by fuzzy logic with equal area criterion. By using this method hopefully system will obtain stability faster after disturbance occur.

This method use the difference between accelerating area with decelerating area obtained from calculation of speed deviation to become fuzzy logic input. Fuzzy logic will determine how much current will advance to the braking resistor by giving output firing angle to the thyristor.

**Key word : Transient Stability, Braking Resistor, Fuzzy Logic, Equal Area Criterion**

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI.....	ii
PENGESAHAN .....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 TUJUAN PENULISAN.....	2
1.3 BATASAN MASALAH.....	2
1.4 SISTEMATIKA PENULISAN.....	2
BAB II METODE PERBAIKAN STABILITAS DAN PENGANTAR LOGIKA FUZZY.....	4
2.1 DINAMIKA ROTOR DAN PERSAMAAN AYUNAN.....	5
2.1.1    Konstanta Kelembaman .....	6
2.1.2    Persamaan Ayunan.....	7
2.2 PERSAMAAN SUDUT DAYA .....	10
2.3 KRITERIA SAMA LUAS (EQUAL AREA CRITERION).....	13
2.4 SUDUT PEMUTUSAN KRITIS .....	18
2.5 WAKTU PEMUTUSAN KRITIS.....	19
2.6 PENGARUH REAKTANSI TRANSFER PADA SUDUT PEMUTUSAN KRITIS .....	20

2.7 METODE MEMPERBAIKI STABILITAS PERALIHAN .....	22
2.7.1 Perbaikan Stabilitas Peralihan dengan Menggunakan <i>Braking Resistor</i> .....	23
2.8 PENGENALAN DASAR LOGIKA FUZZY .....	25
2.9 FUNGSI KEANGGOTAAN DAN HIMPUNAN FUZZY .....	26
2.10 OPERASI HIMPUNAN FUZZY .....	29
2.11 FUZZIFIKASI .....	30
2.12 INFERENSI .....	31
2.13 DEFUZZIFIKASI .....	32
2.14 BASIS PENGETAHUAN.....	34
<b>BAB III PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN MENGGUNAKAN BRAKING RESISTOR.....</b>	<b>35</b>
3.1 PENGARUH GANGGUAN TERHADAP SISTEM TENAGA LISTRIK .....	35
3.2 PENGENDALIAN <i>BRAKING RESISTOR</i> MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY .....	37
3.2.1 Fuzzifikasi .....	38
3.2.2 Basis Pengetahuan.....	39
3.2.3 Inferensi.....	40
3.2.4 Defuzziikasi.....	40
3.2.5 Diagram Blok.....	40
3.2.6 Algoritma .....	41
<b>BAB IV SIMULASI DAN ANALISA BRAKING RESISTOR PENGENDALI LOGIKA FUZZY DENGAN METODE KRITERIA SAMA LUAS .....</b>	<b>42</b>
4.1 GAMBARAN UMUM .....	42
4.2 KOMPONEN DAN PARAMETER SISTEM.....	42
4.3 SIMULASI DAN ANALISA.....	44
4.3.1 Simulasi dan Analisa 1 : Sistem Tenaga Listrik Tanpa Gangguan dan Tanpa <i>Braking Resistor</i> .....	45
4.3.2 Simulasi dan Analisa 2 : Sistem Tenaga Listrik Tanpa Gangguan dengan <i>Braking Resistor</i> .....	48
4.3.3 Simulasi dan Analisa 3 : Sistem Tenaga Listrik dengan Gangguan Tanpa <i>Braking Resistor</i> .....	52
4.3.4 Simulasi dan Analisa 4 : Sistem Tenaga Listrik dengan Gangguan dan dengan <i>Braking Resistor</i> .....	55

4.3.5 Simulasi dan Analisa 5 : Sistem Tenaga Listrik dengan Gangguan dan Hanya Salah Satu Generator yang Diberikan <i>Braking Resistor</i> .....	59
BAB V KESIMPULAN.....	66
DAFTAR ACUAN .....	67
DAFTAR PUSTAKA .....	68



## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
<b>Gambar 2.1</b> Dinamika perputaran mekanis pada pembangkit serempak .....	8
<b>Gambar 2.2</b> Sistem yang diwakili rangkaian 4 kutub.....	11
<b>Gambar 2.3</b> Analogi ayunan sudut daya.....	13
<b>Gambar 2.4</b> plot $\delta$ vs $t$ untuk sistem stabil dan tidak stabil .....	14
<b>Gambar 2.5</b> Grafik daya listrik sebagai fungsi dari sudut daya .....	16
<b>Gambar 2.6</b> Gangguan terjadi antara $\delta_0$ sampai dengan $\delta_c$ dan simpangan $\delta$ dan $\omega_m$ terhadap waktu .....	16
<b>Gambar 2.7</b> Ayunan balik dari sudut daya $\delta$ .....	17
<b>Gambar 2.8</b> Sudut kritis gangguan pada stabilitas peralihan.....	18
<b>Gambar 2.9</b> Kondisi sistem sebelum terkena gangguan.....	20
<b>Gambar 2.10</b> Kondisi sistem saat terkena gangguan.....	20
<b>Gambar 2.11</b> Kondisi sistem sesudah dilakukan pemutusan terhadap gangguan	20
<b>Gambar 2.12</b> Kurva $P$ vs $\delta$ untuk kondisi sebelum, saat, dan sesudah gangguan terjadi .....	21
<b>Gambar 2.13</b> Sistem tenaga listrik dengan <i>braking resistor</i> .....	24
<b>Gambar 2.14</b> Kurva karakteristik sudut daya dari sistem tenaga listrik dengan <i>braking resistor</i> .....	25
<b>Gambar 2.15</b> Fungsi keanggotaan tipe Segitiga .....	28
<b>Gambar 2.16</b> Fungsi keanggotaan tipe Trapesium .....	28
<b>Gambar 2.17</b> Operasi pada himpunan fuzzy (a) himpunan A dan B (b) Gabungan (c) Irisan (d) Komplemen.....	29
<b>Gambar 2.18</b> Metode inferensi max – min .....	31
<b>Gambar 2.19</b> Metode inferensi max product .....	32
<b>Gambar 2.20</b> Metode defuzzifikasi keanggotaan maksimum .....	32
<b>Gambar 2.21</b> Metode defuzzifikasi centroid .....	33
<b>Gambar 2.22</b> Metode nilai rata-rata berbobot .....	33
<b>Gambar 2.23</b> Metode keanggotaan mean-max .....	34
<b>Gambar 3.1</b> Daerah yang terbentuk akibat daerah deselerasi rotor yang tidak dapat menyamai daerah akselerasi .....	36
<b>Gambar 3.2</b> Fungsi keanggotaan untuk input selisih daerah percepatan dengan daerah perlambatan .....	38
<b>Gambar 3.3</b> Fungsi keanggotaan untuk output sudut penyalan <i>thyristor</i> .....	39
<b>Gambar 3.4</b> Blok diagram perbaikan stabilitas sistem tenaga listrik memakai <i>braking resistor</i> pengendali fuzzy dengan menggunakan metode kriteria sama luas.....	40
<b>Gambar 4.1</b> Blok Simulasi Generator Sinkron 187 MVA .....	43

<b>Gambar 4.2</b> Blok Simulasi Generator Sinkron 200 MVA .....	43
<b>Gambar 4.3</b> Blok Simulasi Hydraulic Turbine and Governor .....	43
<b>Gambar 4.4</b> Blok Simulasi Excitation System .....	43
<b>Gambar 4.5</b> Rangkaian simulasi perbaikan stabilitas peralihan menggunakan <i>braking resistor</i> pengendali logika fuzzy dengan metode kriteria sama luas .....	44
<b>Gambar 4.6</b> Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A=B$ ) .....	46
<b>Gambar 4.7</b> Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A=B$ ).....	46
<b>Gambar 4.8</b> Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A=B$ ).....	46
<b>Gambar 4.9</b> Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A=B$ ).....	46
<b>Gambar 4.10</b> Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A\neq B$ ).....	47
<b>Gambar 4.11</b> Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A\neq B$ ).....	47
<b>Gambar 4.12</b> Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A\neq B$ ).....	47
<b>Gambar 4.13</b> Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A\neq B$ ).....	47
<b>Gambar 4.14</b> Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A=B$ ).....	48
<b>Gambar 4.15</b> Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A=B$ ).....	48
<b>Gambar 4.16</b> Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A=B$ ).....	49
<b>Gambar 4.17</b> Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A=B$ ).....	49
<b>Gambar 4.18</b> Daya untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> A ( $A=B$ ).....	50
<b>Gambar 4.19</b> Daya untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> B ( $A=B$ ).....	50
<b>Gambar 4.20</b> Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A\neq B$ ).....	50
<b>Gambar 4.21</b> Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A\neq B$ ).....	50
<b>Gambar 4.22</b> Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A\neq B$ ).....	51
<b>Gambar 4.23</b> Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A\neq B$ ).....	51
<b>Gambar 4.24</b> Daya untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> A ( $A\neq B$ ).....	52
<b>Gambar 4.25</b> Daya untuk keadaan tanpa gangguan dengan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> B ( $A\neq B$ ).....	52
<b>Gambar 4.26</b> Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A=B$ ).....	53

<b>Gambar 4.27</b>	Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A=B$ ) .....	53
<b>Gambar 4.28</b>	Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A=B$ ) .....	53
<b>Gambar 4.29</b>	Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A=B$ ) .....	53
<b>Gambar 4.30</b>	Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A\neq B$ ).....	54
<b>Gambar 4.31</b>	Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A\neq B$ ).....	54
<b>Gambar 4.32</b>	Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A\neq B$ ) .....	55
<b>Gambar 4.33</b>	Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan tanpa <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A\neq B$ ) .....	55
<b>Gambar 4.34</b>	Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A=B$ ) .....	56
<b>Gambar 4.35</b>	Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A=B$ ) .....	56
<b>Gambar 4.36</b>	Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A=B$ ) .....	56
<b>Gambar 4.37</b>	Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A=B$ ).....	56
<b>Gambar 4.38</b>	Daya untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> A ( $A=B$ ) .....	57
<b>Gambar 4.39</b>	Daya untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> B ( $A=B$ ).....	57
<b>Gambar 4.40</b>	Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A\neq B$ ).....	58
<b>Gambar 4.41</b>	Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A\neq B$ ).....	58
<b>Gambar 4.42</b>	Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada generator A ( $A\neq B$ ).....	58
<b>Gambar 4.43</b>	Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada generator B ( $A\neq B$ ).....	58
<b>Gambar 4.44</b>	Daya untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> A ( $A\neq B$ ) .....	59
<b>Gambar 4.45</b>	Daya untuk keadaan dengan gangguan dan dengan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> B ( $A\neq B$ ).....	59
<b>Gambar 4.46</b>	Sudut rotor pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A=B$ )....	60
<b>Gambar 4.47</b>	Sudut rotor pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A=B$ )....	60
<b>Gambar 4.48</b>	Perubahan kecepatan pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A=B$ ) .....	60
<b>Gambar 4.49</b>	Perubahan kecepatan pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A=B$ ) .....	60

<b>Gambar 4.50</b>	Daya pada <i>braking resistor</i> B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A=B$ )....	61
<b>Gambar 4.51</b>	Sudut rotor pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A\neq B$ )....	62
<b>Gambar 4.52</b>	Sudut rotor pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A\neq B$ )....	62
<b>Gambar 4.53</b>	Perubahan kecepatan pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A\neq B$ ) .....	62
<b>Gambar 4.54</b>	Perubahan kecepatan pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A\neq B$ ) .....	62
<b>Gambar 4.55</b>	Daya untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> B ( $A\neq B$ )..	63
<b>Gambar 4.56</b>	Sudut rotor pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A\neq B$ ) ...	64
<b>Gambar 4.57</b>	Sudut rotor pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A\neq B$ ) ...	64
<b>Gambar 4.58</b>	Perubahan kecepatan pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A\neq B$ ) .....	64
<b>Gambar 4.59</b>	Perubahan kecepatan pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan <i>braking resistor</i> ( $A\neq B$ ) .....	64
<b>Gambar 4.60</b>	Daya untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan <i>braking resistor</i> pada <i>braking resistor</i> A ( $A\neq B$ )..	65

## DAFTAR TABEL

**Tabel 2.1** Jenis konstanta inersia dari mesin sinkron

7



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 LATAR BELAKANG**

Pada masa seperti saat ini tidak dapat dipungkiri lagi bahwa listrik telah menjadi kebutuhan pokok yang sangat diperlukan oleh masyarakat dalam menjalankan kehidupan sehari-hari. Bahkan dengan adanya energi listrik ini telah membantu meningkatkan taraf hidup banyak orang dan ketersediaan energi listrik juga merupakan salah satu indikator tingkat kemajuan sebuah daerah. Oleh karena peranan energi listrik menjadi begitu dominan dalam kehidupan masyarakat, maka otomatis energi listrik menjadi sangat vital.

Setiap tahun permintaan energi listrik mengalami kenaikan. Kebutuhan listrik yang terus meningkat tidak diikuti dengan penemuan alat baru yang dapat mengkonversi energi listrik dalam jumlah yang sangat besar atau tidak terbatas untuk memenuhi kebutuhan listrik. Oleh karena itu untuk mengatasi masalah tersebut dibuatlah solusi dengan membagi beban dalam beberapa wilayah dengan pembangkit tenaga listrik sendiri. Pada mulanya solusi ini tampaknya sangat bagus tapi keandalan dari sistem seperti ini tidak ada sehingga bila ada satu pembangkit yang terlepas maka pasokan energi listrik untuk daerah yang bersangkutan akan hilang juga. Oleh karena itu dibuatlah suatu interkoneksi antara pembangkit yang tersebar diseluruh tempat.

Interkoneksi ini selain meningkatkan keandalan dari pasokan energi listrik ternyata menimbulkan masalah. Masalah yang paling sering terjadi adalah stabilitas daya yang disuplai oleh generator ke sistem. Stabilitas ini makin menjadi kendala bila semakin banyak jumlah dan jenis generator yang di parallel ke sistem. Karena pada sistem tenaga listrik yang terinterkoneksi apabila ada salah satu pembangkit yang mengalami gangguan maka gangguan tersebut akan

berpengaruh ke sistem apalagi bila yang terganggu adalah pembangkit dengan skala yang sangat besar. Disamping itu bila kawat transmisi mengalami gangguan maka pembangkit akan mengalami dampak yang sangat signifikan pada stabilitas sistem secara keseluruhan.

## **1.2 TUJUAN PENULISAN**

Penulisan ini bertujuan untuk menjelaskan perbaikan stabilitas peralihan (*transient stability*) sistem tenaga listrik menggunakan *braking resistor* yang dikendalikan dengan pengendali logika fuzzy menggunakan metode kriteria sama luas (*equal area criterion*).

## **1.3 BATASAN MASALAH**

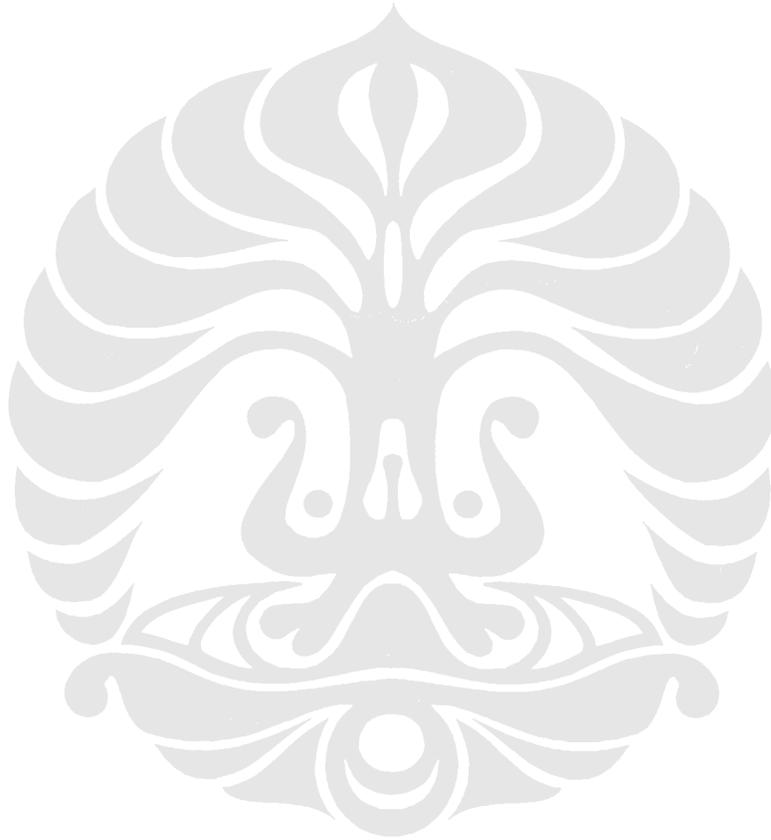
Penulisan dalam skripsi ini akan dibatasi oleh beberapa hal :

1. Metode perbaikan stabilitas yang dibahas hanya akan menyangkut metode perbaikan stabilitas peralihan dengan menggunakan *braking resistor*.
2. Masukan daya mekanis ke pembangkit mempunyai referensi sebesar 0,7516 pu untuk generator 200 MVA dan 1 pu untuk generator 187 MVA.
3. Tegangan terminal mempunyai besaran referensi sebesar 1 pu untuk generator 200 MVA dan generator 187 MVA.
4. Generator saat mulai dinyalakan langsung dihubungkan ke sistem tenaga listrik.
5. Perhitungan besarnya *braking resistor* yang digunakan dalam simulasi tidak dibahas dan dianggap sama besarnya dengan kapasitas generator.
6. Waktu pemutusan beban terjadi dalam periode waktu gangguan.
7. Gangguan yang terjadi adalah beban yang lepas dari sistem tenaga listrik.
8. Logika fuzzy tidak dibahas detail proses pengendalinya hanya dipakai hasil keluarannya untuk meningkatkan stabilitas sistem tenaga listrik.

## **1.4 SISTEMATIKA PENULISAN**

Penulisan dalam skripsi ini dibagi menjadi empat bab. Bab satu berisi tentang latar belakang permasalahan yang terkait dengan stabilitas sistem tenaga listrik secara umum, pembatasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab dua

berisi dasar teori tentang stabilitas tenaga listrik beserta persamaan sudut daya, persamaan ayunan, dan metode perbaikan stabilitas dengan *braking resistor*. Disamping itu juga diberikan tentang dasar teori tentang pengendali logika fuzzy. Bab tiga akan dibahas tentang penggunaan metode logika fuzzy yang diterapkan untuk perbaikan stabilitas peralihan. Bab empat berisi tentang simulasi dan analisa yang dilakukan pada skripsi ini. Simulasi akan dilakukan dengan program MATLAB 7.0.1. Bab kelima berisi tentang kesimpulan yang dapat diambil dari skripsi ini.



## **BAB II**

### **METODE PERBAIKAN STABILITAS DAN PENGANTAR LOGIKA FUZZY**

Agar sebuah sistem tenaga listrik dapat berfungsi dengan baik, maka sangatlah perlu diperhatikan masalah kestabilan. Kestabilan sistem daya dapat didefinisikan sebagai sifat dari sistem itu yang memungkinkan mesin-mesin serempak dalam sistem tersebut untuk memberikan reaksinya terhadap suatu gangguan pada keadaan kerja yang normal, serta balik kembali ke keadaan semula bila keadaan menjadi normal kembali. Studi kestabilan biasanya digolongkan ke dalam tiga jenis, tergantung pada sifat dan besarnya gangguan. Studi kestabilan tersebut ialah stabilitas peralihan (*transient*), stabilitas dinamik (*dynamic*), stabilitas tunak (*steady state*).

Stabilitas peralihan adalah kemampuan suatu sistem tenaga listrik untuk mencapai titik daya keseimbangan daya yang baru, tidak harus sama dengan titik keseimbangan mula-mula (sebelum terjadi gangguan). Setelah terjadi suatu gangguan yang memungkinkan sistem kehilangan kestabilan karena gangguan yang terjadi sangat besar diatas kemampuan mesin dan sistem untuk memberikan reaksinya. Gangguan-gangguan besar tersebut dapat berupa : [1]

1. Hubung singkat pada jaringan transmisi.
2. Hilangnya pembangkit atau beban yang besar dari sistem tenaga listrik.
3. Putusnya hubungan antara dua buah subsistem dalam sistem tenaga listrik.

Perubahan-perubahan yang terjadi pada sistem tersebut memberikan pengaruh sangat besar dalam masalah menjaga pembangkit-pembangkit dalam sistem tetap tersinkronisasi. Analisis stabilitas peralihan melihat pada detik-detik pertama atau bahkan siklus-siklus pertama dari daya dan sudut daya setelah

gangguan. Bila dalam waktu yang singkat gangguan tersebut dapat teratasi dan pembangkit-pembangkit dapat mempertahankan sinkronisasinya, maka dikatakan sistem tersebut stabil transient.

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 (*supply*) dan motor (beban) pada saat ada gangguan yang besar, apakah masing-masing masih bisa mempertahankan sinkronisasi, dan kembali pada kecepatan sinkron yang konstan. [2]

Stabilitas tunak didefinisikan sebagai kemampuan sistem suatu tenaga listrik untuk menerima perubahan-perubahan kecil yang bersifat gradual, yang terjadi di sekitar titik kesetimbangan pada saat kondisi tunak. Stabilitas tunak tergantung pada karakteristik-karakteristik komponen-komponen dasar sistem seperti : [1]

- 1) Sistem dari mesin
- 2) Interkoneksi yang lemah antara banyak mesin
- 3) Kontrol otomatis yang ada pada sistem
- 4) Komponen yang bergerak dari turbine

Dalam analisa stabilitas tunak, digunakan model pembangkit yang sangat sederhana yaitu sebagai sumber tegangan biasa, karena analisis stabilitas tunak hanya menyangkut perubahan-perubahan kecil di sekitar titik keseimbangan sehingga ruang lingkupnya tidak begitu luas.

## 2.1 DINAMIKA ROTOR DAN PERSAMAAN AYUNAN

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin serempak didasarkan pada prinsip dasar dalam dinamika yang menyatakan bahwa momen-putar percepatan (*accelerating torque*) adalah hasil kali dari momen-kelembaman (*momen of inertia*) rotor dan percepatan sudutnya. Dalam sistem unit-unit MKS, dan untuk generator serempak, persamaan ini dapat ditulis dalam bentuk : [3]

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

dengan :

- $J$  momen inersia dari rotor (Kgm)
- $\theta_m$  pergeseran sudut dari rotor relatif terhadap sumbu yang tetap (radian mekanis)
- $t$  waktu (detik)
- $T_m$  torsi mekanis dari prime mover (Nm)
- $T_e$  torsi elektromagnetik (Nm)
- $T_a$  torsi percepatan (Nm)

### 2.1.1 Konstanta Kelembaman

Setiap jenis pembangkitan memiliki kesamaan dalam hal membangkitkan tenaga listrik. Kesamaan itu berupa perubahan energi kinetik menjadi energi listrik pada generator. Persamaan energi kinetik tersebut dinyatakan sebagai berikut : [4]

$$K.E = \frac{1}{2} I' . (\omega')^2 \quad (2.2)$$

dimana :

$I'$  = momen inersia dalam  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

$\omega'$  = kecepatan angular dalam radian mekanis per detik

Momentum angular adalah [4]

$$M' = I' . \omega' \quad \text{joule-sec rad} \quad (2.3)$$

$$\therefore K.E = \frac{1}{2} M' . \omega' \quad \text{joule} \quad (2.4)$$

Energi kinetik yang tersimpan dalam per unit MVA dari rating mesin dinyatakan oleh konstanta kelembaman  $H$  dan rating dari sebuah mesin dalam MVA dinyatakan dalam  $G$ .

$H$  = megajoules (MJ)/MVA atau MW-sec/MVA

$$G.H = K.E = \frac{1}{2} M . \omega \quad \text{megajoules (MJ)} \quad (2.5)$$

dengan :

$\omega = 360f$  derajat listrik/detik

$M$  dalam MJ-sec/derajat listrik

$$\therefore G.H = \frac{1}{2} M (360.f) \quad (2.6)$$

$$\therefore M = \frac{G.H}{180.f} \quad \text{MJ-sec/electrical degree} \quad (2.7)$$

$M$  juga disebut konstanta kelembaman (*inertia constant*)

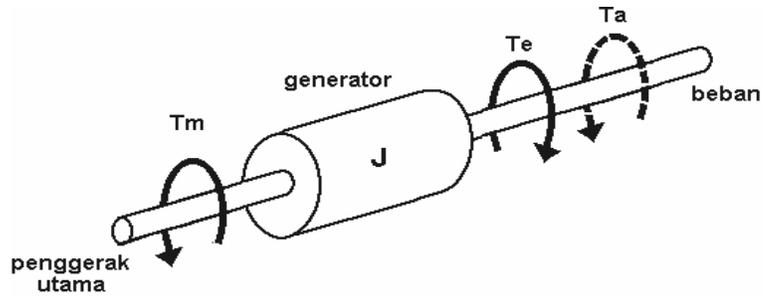
Persamaan 2.6 berhubungan dengan dua konstanta kelembaman dari mesin. Untuk studi kestabilan sangat perlu untuk menjabarkan  $M$  yang tergantung pada ukuran dan kecepatan mesin., tetapi  $H$  memiliki nilai karakteristik atau memiliki jarak nilai untuk setiap kelas mesin.

Tabel 2.1 Jenis konstanta kelembaman H dari mesin sinkron [4]

Type of Machines	Inertia Constant H Stored Energy in MW-sec per MVA
Turbine generator	
Condensing    1800 rpm	9-6
2000 rpm	7-4
Non-condensing 3000 rpm	4-3
Waterwheel Generator	
Slow-speed (<200 rpm)	2-3
High-speed (>200 rpm)	2-4
Synchronous Condensor	
Large	1,25
Small	1,00
Synchronous motor with load varying from 1,0 to 5,0 and higher for heavy flywheels	2,00

### 2.1.2 Persamaan Ayunan

Pada gambar 2.1 diperlihatkan sebuah generator. Pada generator ini terlihat bahwa generator memperoleh energi mekanik  $P_m$  pada torsi  $T_m$  dan kecepatan  $\omega_m$  dari prime mover. Generator memberikan tenaga listrik  $P_e$  ke sistem tenaga listrik melalui *bus bars*. Generator membangkitkan torsi elektro mekanik  $T_e$  sebagai tandingan dari  $T_m$ .



Gambar 2.1 Dinamika perputaran mekanis pada pembangkit serempak [3]

Diasumsikan bahwa torsi ventilasi dan gesekan ditiadakan, torsi akselerasi yang berlaku pada rotor diberikan oleh persamaan : [4]

$$T_a = T_m - T_e \quad (2.8)$$

Mengalikan torsi diatas dengan kecepatan sudut rotor  $\omega_m$  pada kedua sisi, persamaan di atas dapat ditulis kembali dalam persamaan daya :

$$P_a = P_m - P_e \quad (2.9)$$

dengan :

$$P_a = T_a \omega_m; \text{ daya yang ditimbulkan oleh akselerasi}$$

$$P_m = T_m \omega_m; \text{ daya mekanis input}$$

$$P_e = T_e \omega_m; \text{ daya output listrik dengan asumsi } power \text{ losses diabaikan}$$

Pada keadaan *steady-state* saat kecepatan sinkron,  $P_m = P_e$  dengan demikian  $P_a = 0$ . Ketika  $P_m$  atau  $P_e$  kestabilannya terganggu, putaran mesin menjadi dinamik yang dinyatakan oleh persamaan : [4]

$$P_a = T_a \cdot \omega = I \cdot \alpha \cdot \omega = M \cdot \frac{d^2 \theta}{dt^2} \quad (2.10)$$

Dimana  $\alpha = \frac{d^2 \theta}{dt^2}$  adalah percepatan sudut dari rotor dalam derajat listrik per detik<sup>2</sup>.

Semenjak posisi sudut  $\theta$  dari rotor terus bertambah seiring dengan bertambahnya waktu, maka akan lebih mudah untuk mengukur posisi sudut dan kecepatan dengan berpedoman pada suatu sumbu yang berputar dengan kecepatan serempak. Karena itu dapat didefinisikan : [4]

$$\delta = \theta - \omega_0 \cdot t \quad (2.11)$$

dengan :

$\omega_0$  = kecepatan sinkron dalam derajat listrik per detik

$\delta$  = pergeseran sudut rotor dalam radian mekanis, dari sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan serempak

Turunan-turunan persamaan 2.11 terhadap waktu adalah :

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_0 \quad (2.12)$$

dan

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (2.13)$$

Berdasarkan persamaan (2.9), (2.10), (2.13) diperoleh persamaan : [4]

$$M \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.14)$$

Dengan menggunakan bantuan dari konstanta kelembaman H pada persamaan (2.4) dalam analisa stabilitas dapat dinyatakan :

$$G \cdot H = \frac{1}{2} \cdot M \cdot \omega$$
$$H = \frac{\frac{1}{2} \cdot M \cdot \omega}{G} \quad (2.15)$$

Sehingga :

$$M = \frac{2 \cdot H}{\omega} \cdot G \quad (2.16)$$

Substitusikan persamaan 2.16 ke dalam persamaan 2.14 maka :

$$\frac{2 \cdot H}{\omega} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_a}{G} = \frac{P_m - P_e}{G} \quad (2.17)$$

Karena  $\delta$  dinyatakan dalam radian mekanis dan  $\omega$  pada penyebut dinyatakan dalam radian mekanis per detik maka persamaan (2.17) dapat ditulis ulang menjadi : [3]

$$\frac{2 \cdot H}{\omega} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.18)$$

Persamaan 2.18 di atas dinyatakan sebagai “Persamaan Swing”.

## 2.2 PERSAMAAN SUDUT DAYA [2]

Untuk memudahkan dalam menganalisa stabilitas peralihan, diperlukan beberapa asumsi yang dapat memudahkan analisa stabilitas peralihan tersebut. Diantaranya adalah :

- 1) Daya mekanik  $P_m$  dari penggerak utama dianggap tetap. Hal ini dapat dilakukan dengan pengendalian dari *governor* dan *prime mover*-nya.
- 2) Daya elektronik  $P_e$  dapat berubah sesuai dengan kecepatan rotor akibat dipercepat, diperlambat atau pada kecepatan sinkron.
- 3) Pada kondisi daya mekanis  $P_m$  dan daya listrik  $P_e$  sama besar, maka mesin berada dalam kecepatan sinkron.
- 4) Perubahan daya listrik  $P_e$  ditentukan oleh konfigurasi jaringan transmisi dan distribusi serta beban dari sistem yang dipasok oleh generator tersebut.

Parameter yang sangat penting dalam menganalisa 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 analisa 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 berubah. 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 berikut ini:



Gambar 2.2 Sistem yang diwakili rangkaian 4 kutub [2]

Pada sistem diatas yang diketahui adalah :

$E_1'$  : tegangan transient internal dari pembangkit pada bus 1

$E_2'$  : tegangan penerima pada infinite bus

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

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

Jika diketahui : [2]

$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N (Y_{kn} \cdot V_n) \quad \text{VA} \quad (2.19)$$

Dengan  $k = 1$  dan  $n = 2$  serta  $E_2' = V$ , maka:

$$P_1 + jQ_1 = E_1' \cdot (Y_{11} \cdot E_1')^* + E_1' \cdot (Y_{12} \cdot E_2')^* \quad \text{VA} \quad (2.20)$$

Dimana :

$$E_1' = |E_1| \angle \delta_1 \quad \text{Volt} \quad Y_{11} = G_{11} + jB_{11} \quad \Omega^{-1}$$

$$E_2' = |E_2| \angle \delta_2 \quad \text{Volt} \quad Y_{12} = |Y_{12}| \angle \theta_{12} \quad \Omega^{-1}$$

$$\begin{aligned} E_1' \cdot (Y_{11} \cdot E_1')^* &= |E_1| \angle \delta_1 \cdot Y_{11}^* \cdot |E_1| \angle -\delta_1 && \text{VA} \\ &= |E_1| (\cos \delta_1 + j \sin \delta_1) \cdot Y_{11}^* \cdot |E_1| (\cos \delta_1 - j \sin \delta_1) && \text{VA} \\ &= Y_{11}^* |E_1|^2 (\cos^2 \delta_1 + j \sin \delta_1 \cos \delta_1 - j \sin \delta_1 \cos \delta_1 + \sin^2 \delta_1) && \text{VA} \\ &= Y_{11}^* |E_1|^2 (\cos^2 \delta_1 + \sin^2 \delta_1) && \text{VA} \\ &= Y_{11}^* |E_1|^2 && \text{VA} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Dengan menggunakan cara yang sama seperti sebelumnya diperoleh :

$$\begin{aligned} E_1' \cdot (Y_{12} E_2')^* &= |E_1| \angle \delta_1 \cdot Y_{12}^* \cdot |E_2| \angle -\delta_2 \quad \text{VA} \\ &= Y_{12}^* \cdot |E_1| \cdot |E_2| \angle (\delta_1 - \delta_2) \quad \text{VA} \end{aligned} \quad (2.22)$$

Substitusi persamaan (2.21) dan (2.22) ke dalam persamaan (2.20) sehingga didapatkan persamaan :

$$\begin{aligned} P_1 + jQ_1 &= Y_{11}^* \cdot |E_1|^2 + Y_{12}^* |E_1| \cdot |E_2| \angle (\delta_1 - \delta_2) \quad \text{VA} \\ &= G_{11} \cdot |E_1|^2 - jB_{11} \cdot |E_1|^2 + |Y_{12}| \angle -\theta_{12} \cdot |E_1| \cdot |E_2| \angle (\delta_1 - \delta_2) \quad \text{VA} \\ &= G_{11} \cdot |E_1|^2 - jB_{11} \cdot |E_1|^2 + |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2| \angle (\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) \quad \text{VA} \end{aligned}$$

Sehingga:

$$\begin{aligned} P_1 &= G_{11} \cdot |E_1|^2 + |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) \quad \text{W} \\ jQ_1 &= -jB_{11} \cdot |E_1|^2 + j|Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta_{12}) \quad \text{VAR} \end{aligned}$$

Dimisalkan :

$$\begin{aligned} \delta &= \delta_1 - \delta_2 \\ \varphi &= \theta_{12} - \pi/2 \end{aligned}$$

Diperoleh  $P_1$  dan  $jQ_1$  menjadi :

$$P_1 = G_{11} \cdot |E_1|^2 + |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \sin(\delta - \varphi) \quad \text{W} \quad (2.23)$$

$$Q_1 = -B_{11} \cdot |E_1|^2 - |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \cos(\delta - \varphi) \quad \text{VAR} \quad (2.24)$$

Apabila *resistance*-nya nol, maka  $G_{11} = 0$ . Persamaan (2.23) akan menjadi:

$$P_1 = |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2| \cdot \sin(\delta - \varphi) \quad \text{W}$$

Dimana diketahui  $P_1 = P_e$ ,  $P_{\max} = |Y_{12}| \cdot |E_1| \cdot |E_2|$ , dan  $Y_{12}$  diubah menjadi impedansi  $X_{12}$ , maka didapat :

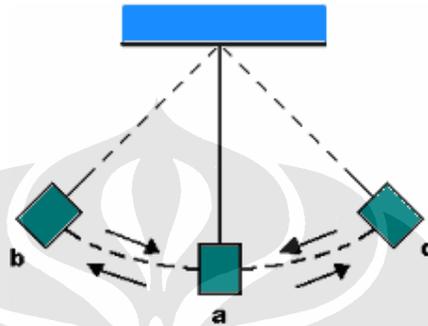
$$P_e = \frac{|E_1| \cdot |E_2|}{|X_{12}|} \cdot \sin(\delta - \varphi) \quad \text{W} \quad (2.25)$$

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

Persamaan (2.25) dan (2.26) diatas adalah persamaan sudut daya yang memperlihatkan daya listrik  $P_e$  dari sistem sebagai fungsi dari sudut daya  $\delta$ .

### 2.3 KRITERIA SAMA LUAS (EQUAL AREA CRITERION)

Apabila suatu sistem tenaga listrik mengalami suatu gangguan, maka keseimbangan sistem akan terganggu. Untuk memahami kejadian tersebut, sistem tenaga yang berada dalam keadaan normal dapat disamakan dengan sebuah pendulum yang diam. Dengan kata lain, sistem dalam kondisi tunak.



Gambar 2.3 Analogi ayunan sudut daya [2]

Pada kondisi tunak pendulum berada di posisi a. Apabila terjadi gangguan pendulum akan berayun ke posisi b. Besarnya ayunan dari a ke b ditentukan oleh lamanya gangguan itu dapat diatasi. Apabila gangguan telah teratasi, pendulum akan bergerak dari b-a-c. Ayunan pendulum dari b-a-c kemudian dari c-a-b dan seterusnya adalah masa transient dari sistem tersebut. Apabila sistem dapat meredam gerakan pendulum sehingga kembali diam pada posisi a dan sistem tersebut kembali ke keadaan tunak, maka sistem dikatakan stabil.

Untuk menganalisa kejadian stabilitas peralihan dapat dilakukan dengan dua cara yaitu secara :

1. matematis
2. grafis

Analisa matematis dilakukan dengan mencari penyelesaian persamaan ayunan (swing equation). Persamaan ayunan merupakan persamaan yang non linier. Walaupun untuk sistem hanya dengan satu generator, sulit untuk mencari penyelesaiannya, kecuali dengan bantuan komputer.

Analisa grafis dilakukan dengan menggunakan metode sama luas (equal area criterion). Untuk menjelaskan tentang metode sama luas perlu dilihat kembali persamaan (2.14) :

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

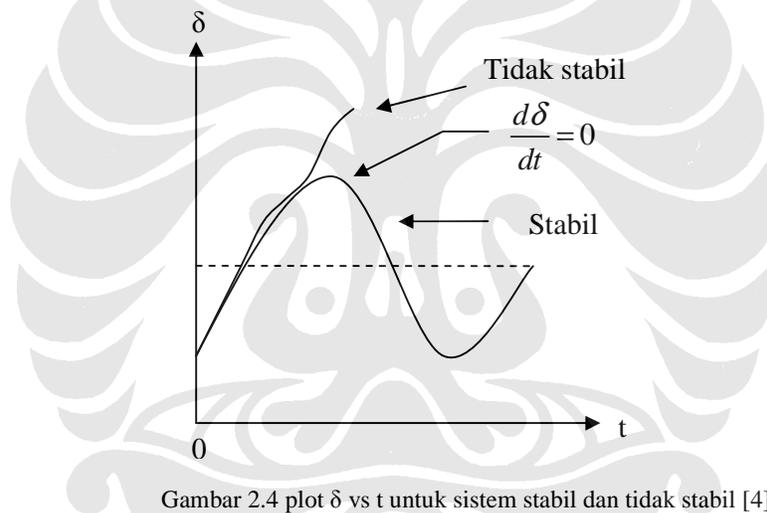
Jika sistem tidak stabil,  $\delta$  akan terus naik bersamaan dengan bertambahnya waktu dan mesin kehilangan keserempakannya (synchronism) atau dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\frac{d\delta}{dt} > 0 \quad (2.27a)$$

Sebaliknya sistem akan dalam keadaan stabil bila  $\delta$  berbentuk gelombang (nonsinusoidal) atau dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$\frac{d\delta}{dt} = 0 \quad (2.27b)$$

Kedua situasi ini diperlihatkan oleh gambar berikut :



Gambar 2.4 plot  $\delta$  vs  $t$  untuk sistem stabil dan tidak stabil [4]

Bila dikalikan sisi kiri dan kanan dengan  $2 \cdot \frac{d\delta}{dt}$  maka akan didapatkan :

$$2 \cdot \frac{d\delta}{dt} \cdot \frac{d^2\delta}{dt^2} = 2 \cdot \frac{d\delta}{dt} \cdot \frac{P_a}{M}$$

Dengan mengintegrasikan kedua sisi tersebut diperoleh :

$$2 \cdot \frac{d\delta}{dt} \int \frac{d}{dt} \left( \frac{d\delta}{dt} \right) = \frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta_x} P_a d\delta$$

$$\left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta_x} P_a d\delta \quad \text{atau}$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \left( \frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta_x} P_a d\delta \right)^{1/2} \quad (2.28)$$

Dimana :

$\delta_x$  adalah sudut rotor untuk waktu  $t = x$

$\delta_0$  adalah sudut rotor untuk waktu  $t = 0$

Dari persamaan (2.27b) dan persamaan (2.28), persamaan untuk kondisi kestabilan dapat ditulis sebagai berikut :

$$\left( \frac{2}{M} \int_{\delta_0}^{\delta_x} P_a d\delta \right)^{1/2} = 0 \quad \text{atau} \quad \int_{\delta_0}^{\delta_x} P_a d\delta = 0 \quad (2.29)$$

Seperti pada persamaan (2.9) bahwa  $P_a$  atau daya akselerasi adalah selisih antara daya mekanis dan listrik sistem:

$$P_a = P_m - P_e \quad \text{per unit}$$

maka persamaan (2.29) menjadi:

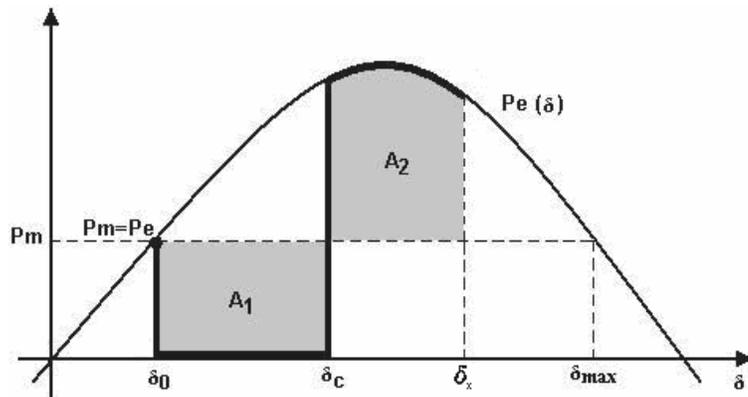
$$\int_{\delta_0}^{\delta_x} (P_m - P_e) d\delta = 0$$

Jika gangguan terjadi pada saat  $\delta_0$  dan berakhir pada saat  $\delta_c$ , dimana  $\delta_0 < \delta_c < \delta_x$  persamaan yang muncul adalah :

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

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_e - P_m) d\delta \quad (2.30)$$

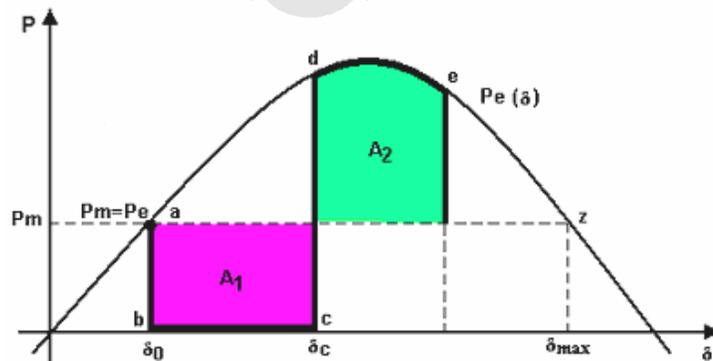
Dari persamaan (2.30) dapat dilihat bahwa luas daerah yang dibentuk oleh selisih daya mekanis dan daya listrik selama terjadinya gangguan dalam fungsi sudut daya adalah sama dengan luas yang terbentuk akibat selisih daya listrik dan daya mekanis setelah gangguan selesai sampai sudut daya mulai berayun. Persamaan (2.30) dapat diperlihatkan oleh grafik daya listrik sebagai fungsi dari sudut daya adalah sebagai berikut :



Gambar 2.5 Grafik daya listrik sebagai fungsi dari sudut daya [2]

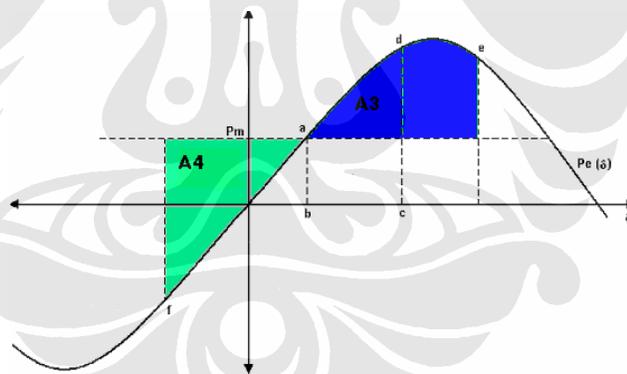
Pada grafik 2.5 diatas sesuai dengan persamaan (2.30) yang menyatakan bahwa  $\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_e - P_m) d\delta$ , dimana  $\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta$  diwakili oleh daerah arsir  $A_1$  dan  $\int_{\delta_c}^{\delta_x} (P_e - P_m) d\delta$  diwakili oleh daerah arsir  $A_2$ . Prinsip kerja dengan menggunakan analisa grafik tersebut yang ada di atas lebih dikenal dengan nama criteria sama luas atau *equal area criterion*. Jika luas daerah  $A_2$  minimum sama dengan luas  $A_1$ , maka sistem dapat dikatakan stabil secara peralihan. Jika luas daerah  $A_1$  melebihi luas daerah  $A_2$ , maka sistem dikatakan tidak stabil dan perlu bantuan alat atau metode tertentu untuk memperbaiki stabilitas sistem tersebut.

Penjelasan dari grafik equal area criterion akan dijelaskan sebagai berikut :



Gambar 2.6 Gangguan terjadi antara  $\delta_0$  sampai dengan  $\delta_c$  dan simpangan  $\delta$  dan  $\omega_m$  terhadap waktu [2]

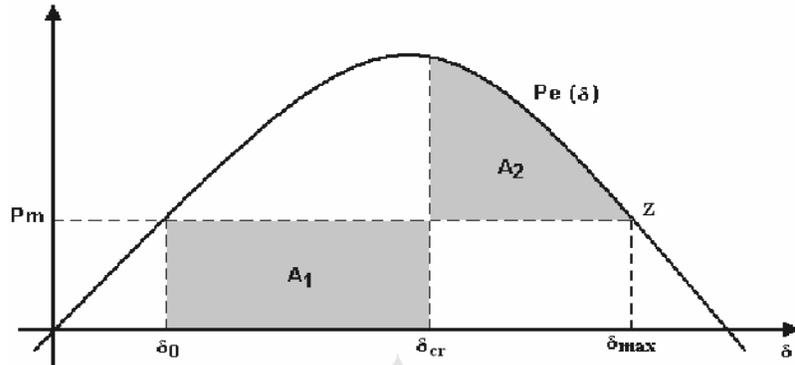
Gambar 2.6 memperlihatkan bahwa gangguan terjadi pada selang sudut daya antara sudut daya serempak  $\delta_0$  sampai  $\delta_c$ . Daya elektrik akan bergerak dengan arah a-b-c-d. Ketika terjadi gangguan, sudut daya akan bertambah tetapi penambahan ini tidak diikuti dengan penambahan daya elektrik sehingga mengakibatkan adanya daya mekanis yang tidak terkonversi ke daya elektrik, sehingga daya mekanis tersebut akan mempercepat putaran rotor pembangkit. Oleh karena itu luasan yang terbentuk oleh a-b-c ( $A_1$ ) disebut sebagai daerah akselerasi. Ketika gangguan selesai sudut daya yang pada keadaan pertama sudah menyimpang akan terus menyimpang sampai luasan daerah  $A_1$  yang terbentuk akibat adanya gangguan disamakan oleh daerah  $A_2$ . Pada daerah  $A_2$  gerakan dari rotor akan diperlambat karena beban yang tadinya “lepas“ kembali terhubung pada generator dan daya elektrik lebih besar dari daya mekanis generator sehingga pada saat ini rotor akan mengalami perlambatan atau deselerasi. Oleh karena itu luasan  $A_2$  disebut sebagai daerah deselerasi. Setelah itu sudut daya akan berayun balik mendekati sudut serempak sebelum terjadinya gangguan.



Gambar 2.7 Ayunan balik dari sudut daya  $\delta$  [2]

Setelah luasan yang dibentuk oleh area  $A_2$  telah sama dengan luasan yang dibentuk oleh area  $A_1$ , maka sudut daya akan berayun balik mendekati sudut daya pada keadaan tunak dan akan membentuk daerah  $A_3$ . Sementara itu rotor pada pembangkit terus diperlambat hingga membentuk daerah  $A_4$  yang luasnya harus sama dengan luas daerah  $A_3$ . Setelah itu rotor akan dipercepat lagi. Keadaan ini akan terus berulang sampai sudut daya kembali kepada keadaan tunak atau akan terus berayun karena sistem tidak mempunyai redaman yang baik.

## 2.4 SUDUT PEMUTUSAN KRITIS [2]



Gambar 2.8 Sudut kritis gangguan pada stabilitas peralihan

Luas daerah  $A_1$  tergantung kepada lamanya waktu pemutusan gangguan, sedangkan luas gangguan  $A_2$  ada batasnya pada saat posisi sudut dayanya mencapai  $\delta_{\max}$  yaitu posisi  $z$ , sehingga luas  $A_1$  ada batasnya agar selalu memungkinkan  $A_1 = A_2$ , yang artinya waktu pemutusan gangguan ada batasnya yang disebut waktu pemutusan kritis  $t_{cr}$  pada saat sudut daya mencapai  $\delta_{cr}$ . Apabila batas waktu terlewati yang artinya juga  $\delta_{cr}$  terlewati akan mengakibatkan  $A_1$  selalu lebih besar daripada  $A_2$  yang artinya luas daerah  $A_2$  tidak dapat menyamai luas  $A_1$ . Untuk menghitung sudut pemutusan kritis, dilakukan perhitungan sebagai berikut :

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

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

$$= -P_{\max} (\cos \delta_{\max} - \cos \delta_{cr}) - P_m (\delta_{\max} - \delta_{cr})$$

$$= P_{\max} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{\max}) - P_m (\delta_{\max} - \delta_{cr})$$

pada kondisi  $A_1 = A_2$  maka :

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

Jika diketahui bahwa :

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

Maka diperoleh :

$$\begin{aligned}
\cos \delta_{cr} &= \cos(\pi - \delta_0) + \frac{P_{\max} \sin \delta_0}{P_{\max}} (\pi - \delta_0 - \delta_0) \\
\cos \delta_{cr} &= -\cos \delta_0 + \sin \delta_0 (\pi - 2\delta_0) \\
\delta_{cr} &= \cos^{-1}[(\pi - 2\delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0]
\end{aligned} \tag{2.31}$$

## 2.5 WAKTU PEMUTUSAN KRITIS [3]

Pada saat diputuskannya gangguan, peningkatan kecepatan rotor dan pemisahan sudut antara generator dan rel tak terhingga berturut-turut diberikan oleh :

$$\left. \frac{d\delta}{dt} \right|_{t=t_c} = \frac{\omega P_m}{2H} t_c \tag{2.32a}$$

Bila diintegrasikan menjadi :

$$\delta(t) \Big|_{t=t_c} = \frac{\omega P_m}{4H} t_c^2 + \delta_0 \tag{2.32b}$$

Nilai  $\delta_{cr}$  yang dihitung dari persamaan (2.30), bila dimasukkan ke dalam sisi sebelah kiri persamaan (2.31b) akan menghasilkan :

$$\delta_{cr} = \frac{\omega P_m}{4H} t_{cr}^2 + \delta_0 \tag{2.33}$$

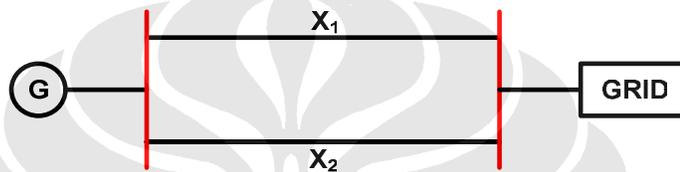
Dan dari sini diperoleh :

$$t_{cr} = \sqrt{\frac{4H(\delta_{cr} - \delta_0)}{\omega P_m}} \tag{2.34}$$

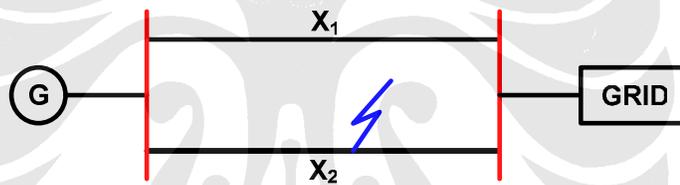
yang merupakan waktu pemutusan kritis.

## 2.6 PENGARUH REAKTANSI TRANSFER PADA SUDUT PEMUTUSAN KRITIS

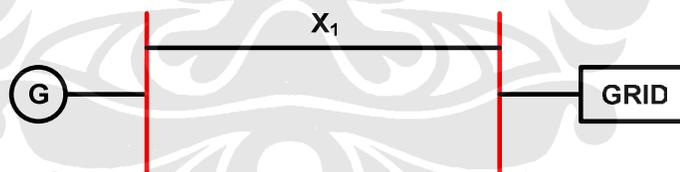
Pada persamaan (2.25) dan (2.26), terlihat bahwa  $P_{max}$  berbanding terbalik dengan variabel reaktansi transfer sistem  $X_{12}$ . Nilai  $P_{max}$  akan semakin besar jika  $X_{12}$  bernilai kecil dan sebaliknya  $P_{max}$  akan semakin kecil jika  $X_{12}$  bernilai besar. Pada sistem yang terinterkoneksi, besar reaktansi transfer ini berbeda-beda untuk kondisi sebelum terkena gangguan, saat terjadi gangguan, sesudah gangguan, dan jenis gangguan yang terjadi. Berikut ini adalah gambar rangkaian ekivalen dari sistem dengan tiga kondisi tersebut :



Gambar 2.9 Kondisi sistem sebelum terkena gangguan



Gambar 2.10 Kondisi sistem saat terkena gangguan



Gambar 2.11 Kondisi sistem sesudah dilakukan pemutusan terhadap gangguan

Berikut ini adalah beberapa persamaan yang menyangkut tiga kondisi tersebut di atas. Sebelum gangguan terjadi, daya elektris  $P_e$  yang dapat dicatu oleh generator ke sistem adalah :

$$P_e = P_{max} \cdot \sin \delta \quad (2.35)$$

Sedangkan, saat terjadi gangguan,  $P_e$  yang dapat dicatu oleh generator ke sistem adalah :

$$P_e = r_1 \cdot P_{max} \cdot \sin \delta \quad (2.36)$$

dan saat gangguan diputus,  $P_e$  yang dapat dicatu oleh generator ke sistem adalah :

$$P_e = r_2 \cdot P_{\max} \cdot \sin \delta \quad (2.37)$$

Dengan :  $r_1 = \frac{X_{12}}{X_{12}'}$  dan

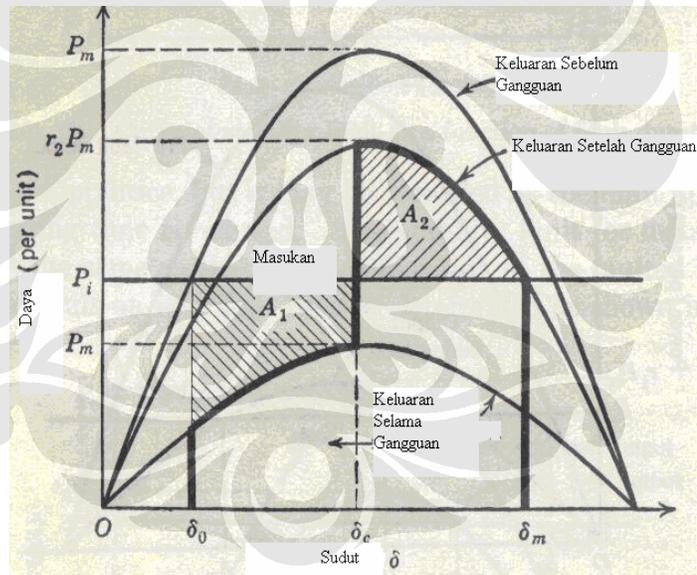
$$r_2 = \frac{X_{12}}{X_{12}''}$$

$X_{12}$  : reaktansi transfer sebelum terjadi gangguan

$X_{12}'$  : reaktansi transfer saat terjadi gangguan

$X_{12}''$  : reaktansi transfer sesudah gangguan diputuskan

Nilai dari  $r_1$  dan  $r_2$  akan mempengaruhi penyelesaian stabilitas dengan kriteria sama luas, dan mempengaruhi sudut pemutusan kritis dan waktu pemutusan kritis. Dibawah ini merupakan gambar kurva  $P$  vs  $\delta$  untuk kondisi sebelum, saat, dan sesudah :



Gambar 2.12 Kurva  $P$  vs  $\delta$  untuk kondisi sebelum, saat, dan sesudah gangguan terjadi [4]

Berdasarkan gambar 2.13 maka sudut kritis  $\delta_{cr}$  dapat diturunkan sebagai berikut :

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} (P_i - P_{\max 2} \cdot \sin \delta) d\delta \quad \text{dan}$$

$$A_2 = \int_{\delta_{cr}}^{\delta_m} (P_{\max 3} \cdot \sin \delta - P_i) d\delta$$

Dimana :  $P_{\max 2} = r_1 \cdot P_m$  dan

$$P_{\max 3} = r_2 \cdot P_m$$

sehingga dihasilkan persamaan berikut ini :

$$(\delta_m - \delta_0) \cdot P_i = r_1 \cdot P_m \cdot \int_{\delta_0}^{\delta_{cr}} \sin \delta d\delta + r_2 \cdot P_m \cdot \int_{\delta_{cr}}^{\delta_m} \sin \delta d\delta \quad (2.38)$$

Dengan mengetahui bahwa  $P_i = P_m \sin \delta_0$  dan menyelesaikannya untuk bagian integral, maka didapatkan persamaan sebagai berikut ini :

$$\begin{aligned} (\delta_m - \delta_0) \cdot P_m \cdot \sin \delta_0 d\delta &= -r_1 \cdot P_m \cdot (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_0) - r_2 \cdot P_m \cdot (\cos \delta_{\max} - \cos \delta_{cr}) \\ (\delta_m - \delta_0) \cdot \sin \delta_0 &= (r_2 - r_1) \cdot \cos \delta_{cr} + r_1 \cdot \cos \delta_0 - r_2 \cdot \cos \delta_{\max} \\ \cos \delta_{cr} &= \frac{(\delta_m - \delta_0) \cdot \sin \delta_0 - r_1 \cdot \cos \delta_0 + r_2 \cdot \cos \delta_{\max}}{(r_2 - r_1)} \end{aligned}$$

Sehingga didapatkan persamaan sudut pemutusan kritis  $\delta_{cr}$  sebagai berikut :

$$\delta_{cr} = \arccos \left[ \frac{(\delta_m - \delta_0) \cdot \sin \delta_0 - r_1 \cdot \cos \delta_0 + r_2 \cdot \cos \delta_{\max}}{(r_2 - r_1)} \right] \quad (2.39)$$

## 2.7 METODE MEMPERBAIKI STABILITAS PERALIHAN

Stabilitas peralihan sangat dipengaruhi oleh jenis dan lokasi gangguan [4]. Selain itu, untuk kasus mesin tunggal yang dihubungkan dengan infinite bus, dapat dilihat dari persamaan iterasi sudut daya  $\Delta \delta_n = \Delta \delta_{n-1} + \frac{(\Delta t)^2}{M} P_{a(n-1)}$ , bertambahnya konstanta inersia M dari generator, menyebabkan perubahan sudut daya menjadi kecil, yang berarti ayunan sudut daya lebih kecil pada interval waktu tertentu sehingga dapat meningkatkan stabilitas sistem. Cara ini jarang dipakai karena alasan ekonomi dan alasan berat rotor yang terlalu berlebih. Cara yang sering digunakan dalam prakteknya untuk meningkatkan stabilitas sistem adalah : [4]

1. Meningkatkan tegangan terminal sistem
2. Mengurangi reaktansi transfer
3. Menggunakan pemutus tenaga kecepatan tinggi dan pemutus tenaga *recloser*.

Metode-metode yang dikembangkan berdasarkan cara-cara tersebut : [1]

1. Pembersihan gangguan dengan sangat cepat (*High Speed Fault Clearing*)
2. Pengurangan reaktansi sistem transmisi
3. Kompensasi dengan *regulated shunt*
4. Pengereman dinamis (*Dynamic Braking*)
5. Pensaklaran reaktor (*Reactor Switching*)
6. Operasi kutub independen dari pemutus tenaga (*Independent Pole Operation Circuit Breaker*)
7. Pensaklaran satu kutub (*Single Pole Switching*)
8. Pengkatuban cepat turbin uap (*Steam Turbine Fast Valving*)
9. Pemutusan generator (*Generator Tripping*)
10. Pengendalian sistem terpisah dan pembagian beban (*Controlled System Separation and Load Shedding*)
11. Sistem eksitasi sangat cepat (*High Speed Excitation Systems*)
12. Pengendalian eksitasi diskontinu
13. Pengendalian sambungan transmisi HVDC

Tujuan perbaikan stabilitas peralihan adalah sebagai berikut : [1]

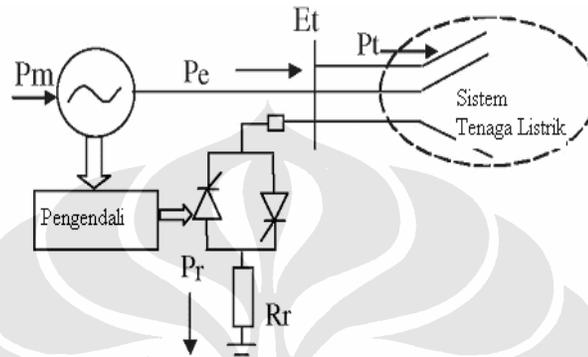
1. Pengurangan pengaruh yang mengganggu dengan memperkecil dampak dan durasi gangguan
2. Meningkatkan pengembalian keserempakan
3. Pengurangan torsi akselerasi dengan kendali daya mekanis dari penggerak utama (*prime mover*)
4. Pengurangan torsi akselerasi dengan menambah beban buatan

### **2.7.1 Perbaikan Stabilitas Peralihan dengan Menggunakan *Braking Resistor***

Metode pengereman dinamis (*dynamic braking*) menggunakan konsep memberikan beban listrik buatan selama terjadi gangguan peralihan untuk menyerap energi transient berlebih dari generator yang pada akhirnya mengurangi percepatan rotor. Salah satu bentuk dari penggunaan metode pengereman dinamis adalah *braking resistor*. [1]

*Braking resistor* adalah beban resistif yang ditempatkan di dekat pembangkit. Beban resistif ini berfungsi untuk menggantikan beban yang hilang. Pada saat gangguan *braking resistor* diberikan pada generator melalui pemutus tenaga yang diatur oleh sistem kontrol. [4]

Skema yang ada di bawah ini merupakan diagram *thyristor-controlled braking resistor* yang ada pada umumnya. Bentuknya adalah sebagai berikut :



Gambar 2.13 Sistem tenaga listrik dengan *braking resistor* [7]

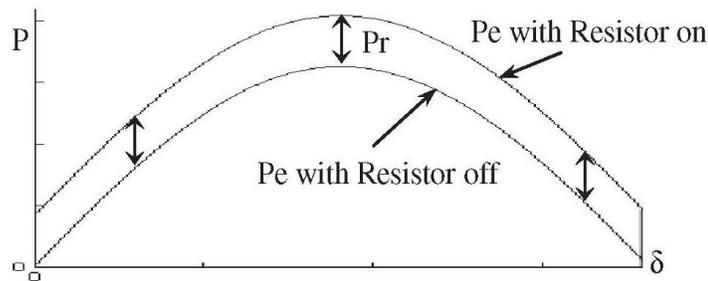
Sistem ini terdiri dari jembatan *thyristor*, tahanan paralel, dan sebuah pengendali.  $P_m$  dan  $P_e$  menyatakan daya masukan mekanis dan daya keluaran listrik. Sedangkan,  $P_t$  adalah daya setelah rel terminal mesin dan  $P_r$  adalah daya yang diserap oleh *resistor*.  $E_t$  adalah tegangan terminal dan  $R_r$  adalah nilai tahanan *braking resistor*. Sistem dengan sebuah *braking resistor* mempunyai daya keluaran  $P_e$  sebesar : [7]

$$P_e = P_r + P_t \quad (2.40)$$

Daya yang diserap oleh *braking resistor* adalah : [7]

$$P_r = E_t^2 / R_r \quad (2.41)$$

Pengaktifan *braking resistor* membuatnya dapat menyerap energi yang dihasilkan dari generator dan menaikkan daya keluaran listrik yang diproduksi mesin generator. Dari sudut pandang karakteristik sudut daya yang dalam hal ini berarti sambungan *braking resistor* mengakibatkan perubahan kurva sudut daya mesin sebagai dampak dari adanya nilai  $P_r$ , seperti pada gambar berikut ini :



Gambar 2.14 Kurva karakteristik sudut daya dari sistem tenaga listrik dengan *braking resistor* [7]

Untuk sistem di atas, tujuan dasar dari pendekatan kriteria sama luas adalah untuk mengurangi semua energi kinetik pada mesin yang terganggu dengan menggunakan *braking resistor*. Tujuan ini dapat diperoleh dengan memperkecil semua luas daerah akselerasi A1 pada gambar 2.6, yang dapat dilakukan dengan mengendalikan *braking resistor* untuk memperbaiki kurva sudut daya dari mesin yang terganggu. Dari kriteria sama luas, jika daerah A1 diperkecil, maka daerah A2 akan turut mengecil juga. Sebagai dampaknya ayunan sudut daya sistem dan osilasinya dapat diredam.

## 2.8 PENGENALAN DASAR LOGIKA FUZZY

Sebuah sistem dalam dunia nyata sangatlah kompleks, kekompleksan ini terjadi sebagai akibat dari masalah ketidakpastian dalam suatu permasalahan yang membentuk sesuatu yang ambigu. Untuk menyelesaikan masalah ini digunakanlah suatu metode yang disebut logika fuzzy. Logika Fuzzy pertama kali diperkenalkan oleh Zadeh pada tahun 1965. Pengertian dasar dari logika fuzzy adalah metode untuk menangani segala sesuatu yang bersifat tidak pasti, ambigu dari suatu sistem.

Sebelum digunakan logika fuzzy, dikenal terlebih dahulu metode konvensional yang disebut logika klasik (crisp). Dalam metode hanya dikenal dua buah elemen yaitu elemen yang merupakan keanggotaan fungsi tersebut dan elemen yang bukan merupakan keanggotaan fungsi tersebut. Jadi keanggotaan elemen dalam sebuah crisp adalah “ya” (dalam keanggotaan) atau “tidak” (bukan

anggota). Seiring dengan semakin kompleksnya suatu sistem maka metode ini dirasa tidak dapat lagi menjawab berbagai tantangan yang muncul.

Dalam logika konvensional hasil keluaran yang dihasilkan adalah benar atau salah, ya atau tidak, 0 atau 1 dalam susunan bilangan biner. Misalkan tinggi badan seorang anak adalah 170 cm, maka dalam logika konvensional tinggi badan anak tersebut adalah tepat 170 cm. Tetapi bila ada sebuah pernyataan anak itu tinggi, maka akan timbul suatu ketidakpastian mengenai tinggi anak tersebut karena pendapat tiap orang tentang kategori tinggi adalah berbeda-beda. Oleh karena itu logika fuzzy sangat diperlukan sebab keanggotaan dalam fuzzy sangat luas dan dalam hampir semua kasus keanggotaan fuzzy diasumsikan berbentuk unit interval.

Walaupun logika fuzzy bukan merupakan jawaban dari semua masalah teknik yang ada, tetapi untuk masalah dalam teknik pengendalian dimana kesederhanaan menjadi sangat penting maka logika fuzzy menjadi pilihan utama. Beberapa keuntungan penggunaan logika fuzzy dibandingkan metode konvensional :

1. Logika fuzzy lebih mudah dimengerti.
2. Sifatnya yang lebih *flexible* karena tidak memerlukan fungsi alih.
3. Toleransi yang cukup besar terhadap data yang tidak pasti.
4. 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.
5. Bahasa dalam logika fuzzy adalah bahasa yang biasanya dipakai oleh manusia (*variable linguistic*) sehingga lebih mudah dipahami.

## 2.9 FUNGSI KEANGGOTAAN DAN 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 : [5]

$$\mu_A(x) \in [0,1] \quad (2.42)$$

dengan :

$\mu_A(x)$  = nilai keanggotaan elemen x dalam fuzzy set A.

Secara umum, penulisan himpunan fuzzy dapat diklasifikasikan kedalam 2 kelompok, yaitu : [5]

1. Untuk semesta yang diskrit

$$A = \left\{ \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \frac{\mu_A(x_2)}{x_2} + \dots \right\} \quad (2.43)$$

2. Untuk semesta yang kontinu

$$A = \left\{ \int \frac{\mu_A(x)}{x} \right\} \quad (2.44)$$

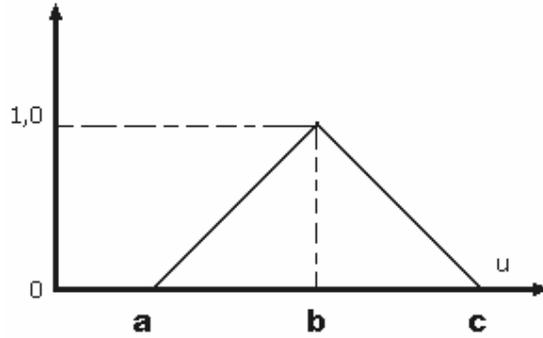
Macam-macam fungsi keanggotaan dari logika fuzzy yang sering digunakan adalah sebagai berikut : [6]

- 1) Fungsi keanggotaan segitiga
- 2) Fungsi keanggotaan trapesium
- 3) Fungsi keanggotaan S
- 4) Fungsi keanggotaan n
- 5) Fungsi keanggotaan eksponensial

### **Fungsi keanggotaan segitiga**

Fungsi keanggotaan fuzzy tipe ini ditentukan oleh parameter-parameter menurut persamaan sebagai berikut :

$$T(u; a, b, c) = \begin{cases} 0; u < a \\ (u - a)/(b - a); a \leq u \leq b \\ (c - u)/(c - b); b \leq u \leq c \\ 0; u > c \end{cases} \quad (2.45)$$

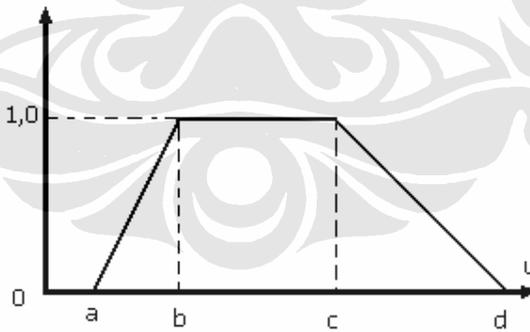


Gambar 2.15 Fungsi keanggotaan tipe Segitiga

### Fungsi keanggotaan trapesium

Fungsi keanggotaan fuzzy tipe trapesium ditentukan oleh beberapa parameter menurut persamaan sebagai berikut :

$$Tr(u; [a, b, c, d]) = \begin{cases} 0; & u \leq a \text{ dan } u \geq d \\ \left(\frac{u-a}{b-a}\right); & a \leq u \leq b \\ 1; & b \leq u \leq c \\ \left(\frac{d-u}{d-c}\right); & c \leq u \leq d \end{cases} \quad (2.46)$$



Gambar 2.16 Fungsi keanggotaan tipe Trapesium

## 2.10 OPERASI HIMPUNAN FUZZY

Untuk melakukan manipulasi sistematis pada himpunan fuzzy dapat dilakukan dengan cara operasi himpunan fuzzy pada fungsi keanggotaan. Berikut ini akan dibahas beberapa operasi pada himpunan fuzzy jika diberikan dua buah himpunan fuzzy A dengan fungsi keanggotaan  $\mu_A$  dan B dengan fungsi keanggotaan  $\mu_B$  pada himpunan semesta X.

### 1. *Intersection* (irisan)

Irisan dari dua himpunan fuzzy A dan B direpresentasikan dalam persamaan:

$$\begin{aligned} \mu_{\underline{A} \cap \underline{B}}(x) &= \mu_{\underline{A}}(x) \wedge \mu_{\underline{B}}(x) \\ \mu_{\underline{A} \cap \underline{B}}(x) &= \min \{ \mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(x) \}, x \in X \end{aligned} \quad (2.47)$$

### 2. *Union* (gabungan)

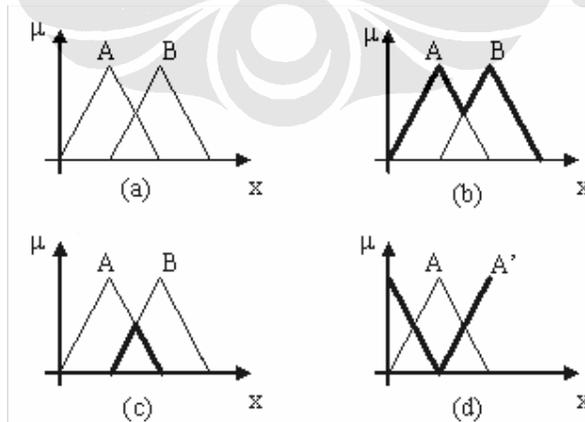
Gabungan dua himpunan fuzzy A dan B ditunjukkan dalam persamaan :

$$\begin{aligned} \mu_{\underline{A} \cup \underline{B}}(x) &= \mu_{\underline{A}}(x) \vee \mu_{\underline{B}}(x) \\ \mu_{\underline{A} \cup \underline{B}}(x) &= \max \{ \mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(x) \}, x \in X \end{aligned} \quad (2.48)$$

### 3. *Complement* (komplemen)

Komplemen dari himpunan fuzzy A ditunjukkan dalam persamaan :

$$\begin{aligned} \underline{A} &= \underline{A}' \\ \mu_{\underline{A}}(x) &= 1 - \mu_{\underline{A}}(x), x \in X \end{aligned} \quad (2.49)$$



Gambar 2.17 : Operasi pada himpunan fuzzy (a) himpunan A dan B (b) Gabungan (c) Irisan (d) Komplemen

## 2.11 FUZZIFIKASI

Fuzzifikasi merupakan suatu proses untuk membuat fungsi keanggotaan sistem fuzzy. Hal ini dilakukan dengan cara mengenali nilai yang diperkirakan adalah *crisp* dan pasti sebenarnya tidak pasti sama sekali. Nilai-nilai ini memiliki ketidakpastian. Jika ketidakpastian ini timbul karena ketidakpresisian, ambiguitas, atau keraguan maka nilai tersebut mungkin samar dan dapat dinyatakan sebagai anggota himpunan fuzzy. [5]

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 :

1) Intuisi

Metode ini tergantung kemampuan manusia dalam mengembangkan keanggotaan fungsi melalui kemampuan intelektual dan pemahaman. Intuisi melibatkan pengetahuan konteks dan pengertian tentang sebuah masalah. Intuisi juga bisa melibatkan nilai kebenaran bahasa.

2) Inferensi

Pada metode ini digunakan ilmu pengetahuan untuk menarik atau menduga kesimpulan dalam membuat suatu fungsi keanggotaan.

3) Pengurutan ranking

Metode ini menggunakan penilaian oleh individu, kelompok, sebuah polling, atau metode opini lainnya untuk menentukan nilai fungsi keanggotaan ke bentuk fuzzy.

4) 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.

5) *Genetic algorithms*

*Genetic algorithms* adalah sebuah cara yang menampilkan kecerdasan untuk mencari sebuah solusi dari sejumlah solusi yang mendekati tak hingga dengan menggunakan tiga operator dasar yaitu : *reproduction*, *crossover*, dan *mutation*

## 2.12 INFERENSI

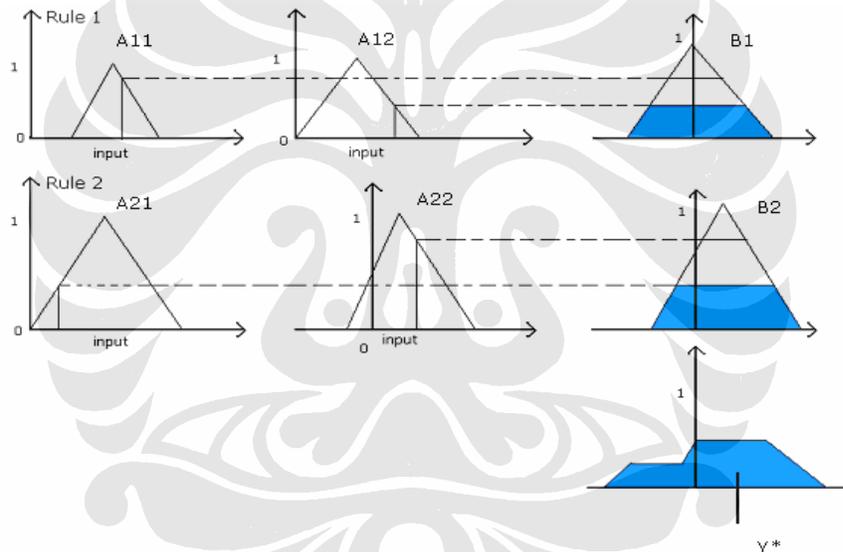
Pada suatu keadaan di mana terjadi beberapa aturan yang berlaku secara bersamaan tetapi menghasilkan keluaran yang berbeda-beda, maka diperlukan suatu teknik yang digunakan untuk metode pengambilan keputusan yang disebut inferensi. Ada beberapa teknik pengambilan keputusan yang digunakan pada inferensi, yaitu :

- 1) Metode max-min

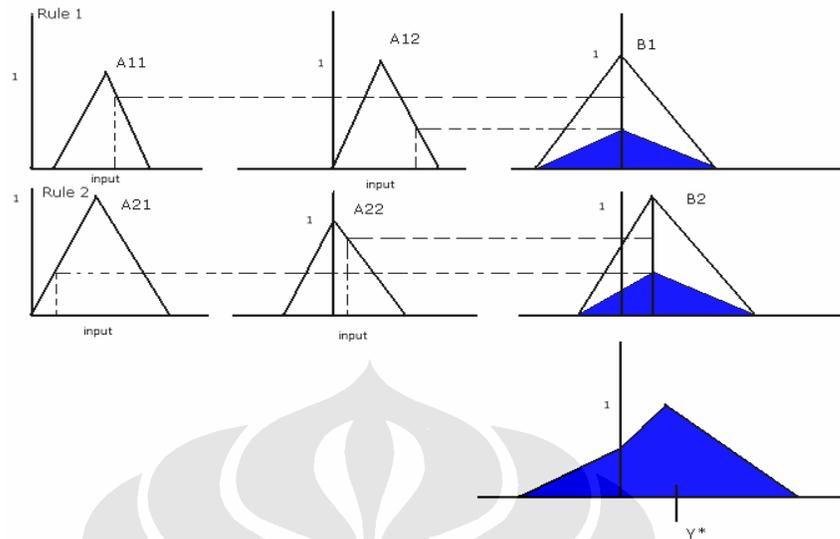
$$\mu_{\underline{A}}(y) = \max \left\{ \min \left[ \mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{R}}(x, y) \right] \right\} x \in X \quad (2.50)$$

- 2) Metode perkalian maksimum (max product)

$$\mu_{\underline{A}}(x) = \max \left[ \mu_{\underline{A}} \cdot \mu_{\underline{R}}(x, y) \right]; x \in X \quad (2.51)$$



Gambar 2.18 Metode inferensi max – min [5]



Gambar 2.19 Metode inferensi max product [5]

### 2.13 DEFUZZIFIKASI

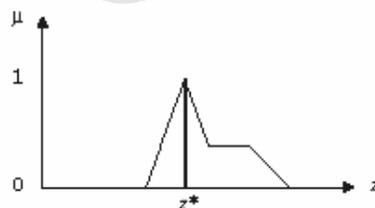
Defuzzifikasi merupakan proses yang memetakan atau mengkonversi dari himpunan fuzzy ke dalam suatu himpunan crisp yang nantinya akan diterapkan menjadi sinyal kendali ke dalam sistem yang akan dikendalikan. Sehingga dengan proses ini hasil yang akan diperoleh sudah bukan lagi merupakan pernyataan-pernyataan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

Beberapa metode defuzzifikasi yang umum dan sering digunakan adalah :

1. Prinsip keanggotaan maksimum (*max membership principle*)

Metode ini dinyatakan dengan pernyataan aljabar berikut ini

$$\mu_c(z^*) \geq \mu_c(z) \text{ untuk semua } z \in Z \quad (2.52)$$



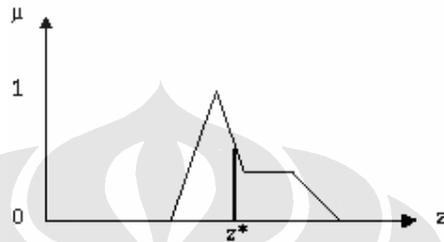
Gambar 2.20 Metode defuzzifikasi keanggotaan maksimum [5]

2. Metode centroid

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

Nilai dari fuzzifikasinya dinyatakan dengan persamaan:

$$z^* = \frac{\int \mu_c(z) \cdot z dz}{\int \mu_c(z) dz} \quad (2.53)$$

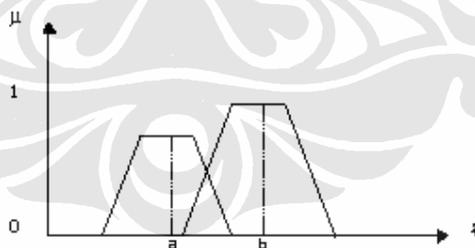


Gambar 2.21 Metode defuzzifikasi centroid [5]

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

Metode ini hanya cocok untuk keluaran yang keanggotaan fungsinya simetris. Persamaan dari nilai rata-rata berbobot adalah :

$$z^* = \frac{\sum \mu_c(\bar{z}) \cdot \bar{z}}{\sum \mu_c(\bar{z})} \quad (2.54)$$

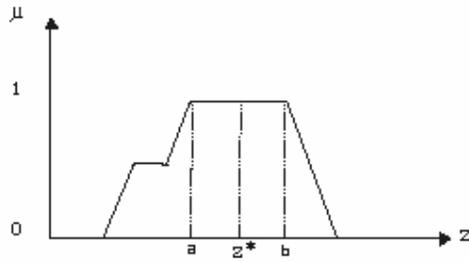


Gambar 2.22 Metode nilai rata-rata berbobot [5]

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

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

$$z^* = \frac{a+b}{2} \quad (2.55)$$



Gambar 2.23 Metode keanggotaan mean-max [5]

## 2.14 BASIS PENGETAHUAN

Basis pengetahuan sistem fuzzy berisi aturan dasar (*rule base*) dan data dasar (*data base*). Data dasar ini menyediakan definisi yang diperlukan oleh parameter fuzzy untuk membentuk fungsi fuzzy yang keanggotaan fungsinya didefinisikan di dalam semesta. Peraturan dasar yang ada dibuat sedemikian rupa dengan menggunakan variabel linguistik yang akan sangat berperan dalam proses pengambilan keputusan untuk dapat mencapai tujuan dari pengendalian. 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).

## **BAB III**

### **PERBAIKAN STABILITAS PERALIHAN MENGUNAKAN BRAKING RESISTOR**

#### **3.1 PENGARUH GANGGUAN TERHADAP SISTEM TENAGA LISTRIK**

Pada suatu sistem tenaga listrik pasti banyak sekali yang melibatkan pembangkit-pembangkit yang terhubung secara paralel satu dengan yang lainnya. Syarat yang harus dipenuhi untuk interkoneksi paralel dari pembangkit-pembangkit ini adalah :

- a) Mempunyai tegangan terminal yang sama
- b) Mempunyai frekuensi yang sama
- c) Mempunyai sudut fasa tegangan yang sama
- d) Mempunyai urutan fasa yang sama.

Apabila semua syarat tadi telah dipenuhi maka sebuah pembangkit dapat dikoneksikan ke jaringan tenaga listrik. Pembangkit yang telah terinterkoneksi dengan jaringan tenaga listrik akan bekerja secara serempak. Bentuk dari keserempakan ini terjadi dalam bentuk:

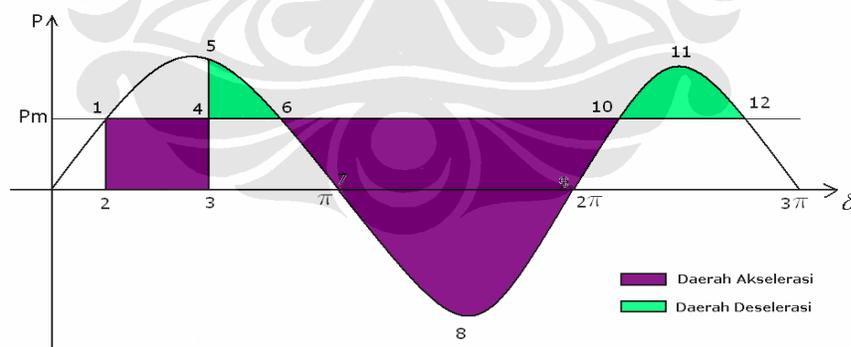
- a) Tegangan terminal yang sama
- b) Frekuensi yang sama
- c) Fasa tegangan keluaran yang sama

Definisi dari kondisi serempak ini adalah sebuah kondisi kesetimbangan dimana setiap pembangkit yang terhubung dengan jaringan tenaga listrik bekerja sesuai dengan proporsinya dalam menyuplai daya ke jaringan tenaga listrik.

Pada saat sebuah pembangkit yang sudah tidak memenuhi kriteria yang ditentukan atau yang mengalami gangguan yang sudah tidak dapat ditoleransi lagi

oleh relai, maka proteksi akan bekerja dan pembangkit tersebut akan diisolasi dari jaringan tenaga listrik untuk alasan keamanan. Perlu diingat tidak selamanya sebuah gangguan akan menyebabkan sebuah pembangkit terisolasi dari jaringan tenaga listrik. Jika gangguan tersebut masih dapat ditoleransi oleh relai proteksi, maka pembangkit tidak akan terputus dengan jaringan tenaga listrik.

Terjadinya gangguan pada sistem akan menyebabkan rotor mengalami percepatan yang mengakibatkan rotor tersebut menyimpang dari kecepatan serempaknya. Percepatan ini akan membentuk luasan 1-2-3 dan 4 yang merupakan akibat dari bertambahnya sudut daya  $\delta$  sesuai dengan persamaan (2.31). Setelah gangguan berakhir, maka rotor akan mengalami perlambatan sehingga akan membentuk luasan 4-5-6. Jika lebih diteliti luasan yang dibentuk oleh daerah 4-5-6 jauh lebih kecil dari pada luasan yang dibentuk oleh daerah 1-2-3-4. Hal ini dapat terjadi apabila pembangkit mengalami gangguan yang cukup lama. Sehingga daerah 4-5-6 akan mencoba menyamakan luasan yang dibentuk oleh daerah 1-2-3-4 agar sistem dapat kembali ke dalam keadaan stabil. Akan tetapi sebelum luasan 4-5-6 dapat menyamai daerah 1-2-3-4 rotor sudah mengalami percepatan lagi dan akan membentuk daerah 6-7-8-9-10. Sehingga daya mekanik rotor kembali menjadi jauh lebih besar dari pada daya elektrik Seperti yang dapat dilihat pada gambar kriteria sama luas berikut ini :



Gambar 3.1 Daerah yang terbentuk akibat daerah deselerasi rotor yang tidak dapat menyamai daerah akselerasi

Hasil luasan yang terbentuk oleh 6-7-8-9-10 akan dicoba untuk disamakan oleh daerah 10-11-12. Tetapi karena daerah 6-7-8-9-10 sudah terlalu luas maka daerah 10-11-12 tidak akan menyamakan daerah 6-7-8-9-10. Jadi daerah

akselerasi akan selalu lebih besar daripada daerah deselerasi dan akan menyebabkan stabilitas sistem tenaga listrik tidak akan tercapai tanpa adanya usaha untuk membuat sistem kembali stabil.

### 3.2 PENGENDALIAN *BRAKING RESISTOR* MENGGUNAKAN LOGIKA FUZZY

Untuk mencapai kembali stabilitas yang hilang akibat gangguan yang terjadi, maka sesuai dengan prinsip kriteria sama luas daerah perlambatan (deselerasi) diusahakan luasnya sama dengan daerah percepatan (akselerasi) yang terbentuk akibat gangguan. Pada metode perbaikan dengan menggunakan *braking resistor* pengendali logika fuzzy untuk menyamakan antara daerah percepatan dan daerah perlambatan digunakan resistansi yang berfungsi menyerap energi berlebih generator dengan cara meningkatkan daya keluaran listrik dari mesin.

Pada metode ini untuk dapat menentukan berapa besar nilai resistansi yang diperlukan oleh sistem digunakan selisih daerah percepatan dengan daerah perlambatan menjadi. Selisih ini nantinya digunakan sebagai input pada pengendali logika fuzzy. Besarnya selisih daerah percepatan dengan daerah perlambatan atau dinyatakan dengan  $\Delta A$  adalah [7]

$$\Delta A_n = \sum_{i=0}^n (M \Delta \omega_i + D \Delta \omega_i) (\int \Delta \omega_i - \int \Delta \omega_{i-1}) \quad (3.1)$$

Dimana  $i$  merupakan waktu terjadinya selisih  $\Delta A$  dan  $n$  adalah jumlah waktu terjadinya selisih  $\Delta A$ . Pada persamaan 3.1 terlihat bahwa nilai yang diukur untuk pengendalian fuzzy adalah perubahan kecepatan rotor ( $\Delta \omega$ ). Nilai  $D$  yaitu faktor peredaman (*damping factor*) dapat diabaikan karena nilainya sangat kecil, maka persamaan 3.1 dapat ditulis ulang menjadi :

$$\Delta A_n = \sum_{i=0}^n (M \Delta \omega_i) (\int \Delta \omega_i - \int \Delta \omega_{i-1}) \quad (3.2)$$

Berdasarkan input  $\Delta A$  pengendali logika fuzzy menentukan berapa besar nilai sudut penyalaan (*firing angle*)  $\alpha$  dari *thyristor*. Dari sudut penyalaan inilah dapat ditentukan besarnya nilai daya resistansi atau  $P_r$  dengan persamaan [8]

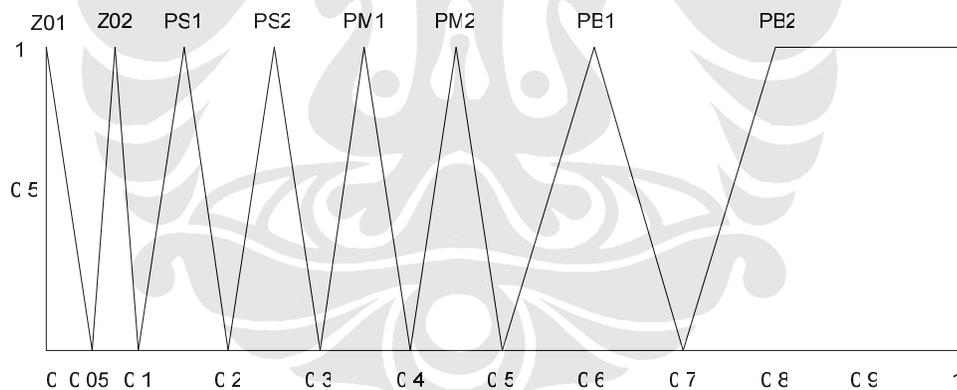
$$\frac{V^2 G_{TCSBR}}{\pi} (\pi - \alpha + 0,5 \sin 2\alpha) = V^2 G \quad (3.3)$$

Dimana  $V$  adalah tegangan rms dari generator,  $G_{TCSBR}$  adalah konduktansi dari *Thyristor Controlled System Braking Resistor*, dan  $G$  adalah konduktansi dari *braking resistor*. Besarnya nilai  $P_r$  dinyatakan oleh  $V^2G$

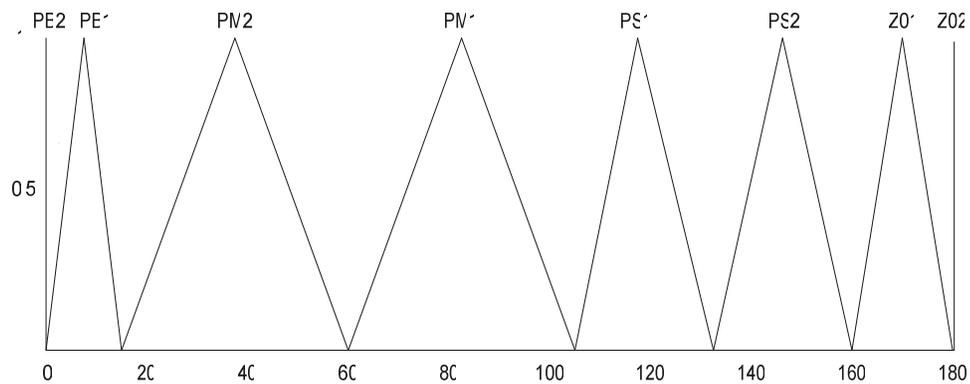
Daya resistansi *braking resistor* ini berguna untuk menggantikan daya listrik yang hilang dari sistem tenaga listrik akibat gangguan. Tujuannya adalah agar daya listrik yang dihasilkan oleh generator sama atau mendekati sama dengan daya mekanis.

### 3.2.1 Fuzzifikasi

Pernyataan linguistik yang digunakan untuk menyatakan input selisih daerah percepatan dengan daerah perlambatan ( $\Delta A$ ) dan output sudut penyalaan *thyristor* ( $\alpha$ ) adalah ZO1 (Zero 1), ZO2 (Zero 2), PS1 (Positive Small 1), PS2 (Positive Small 2), PM1 (Positive Medium 1), PM2 (Positive Medium 2), PB1 (Positive Big 1), dan PB2 (Positive Big 2). Berikut ini adalah keanggotaan fungsi dari input  $\Delta A$  dan output  $\alpha$  :



Gambar 3.2 Fungsi keanggotaan untuk input selisih daerah percepatan dengan daerah perlambatan [7]



Gambar 3.3 Fungsi keanggotaan untuk output sudut penyalakan *thyristor* [7]

Nilai keanggotaan untuk input selisih daerah percepatan dengan daerah perlambatan diambil yang bernilai positif karena perbaikan sistem tenaga listrik dengan menggunakan *braking resistor* hanya dapat bekerja pada saat nilai perubahan kecepatan putar rotor ( $\Delta\omega$ ) bernilai positif dimana pada saat itu sistem kehilangan sejumlah beban yang dapat memicu ketidakstabilan. Pada saat nilai perubahan kecepatan putar rotor bernilai negatif maka *braking resistor* tidak akan menyala.

### 3.2.2 Basis Pengetahuan

Basis aturan (rule base) IF-THEN untuk pengendali logika fuzzy dari *braking resistor* dapat dinyatakan sebagai berikut : [7]

R1 : IF  $\Delta A$  is ZO1 THEN  $\alpha$  is ZO1

R2 : IF  $\Delta A$  is ZO2 THEN  $\alpha$  is ZO2

R3 : IF  $\Delta A$  is PS1 THEN  $\alpha$  is PS1

R4 : IF  $\Delta A$  is PS2 THEN  $\alpha$  is PS2

R5 : IF  $\Delta A$  is PM1 THEN  $\alpha$  is PM1

R6 : IF  $\Delta A$  is PM2 THEN  $\alpha$  is PM2

R7 : IF  $\Delta A$  is PB1 THEN  $\alpha$  is PB1

R8 : IF  $\Delta A$  is PB2 THEN  $\alpha$  is PB2

Berdasarkan basis aturan di atas dapat dinyatakan *fuzzy associative memory* (fam) dari pengendali logika fuzzy dengan bentuk sebagai berikut :

$\alpha$

	ZO1	ZO2	PS1	PS2	PM1	PM2	PB1	PB2
ZO1	ZO1	-	-	-	-	-	-	-
ZO2	-	ZO2	-	-	-	-	-	-
PS1	-	-	PS1	-	-	-	-	-
PS2	-	-	-	PS2	-	-	-	-
PM1	-	-	-	-	PM1	-	-	-
PM2	-	-	-	-	-	PM2	-	-
PB1	-	-	-	-	-	-	PB1	-
PB2	-	-	-	-	-	-	-	PB2

### 3.2.3 Inferensi

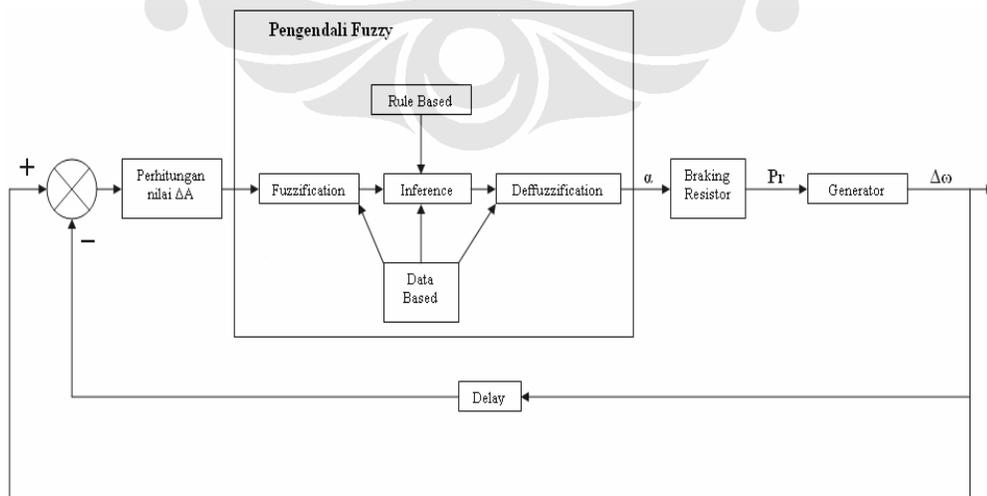
Metode inferensi yang digunakan adalah *max product*.

### 3.2.4 Defuzziikasi

Metode defuzzifikasi yang dipergunakan adalah metode *middle of maxima*.

### 3.2.5 Diagram Blok

Berikut ini adalah gambar dari blok diagram perbaikan stabilitas peralihan menggunakan *braking resistor* pengendali fuzzy dengan metode kriteria sama luas:



Gambar 3.4 Blok diagram perbaikan stabilitas sistem tenaga listrik memakai *braking resistor* pengendali fuzzy dengan menggunakan metode kriteria sama luas

### 3.2.6 Algoritma

Secara garis besar perbaikan stabilitas peralihan sistem tenaga listrik dengan menggunakan *braking resistor* pengendali logika fuzzy dapat dijelaskan melalui diagram alir berikut ini :

Langkah 1 Simulasi dijalankan

Langkah 2 Generator dinyalakan

Langkah 3 Jika beban lepas daya elektrik  $P_e$  sistem turun yang berakibat kecepatan rotor  $\omega$  naik dan sudut rotor  $\delta$  berubah karena daya mekanis  $P_m$  generator tetap. Jika tidak ada beban lepas sistem akan stabil transient.

Langkah 4 Kenaikan kecepatan rotor  $\omega$  mengakibatkan kenaikan nilai  $\Delta\omega_r$ . Kenaikan  $\Delta\omega_r$  digunakan untuk menghitung nilai  $\Delta A$ .

Langkah 5 Nilai  $\Delta A$  diubah dalam bentuk keanggotaan fungsi fuzzy.

Langkah 6 Inferensi dengan metode max product yang menghasilkan keanggotaan fungsi fuzzy  $\alpha$ .

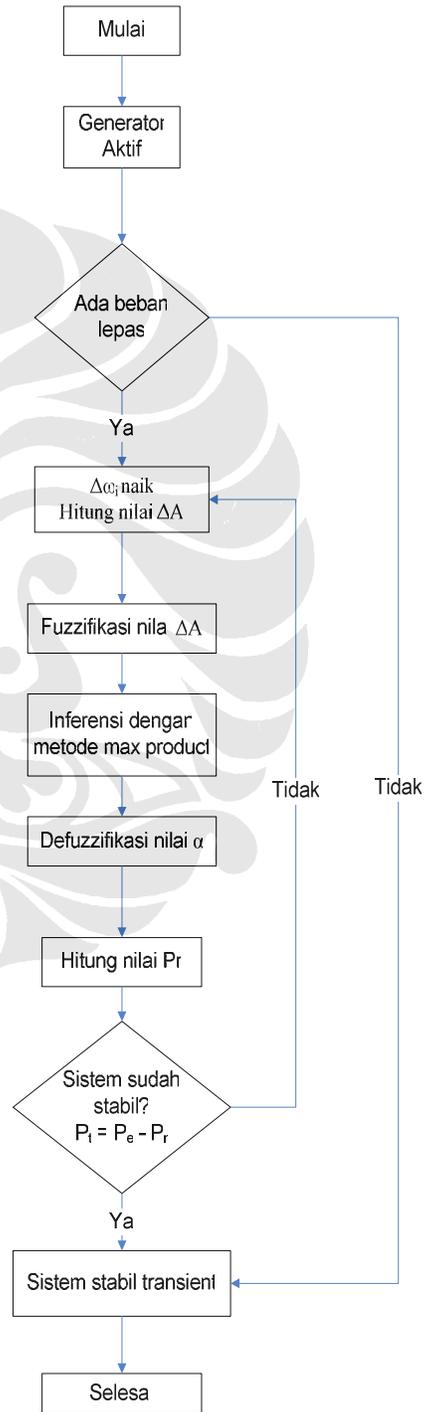
Langkah 7 Nilai keanggotaan fungsi fuzzy  $\alpha$  diterjemahkan menjadi masukan bagi thyristor.

Langkah 8 Thyristor aktif dan memberikan daya resistif  $P_r$  sesuai dengan sudut penyalakan  $\alpha$  yang diberikan oleh pengendali fuzzy.

Langkah 9 Periksa kestabilan pada sistem. Syarat sistem stabil  $\Delta\omega_r = 0$  dan sudut rotor  $\delta$  konstan.

Langkah 10 Sistem sudah stabil.

Langkah 11 Simulasi selesai.



## **BAB IV**

### **SIMULASI DAN ANALISA BRAKING RESISTOR PENGENDALI LOGIKA FUZZY DENGAN METODE KRITERIA SAMA LUAS**

#### **4.1 GAMBARAN UMUM**

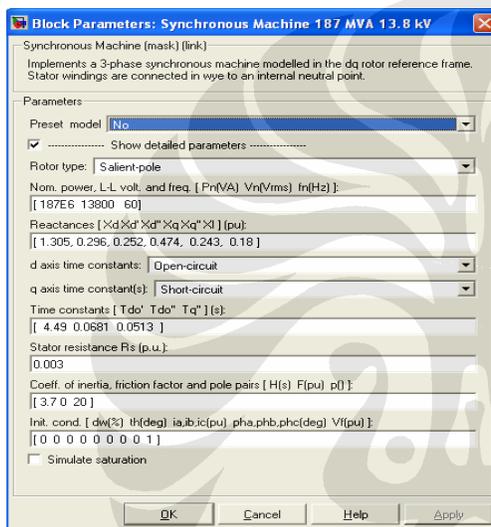
Simulasi sistem tenaga listrik yang dilakukan menggunakan model tiga fasa yang terdiri dari generator sinkron, sistem transmisi, trafo, pemutus tenaga, beban, tegangan jala-jala, dan gangguan. Pada sistem tenaga listrik tersebut beban yang terjadi berubah-ubah dengan waktu pelepasan beban yang berbeda-beda, sehingga bila terjadi satu atau beberapa beban lepas dari sistem akan terjadi variasi perubahan kecepatan generator. Dalam simulasi ini, akan ditunjukkan simulasi kinerja dari *braking resistor* yang diperlukan untuk mengembalikan kestabilan dari sistem tenaga listrik setelah terjadi gangguan. *Braking resistor* ini dikendalikan oleh pengendali logika fuzzy, dengan menggunakan metode kriteria sama luas.

#### **4.2 KOMPONEN DAN PARAMETER SISTEM**

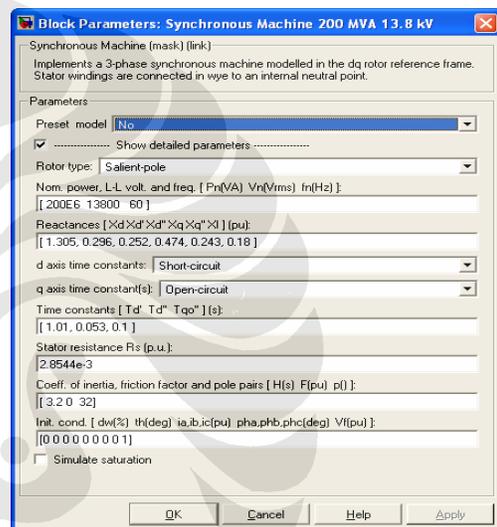
Simulasi dilakukan menggunakan bantuan komputer dengan perangkat lunak MATLAB 7.0.1. Dengan Simulink MATLAB 7.0.1, dilakukan pemodelan-pemodelan seperti yang dijelaskan pada bab ketiga. Simulasi dilakukan sebanyak sebelas kali dengan waktu setiap simulasi 25 detik. Beban yang ditanggung oleh sistem berjumlah 400 MW dengan perincian masing-masing beban 40 MW, 100 MW, 60 MW, 80 MW, dan 120 MW. Waktu pemutusan terjadi dalam periode waktu gangguan yaitu 2 detik sampai 3 detik untuk beban 40 MW, 2 detik sampai 5 detik untuk beban 100 MW, 4 detik sampai 8 detik untuk beban 60 MW, 4 detik

sampai 6 detik untuk beban 80 MW, dan 4 detik sampai 9 detik untuk beban 120 MW. Besar tahanan yang dipakai pada *braking resistor* dapat menyerap daya sebesar 200 MW untuk generator 200 MVA dan 187 MW untuk generator 187 MVA. Pembangkit dan beban dihubungkan oleh saluran transmisi serta terdapat jala-jala tak berhingga (*infinite bus*) yang juga dihubungkan melalui saluran transmisi.

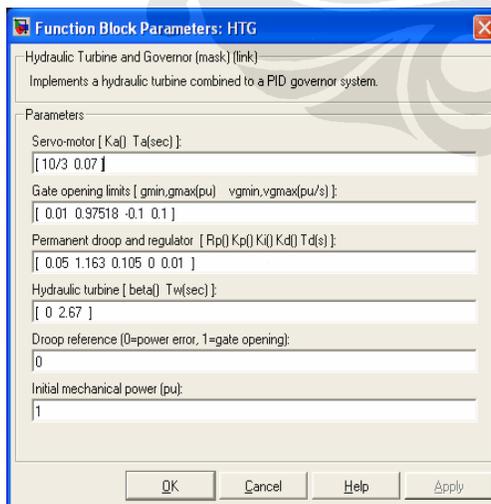
Parameter untuk generator serempak, eksitasi, dan penggerak mula dalam blok simulasi oleh simulink adalah sebagai berikut :



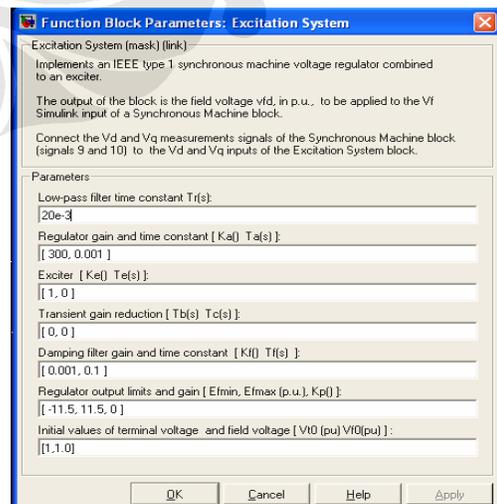
Gambar 4.1 Blok Simulasi Generator Sinkron 187 MVA [9]



Gambar 4.2 Blok Simulasi Generator Sinkron 200 MVA [9]



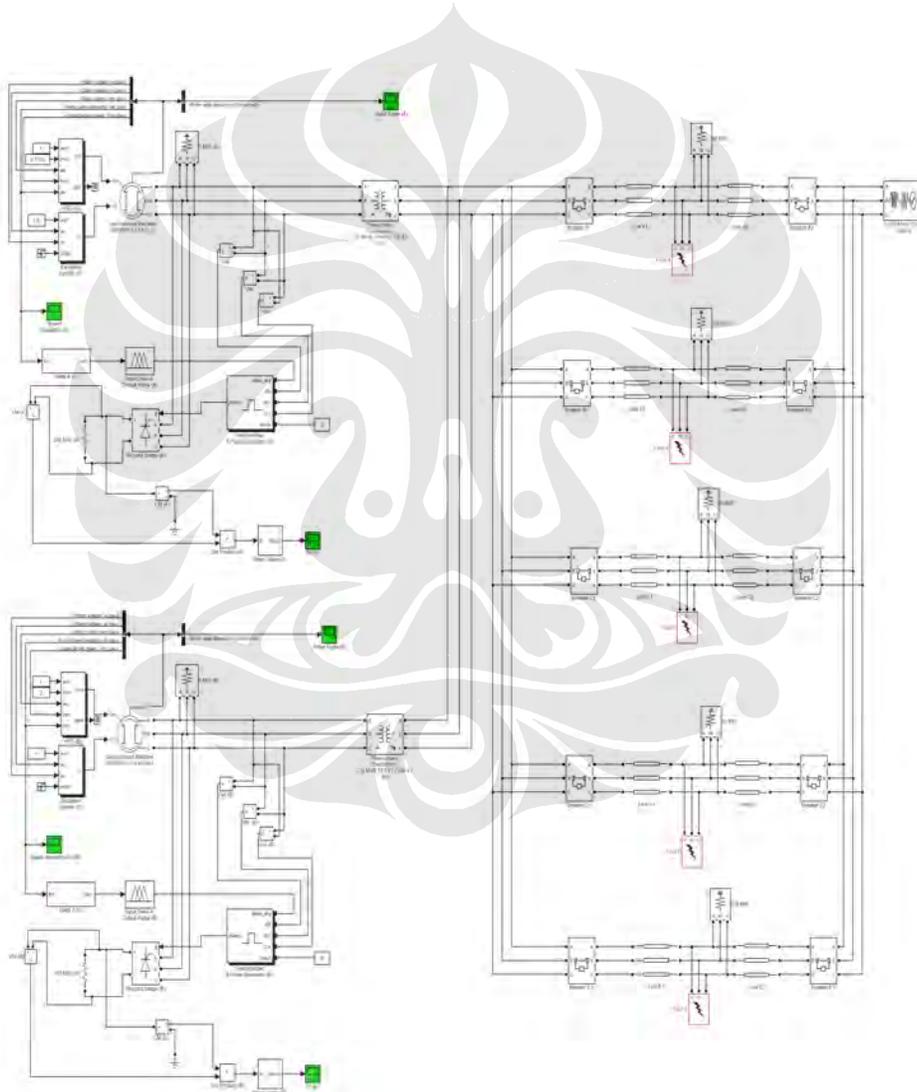
Gambar 4.3 Blok Simulasi Hydraulic Turbine and Governor [9]



Gambar 4.4 Blok Simulasi Excitation System [9]

### 4.3 SIMULASI DAN ANALISA

Saat beban lepas maka kecepatan putar dari rotor akan bertambah. Pertambahan ini mengakibatkan terjadinya perubahan kecepatan ( $\Delta\omega$ ). Munculnya nilai  $\Delta\omega$  membuat terjadinya selisih daerah percepatan dengan daerah perlambatan ( $\Delta A$ ). Berdasarkan nilai  $\Delta A$  ini pengendali logika fuzzy akan menentukan sudut penyalan thyristor ( $\alpha$ ). Nilai  $\alpha$  oleh thyristor digunakan untuk menentukan besar beban yang diperlukan untuk menyerap daya generator yang berlebih. Berikut ini adalah gambar rangkaian simulink MATLAB 7.0.1 :



Gambar 4.5 Rangkaian simulasi perbaikan stabilitas peralihan menggunakan *braking resistor* pengendali logika fuzzy dengan metode kriteria sama luas

Simulasi dan analisa dibagi atas lima bagian yang masing-masing bagian akan diujikan dengan keadaan generator identik dan dengan keadaan generator yang berbeda. Generator identik adalah generator yang mempunyai kapasitas daya dan parameter-parameter yang sama. Generator berbeda adalah generator dengan kapasitas daya dan dengan parameter-parameter yang berbeda. Simulasi dan analisa yang dilakukan yaitu :

1. Sistem tenaga listrik tanpa gangguan dan tanpa *braking resistor*.
2. Sistem tenaga listrik tanpa gangguan dengan *braking resistor*.
3. Sistem tenaga listrik dengan gangguan tanpa *braking resistor*.
4. Sistem tenaga listrik dengan gangguan dan dengan *braking resistor*.
5. Sistem tenaga listrik dengan gangguan dan hanya salah satu generator yang diberikan *braking resistor*.

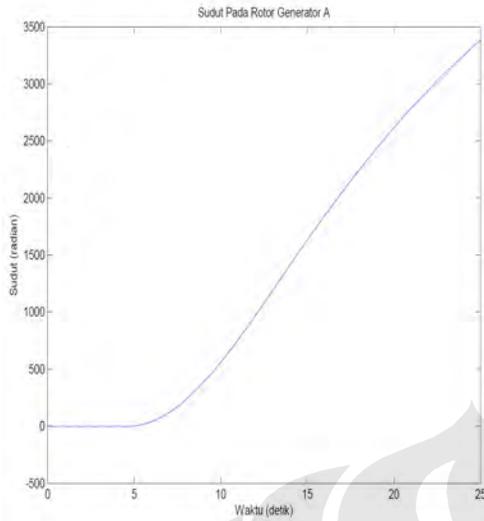
Khusus untuk simulasi dan analisa yang kelima dibuat untuk tiga keadaan. Hal ini dilakukan karena pada generator berbeda, pemasangan *braking resistor* untuk generator 200 MVA saja akan menghasilkan keluaran yang berbeda jika generator 187 MVA saja yang diberikan *braking resistor*.

#### **4.3.1 Simulasi dan Analisa 1 : Sistem Tenaga Listrik Tanpa Gangguan dan Tanpa *Braking Resistor***

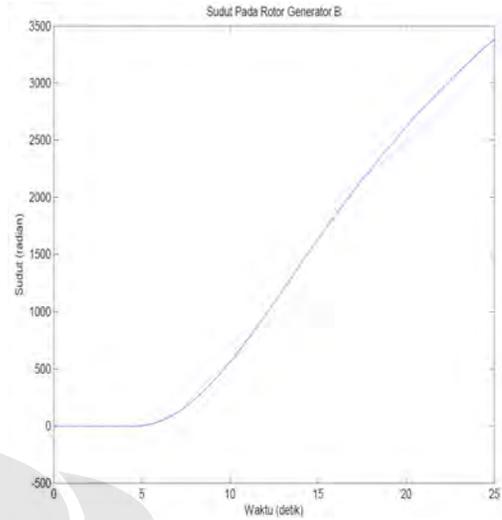
##### **a. Generator Identik**

Saat generator baru dinyalakan terjadi osilasi pada perubahan kecepatan dan sudut rotor yang disebabkan oleh masa peralihan dari generator. Kejadian ini terjadi karena pada saat generator baru dinyalakan, penggerak utama menghasilkan putaran yang belum stabil pada rotor.

Simulasi dua generator identik dengan keadaan tidak mengalami gangguan dan tidak diberikan *braking resistor* menyebabkan sistem tenaga listrik dengan kondisi tidak stabil. Hal ini terjadi karena sistem tidak stabil pada kondisi tunak. Ketidakstabilan pada kondisi tunak timbul sebagai akibat interkoneksi dari dua buah generator yang identik. Dari gambar 4.6 dan 4.7 hasil simulasi sudut rotor menunjukkan bahwa sistem berusaha untuk mempertahankan kestabilan, namun osilasi dari sudut rotor semakin besar dan menyebabkan sistem kehilangan sinkronisasi.

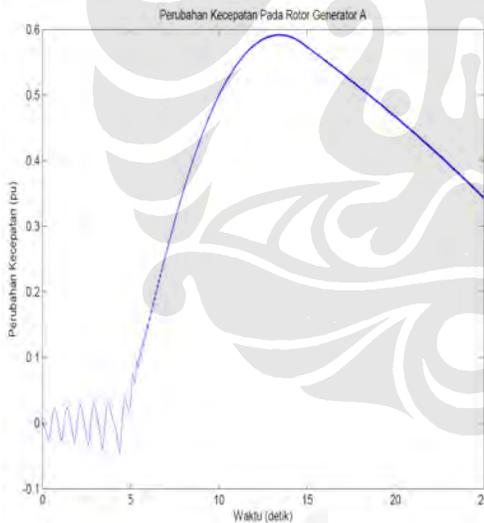


Gambar 4.6 Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator A ( $A=B$ )

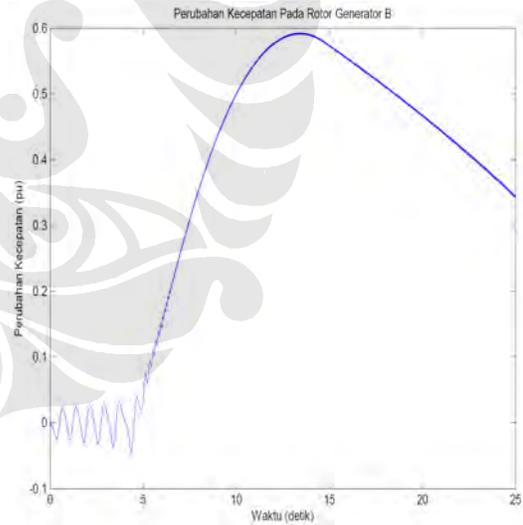


Gambar 4.7 Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator B ( $A=B$ )

Ketidakstabilan sistem pada kondisi tunak ditunjukkan juga oleh perubahan kecepatan seperti yang terdapat pada gambar 4.8 dan 4.9.



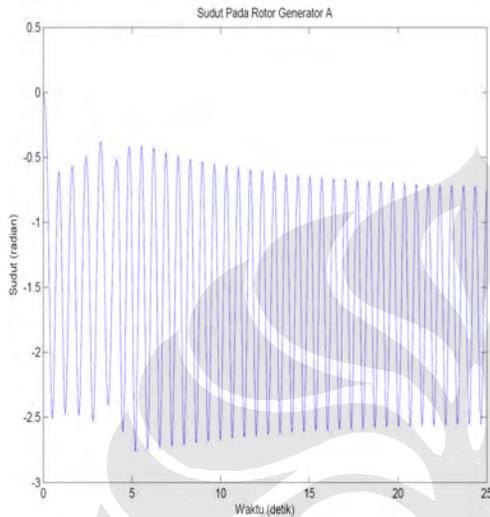
Gambar 4.8 Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator A ( $A=B$ )



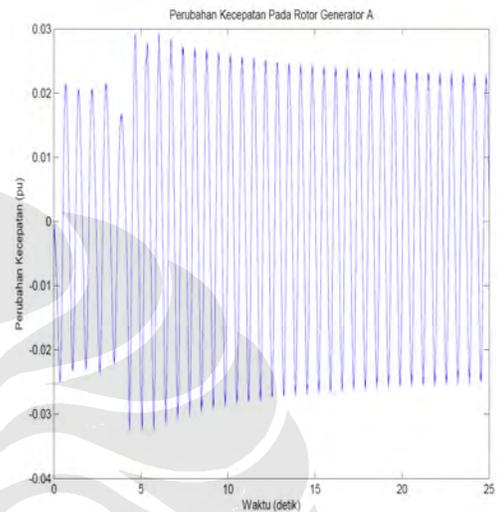
Gambar 4.9 Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator B ( $A=B$ )

### b. Generator Berbeda

Simulasi dua generator berbeda dengan keadaan tidak mengalami gangguan dan tidak diberikan *braking resistor* menyebabkan generator A yang memiliki kapasitas daya 200 MVA stabil seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.10 dan 4.11.

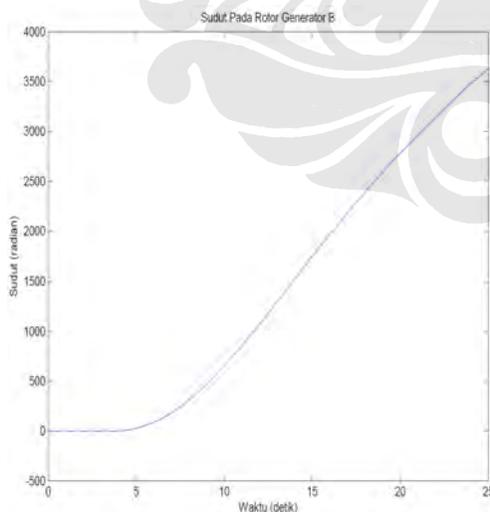


Gambar 4.10 Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator A ( $A \neq B$ )

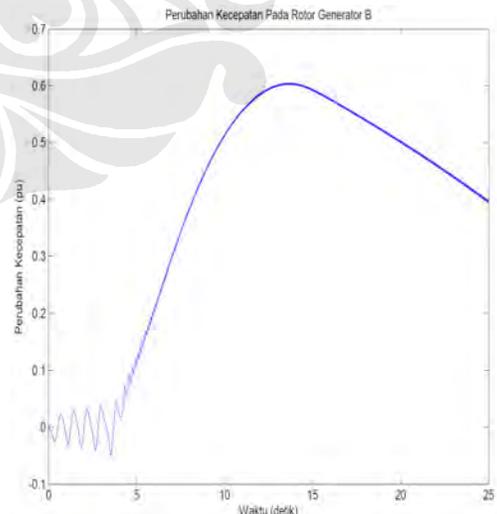


Gambar 4.11 Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator A ( $A \neq B$ )

Namun untuk generator B yang memiliki kapasitas daya 187 MVA, generator tidak stabil seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.12 dan 4.13.



Gambar 4.12 Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator B ( $A \neq B$ )



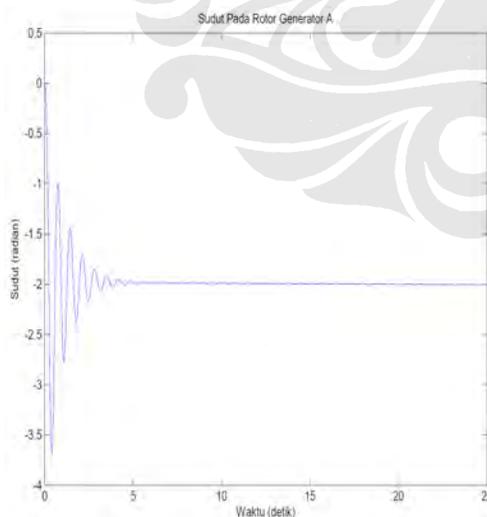
Gambar 4.13 Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator B ( $A \neq B$ )

Ketidakstabilan pada generator B terjadi karena kecepatan putar generator B lebih besar daripada kecepatan putar generator A. Besarnya kecepatan putar ini dapat dilihat dalam persamaan  $n = \frac{120 \cdot f}{P}$ . Dimana besarnya frekuensi ( $f$ ) kedua generator sama 60 Hz dengan jumlah kutub ( $P$ ) pada generator B 20 poles dan generator A 32 poles, maka didapatkan kecepatan putar ( $n$ ) generator B 360 r/min dan generator A 225 r/min. Akibatnya ketika terjadi gangguan pada keadaan tunak generator B menjadi tidak stabil, sedangkan generator A masih dapat mempertahankan kestabilannya. Hal ini dapat dibuktikan dengan nilai sudut rotor pada generator B yang semakin lama semakin besar.

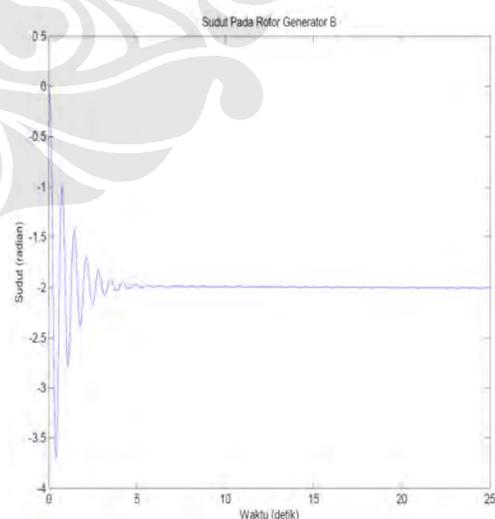
### 4.3.2 Simulasi dan Analisa 2 : Sistem Tenaga Listrik Tanpa Gangguan dengan *Braking Resistor*

#### a. Generator Identik

Simulasi dua generator identik dengan keadaan tidak mengalami gangguan dan diberikan *braking resistor* mengakibatkan sistem tenaga listrik dalam kondisi stabil. Terlihat pada saat simulasi sudah berjalan 5 detik pembangkit sudah menunjukkan kestabilan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai sudut putar rotor yang konstan seperti yang terlihat pada gambar 4.14 dan 4.15.

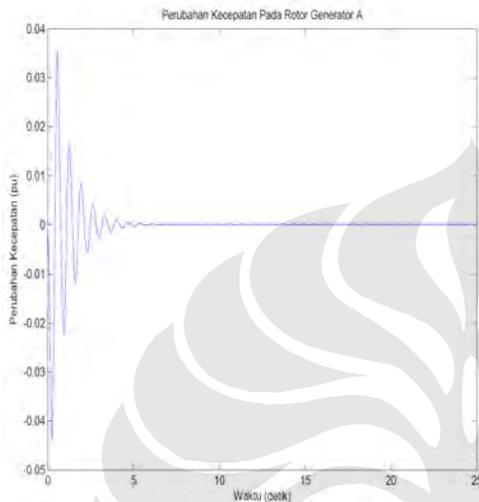


Gambar 4.14 Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada generator A (A=B)

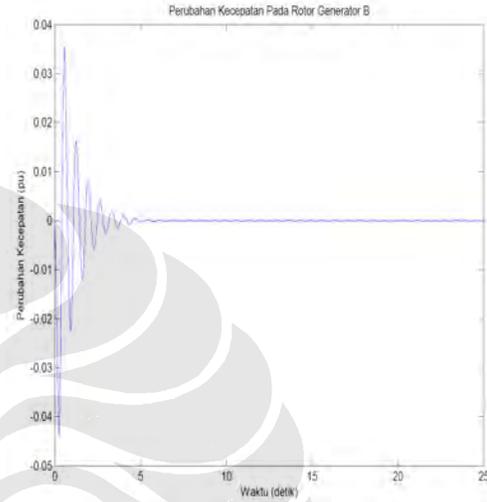


Gambar 4.15 Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada generator B (A=B)

Kestabilan ini juga ditunjukkan oleh perubahan kecepatan yang besarnya nol seperti yang terlihat pada gambar 4.16 dan 4.17. Sistem tenaga listrik ini stabil karena gangguan yang terjadi pada kondisi tunak dapat diredam dengan *braking resistor*, sehingga diperoleh suatu sistem yang stabil.

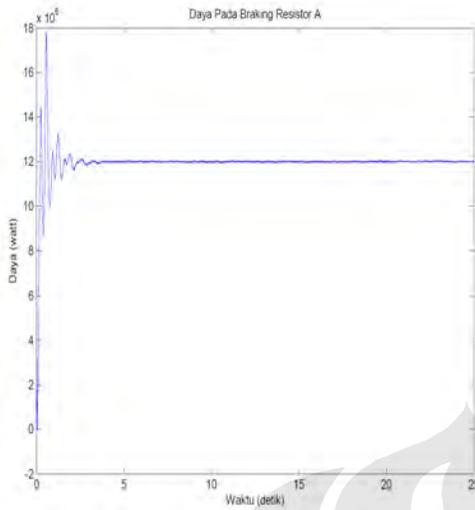


Gambar 4.16 Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada generator A ( $A=B$ )

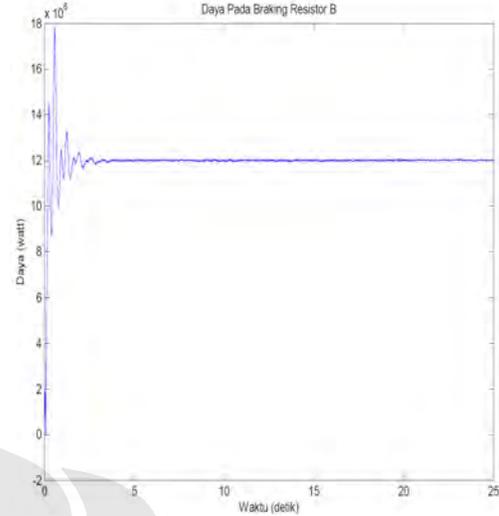


Gambar 4.17 Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada generator B ( $A=B$ )

Besarnya daya yang diserap *braking resistor* diperlihatkan oleh gambar 4.18 dan 4.19. Saat pembangkit baru dinyalakan terlihat daya *braking resistor* naik karena penggerak utama yang memberikan putaran pada rotor masih belum stabil.



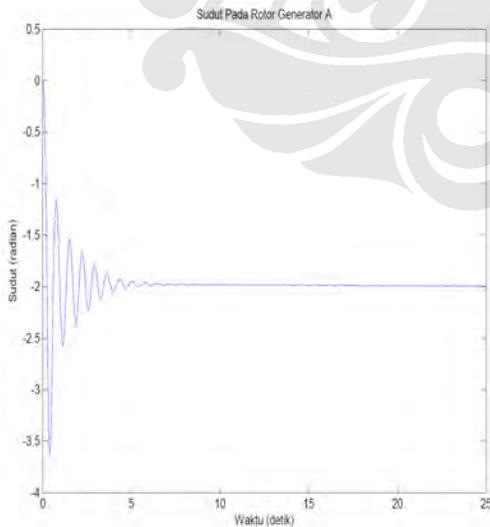
Gambar 4.18 Daya untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada *braking resistor* A ( $A=B$ )



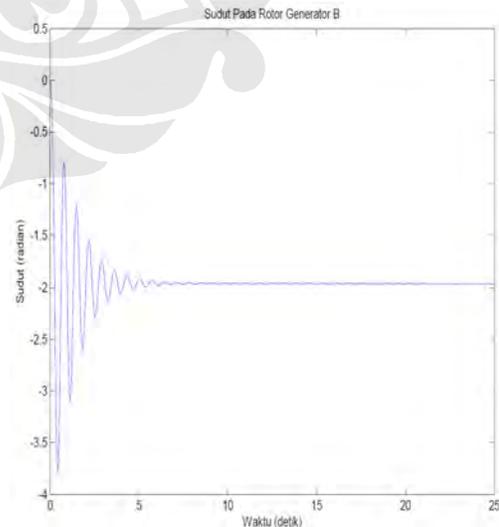
Gambar 4.19 Daya untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada *braking resistor* B ( $A=B$ )

### b. Generator Berbeda

Simulasi dua generator berbeda dengan keadaan tidak mengalami gangguan dan diberikan *braking resistor* mengakibatkan sistem tenaga listrik stabil. Terlihat pada saat simulasi sudah berjalan 5 detik pembangkit sudah menunjukkan kestabilan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai sudut putar rotor yang konstan seperti yang terlihat pada gambar 4.20 dan 4.21.

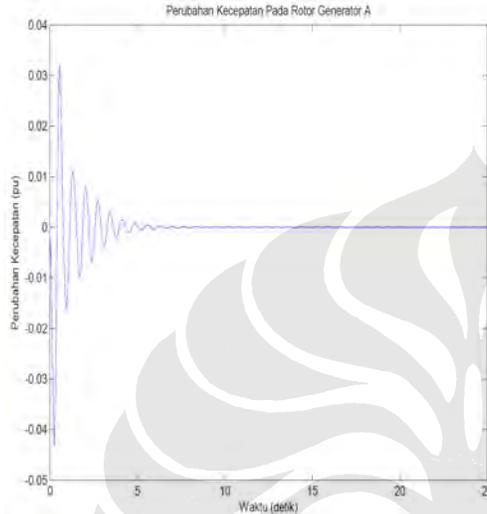


Gambar 4.20 Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada generator A ( $A \neq B$ )

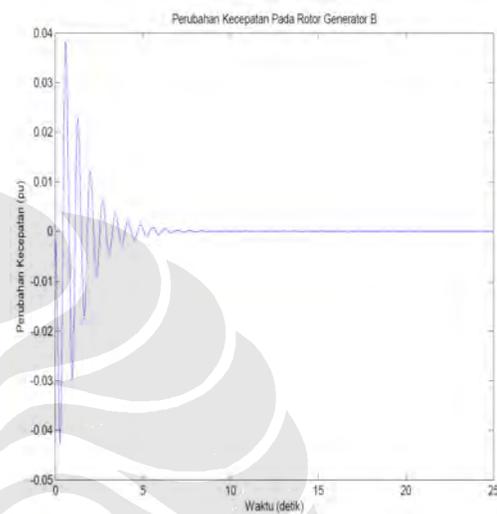


Gambar 4.21 Sudut rotor untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada generator B ( $A \neq B$ )

Kestabilan ini juga ditunjukkan oleh perubahan kecepatan yang besarnya nol seperti yang terlihat pada gambar 4.22 dan 4.23. Sistem tenaga listrik ini stabil karena gangguan yang terjadi pada kondisi tunak dapat diredam dengan *braking resistor*, sehingga diperoleh suatu sistem yang stabil.

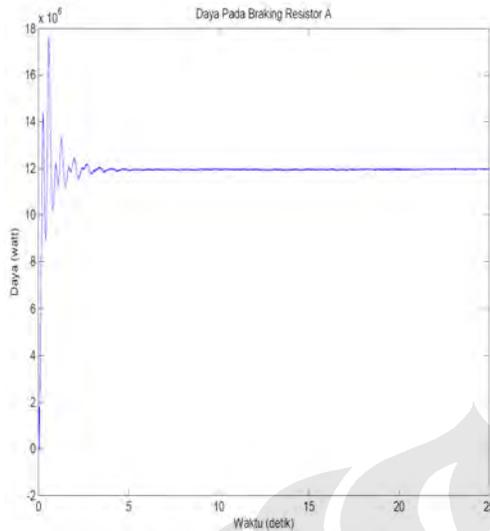


Gambar 4.22 Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada generator A ( $A \neq B$ )

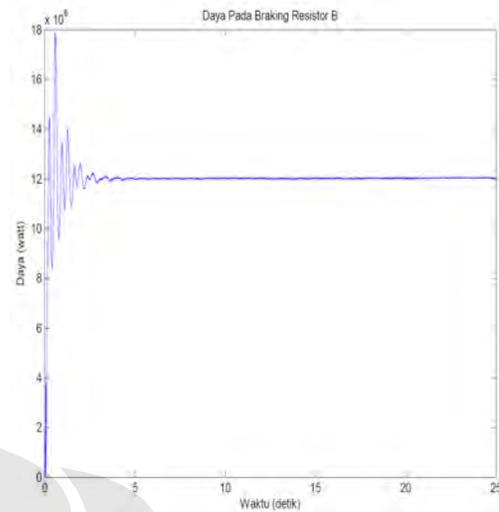


Gambar 4.23 Perubahan kecepatan untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada generator B ( $A \neq B$ )

Hasil simulasi ini tidak jauh berbeda dengan simulasi sejenis yang menggunakan dua generator identik, namun osilasi sudut rotor dan perubahan kecepatan untuk generator B yang memiliki kapasitas daya 187 MVA pada 5 detik pertama lebih besar daripada generator A yang memiliki kapasitas daya 200 MVA. Akibatnya besarnya daya yang diserap oleh *braking resistor* generator B lebih besar bila dibandingkan dengan besarnya daya yang diserap oleh *braking resistor* generator A pada 5 detik pertama. Besarnya perbedaan daya yang diserap oleh *braking resistor* generator B sekitar 1 MW sampai 2 MW lebih besar dari *braking resistor* generator A. Besarnya daya yang diserap oleh masing-masing *braking resistor* selama simulasi dijalankan ditunjukkan pada gambar 4.24 dan 4.25.



Gambar 4.24 Daya untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada *braking resistor* A ( $A \neq B$ )



Gambar 4.25 Daya untuk keadaan tanpa gangguan dengan *braking resistor* pada *braking resistor* B ( $A \neq B$ )

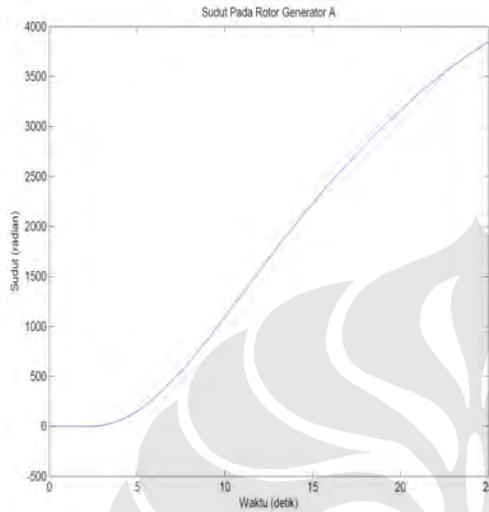
### 4.3.3 Simulasi dan Analisa 3 : Sistem Tenaga Listrik dengan Gangguan Tanpa *Braking Resistor*

#### a. Generator Identik

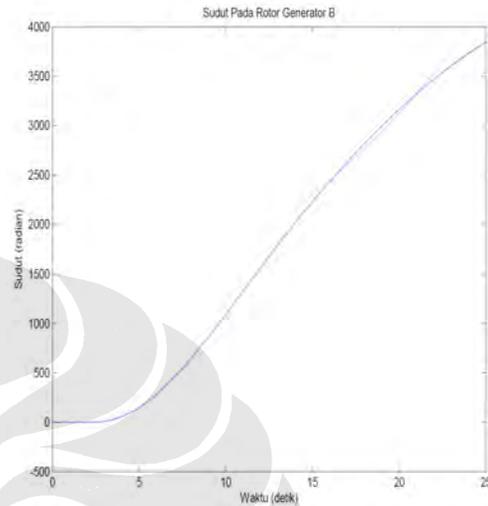
Dalam simulasi ini sebenarnya tidak akan diperoleh suatu sistem tenaga listrik yang stabil kecuali dengan bantuan *braking resistor*. Kondisi ini disebabkan karena sistem tenaga listrik yang disimulasikan tidak stabil dalam kondisi tunak, sebagai akibat interkoneksi. Adanya gangguan berupa beban hilang dari sistem semakin menambah faktor ketidakstabilan yang terjadi.

Simulasi dua generator identik dengan keadaan mengalami gangguan dan tidak diberikan *braking resistor* mengakibatkan sistem tenaga listrik tidak stabil. Pada saat gangguan pertama yaitu ketika beban 40 MW dan 100 MW lepas dari sistem di detik kedua, terlihat bahwa pembangkit tidak mengalami masa peralihan sebagai akibat hilangnya beban. Masa peralihan yang terjadi adalah akibat belum stabilnya penggerak utama yang memberikan putaran pada rotor sewaktu pembangkit baru dinyalakan. Namun setelah memasuki detik keempat ketika beban 100 MW masih terlepas dari sistem dan beban 60 MW, 80 MW, dan 120 MW juga ikut lepas dari sistem, pembangkit mengalami peralihan. Terlihat pada gambar sudut rotor dan perubahan kecepatan, saat gangguan detik keempat nilai sudut rotor dan perubahan kecepatan baik dari generator A maupun generator B

mengalami kenaikan yang sangat besar sebagai akibat hilangnya kestabilan. Besarnya ketidakstabilan ini lebih besar dari ketidakstabilan kondisi tunak. Kondisi ketidakstabilan sudut rotor terlihat pada gambar 4.26 dan 4.27.

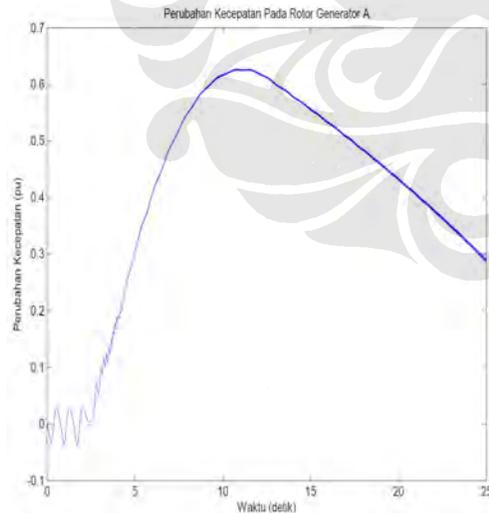


Gambar 4.26 Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator A (A=B)

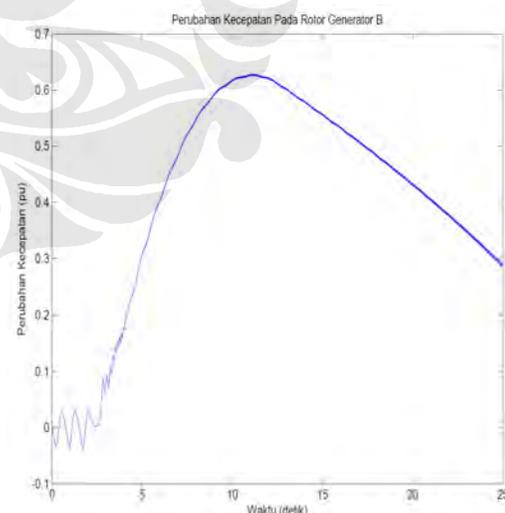


Gambar 4.27 Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator B (A=B)

Kondisi ketidakstabilan perubahan kecepatan ditunjukkan oleh gambar 4.28 dan 4.29.



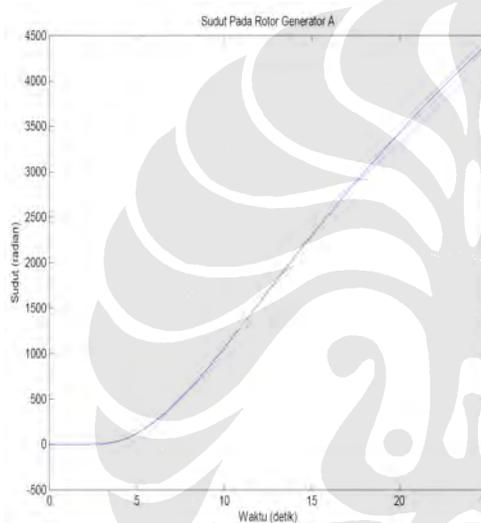
Gambar 4.28 Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan tanpa *braking resistor* pada generator A (A=B)



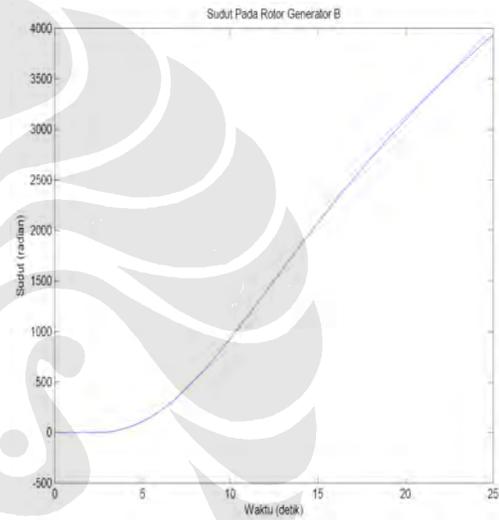
Gambar 4.29 Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan tanpa *braking resistor* pada generator B (A=B)

### b. Generator Berbeda

Simulasi dua generator berbeda dengan keadaan mengalami gangguan dan tidak diberikan *braking resistor* mengakibatkan sistem tenaga listrik tidak stabil. Sama seperti simulasi sejenis yang menggunakan dua generator identik, ketidakstabilan peralihan terjadi saat hampir semua beban terlepas dari sistem yaitu di detik keempat. Namun karena jenis generator yang berbeda, maka besarnya nilai sudut rotor dan perubahan kecepatan juga berbeda. Ketidakstabilan pada sudut rotor dapat dilihat pada gambar 4.30 dan 4.31.

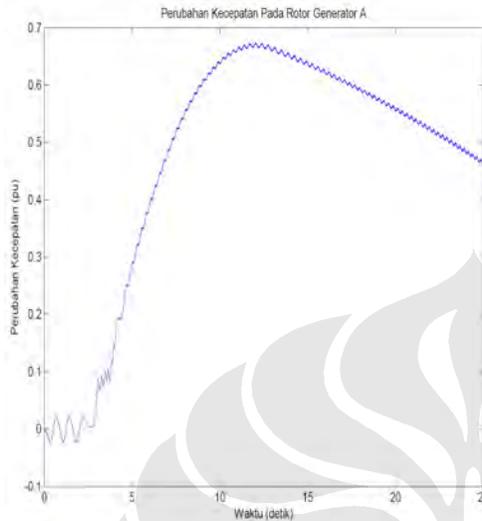


Gambar 4.30 Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator A ( $A \neq B$ )

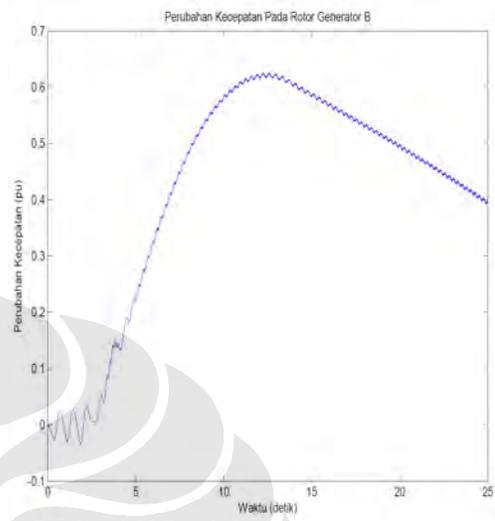


Gambar 4.31 Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan tanpa *braking resistor* pada generator B ( $A \neq B$ )

Ketidakstabilan yang terjadi pada perubahan kecepatan ditunjukkan pada gambar 4.32 dan 4.33.



Gambar 4.32 Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan tanpa *braking resistor* pada generator A ( $A \neq B$ )



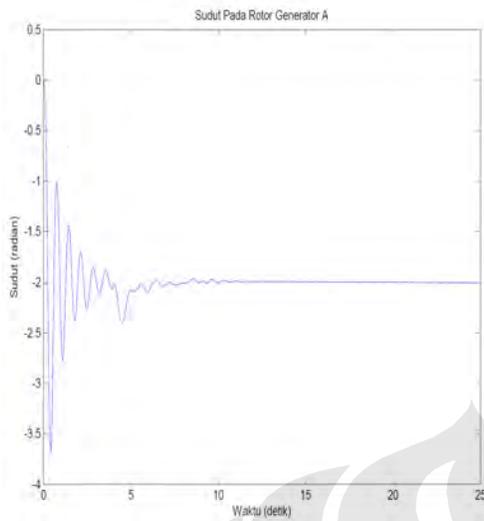
Gambar 4.33 Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan tanpa *braking resistor* pada generator B ( $A \neq B$ )

#### 4.3.4 Simulasi dan Analisa 4 : Sistem Tenaga Listrik dengan Gangguan dan dengan *Braking Resistor*

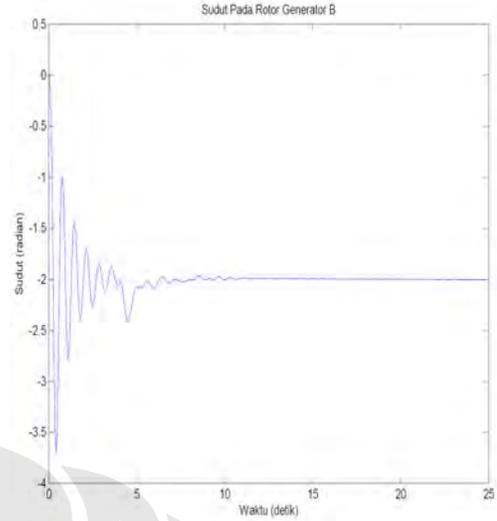
##### a. Generator Identik

Simulasi dua generator identik dengan keadaan mengalami gangguan dan diberikan *braking resistor* mengakibatkan sistem tenaga listrik stabil. Kestabilan dapat tercapai karena *braking resistor* menyerap daya berlebih generator saat terjadi gangguan. Akibatnya tidak terjadi osilasi sudut rotor dan perubahan kecepatan, seperti yang terjadi apabila generator tidak diberikan *braking resistor*.

Ketidakstabilan tunak yang terjadi akibat interkoneksi dan ketidakstabilan peralihan yang terjadi akibat beban lepas terutama pada detik keempat tidak dapat menyebabkan sistem kehilangan kestabilannya. Sudut rotor dan perubahan kecepatan hanya akan berosilasi sesaat terutama dari detik keempat sampai detik kelima. Sistem akhirnya dapat mencapai kestabilannya setelah 10 detik. Kestabilan pada sudut rotor dibuktikan dengan nilai sudut rotor yang konstan seperti yang terlihat pada gambar 4.34 dan 4.35.

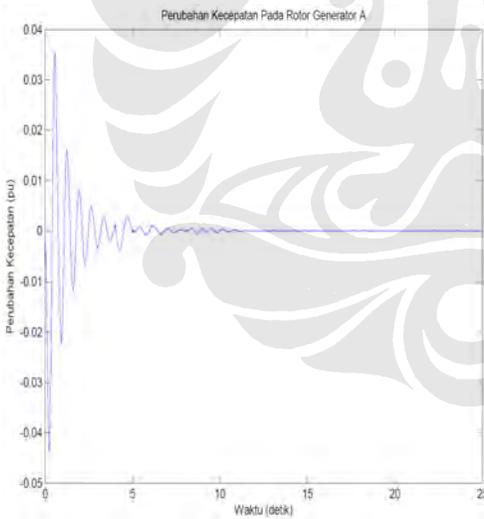


Gambar 4.34 Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada generator A ( $A=B$ )

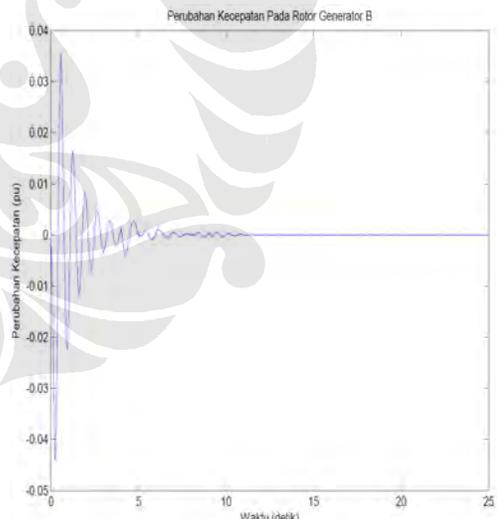


Gambar 4.35 Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada generator B ( $A=B$ )

Sedangkan kestabilan perubahan kecepatan dibuktikan dengan nilai perubahan kecepatan yang semakin lama semakin kecil dan akhirnya bernilai nol setelah sistem stabil seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.36 dan 4.37.



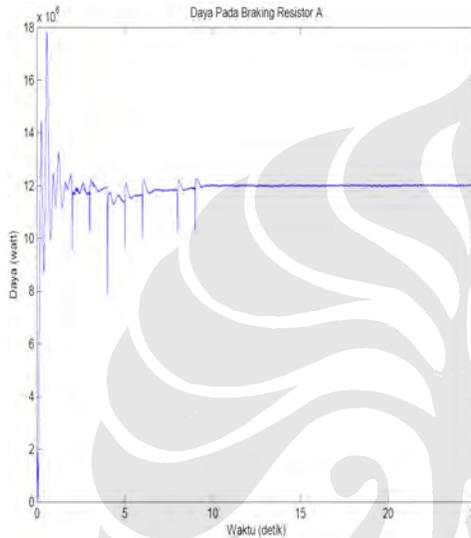
Gambar 4.36 Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada generator A ( $A=B$ )



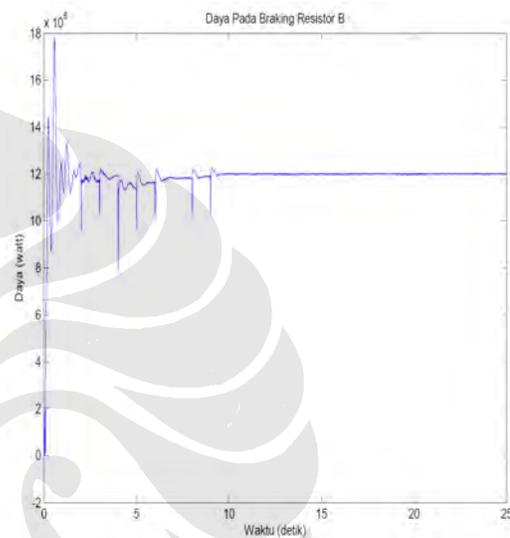
Gambar 4.37 Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada generator B ( $A=B$ )

Daya yang diserap oleh *braking resistor* berubah mengikuti perubahan beban seperti yang terlihat pada gambar 4.38 dan 4.39. Setiap ada beban yang keluar dan masuk ke dalam sistem, terjadi perubahan daya yang diserap oleh

*braking resistor*. Pada saat beban 140 MW lepas dari sistem yaitu pada detik kedua sampai dengan detik ketiga daya yang diserap oleh masing-masing *braking resistor* sebesar 11,77 MW, sedangkan pada saat beban 360 MW lepas dari sistem yaitu pada detik keempat sampai dengan detik kelima masing-masing *braking resistor* menyerap daya sebesar 11,43 MW. Hasil ini diperoleh dengan mengambil rata-rata daya yang terjadi pada saat beban lepas.



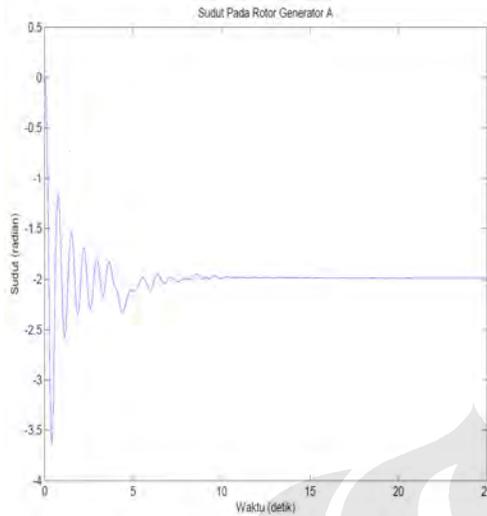
Gambar 4.38 Daya untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada *braking resistor* A (A=B)



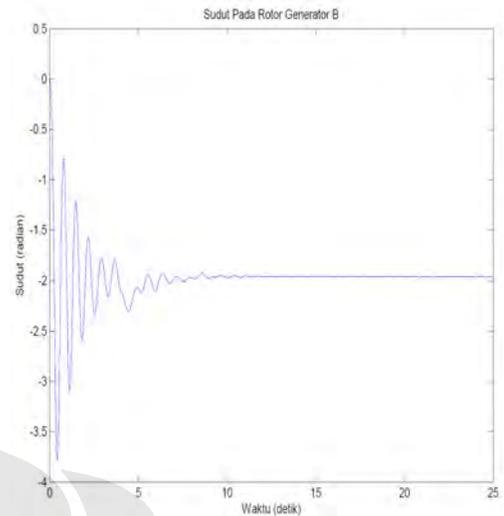
Gambar 4.39 Daya untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada *braking resistor* B (A=B)

### b. Generator Berbeda

Simulasi dua generator berbeda dengan keadaan mengalami gangguan dan diberikan *braking resistor* mengakibatkan sistem tenaga listrik stabil. Sama seperti simulasi sejenis dengan dua generator identik, kestabilan terjadi karena *braking resistor* menyerap daya berlebih generator saat terjadi gangguan, baik gangguan pada kondisi tunak maupun pada kondisi peralihan. Kestabilan ini dibuktikan dengan nilai sudut rotor konstan seperti yang ditunjukkan oleh gambar 4.40 dan 4.41.

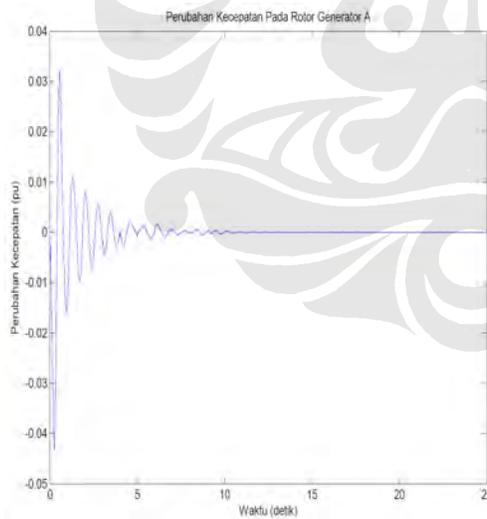


Gambar 4.40 Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada generator A ( $A \neq B$ )

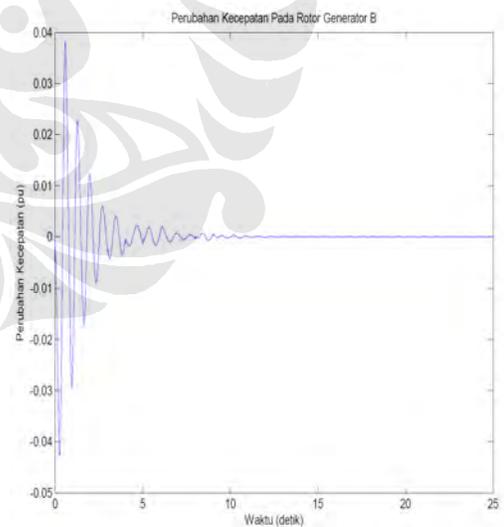


Gambar 4.41 Sudut rotor untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada generator B ( $A \neq B$ )

Kestabilan perubahan kecepatan dibuktikan dengan nilai perubahan kecepatan yang semakin lama semakin kecil dan akhirnya bernilai nol seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.42 dan 4.43.

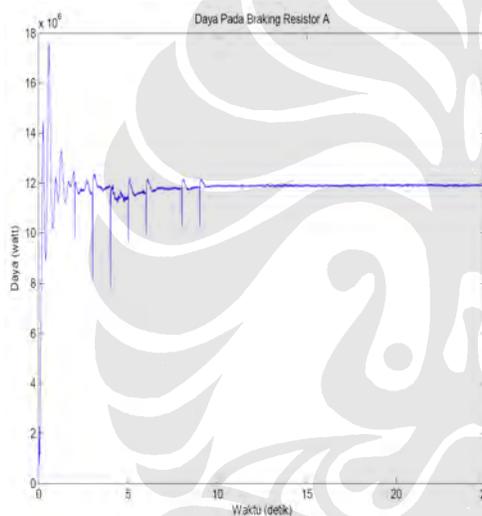


Gambar 4.42 Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada generator A ( $A \neq B$ )

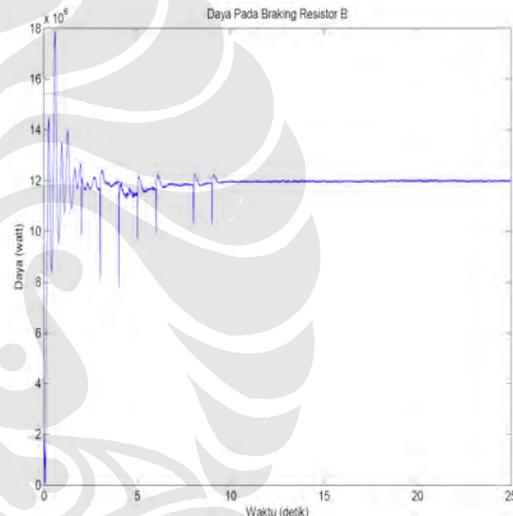


Gambar 4.43 Perubahan kecepatan untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada generator B ( $A \neq B$ )

Daya yang diserap oleh masing-masing *braking resistor* dapat dilihat pada gambar 4.44 dan 4.45. Pada saat beban 140 MW lepas dari sistem yaitu pada detik kedua sampai dengan detik ketiga daya yang diserap oleh *braking resistor* pada generator 200 MVA sebesar 11,78 MW, sedangkan pada generator 187 MVA daya yang diserap oleh *braking resistor* sebesar 11,83 MW. Pada saat beban 360 MW lepas dari sistem yaitu pada detik keempat sampai dengan detik kelima *braking resistor* pada generator 200 MVA menyerap daya sebesar 11,44 MW, sedangkan pada generator 187 MVA daya yang diserap oleh *braking resistor* sebesar 11,49 MW. Hasil ini diperoleh dengan mengambil rata-rata daya yang terjadi pada saat beban lepas.



Gambar 4.44 Daya untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada *braking resistor* A ( $A \neq B$ )

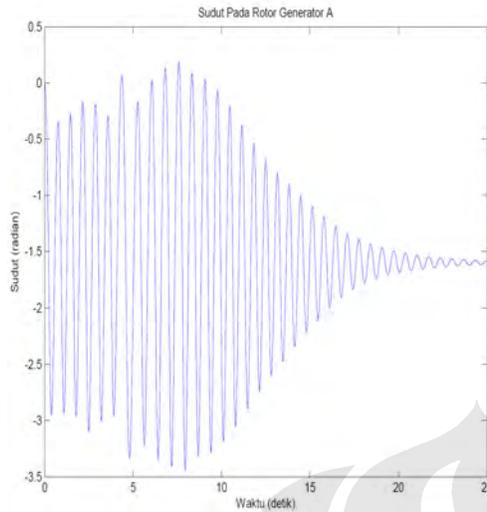


Gambar 4.45 Daya untuk keadaan dengan gangguan dan dengan *braking resistor* pada *braking resistor* B ( $A \neq B$ )

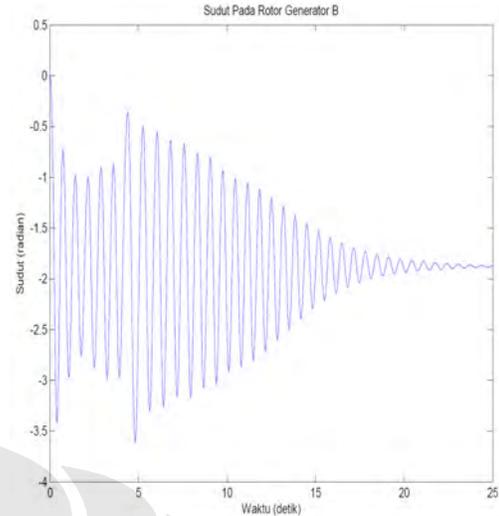
#### 4.3.5 Simulasi dan Analisa 5 : Sistem Tenaga Listrik dengan Gangguan dan Hanya Salah Satu Generator yang Diberikan *Braking Resistor*

##### a. Generator Identik

Simulasi dua generator identik dengan keadaan mengalami gangguan dan hanya salah satu generator yang diberikan *braking resistor* mengakibatkan sistem tenaga listrik stabil. Namun waktu yang diperlukan untuk mencapai kestabilan lebih lama jika dibandingkan dengan waktu kestabilan yang dapat dicapai apabila kedua generator menggunakan *braking resistor*. Kestabilan dari sudut rotor kedua generator dapat dilihat pada gambar 4.46 dan 4.47.

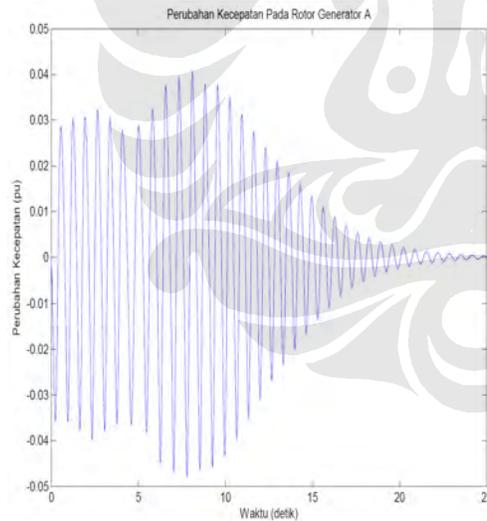


Gambar 4.46 Sudut rotor pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* ( $A=B$ )

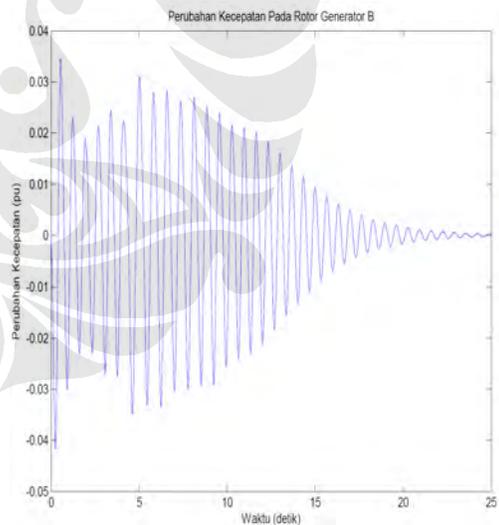


Gambar 4.47 Sudut rotor pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* ( $A=B$ )

Kestabilan pada perubahan kecepatan untuk kedua generator ditunjukkan pada gambar 4.48 dan 4.49.



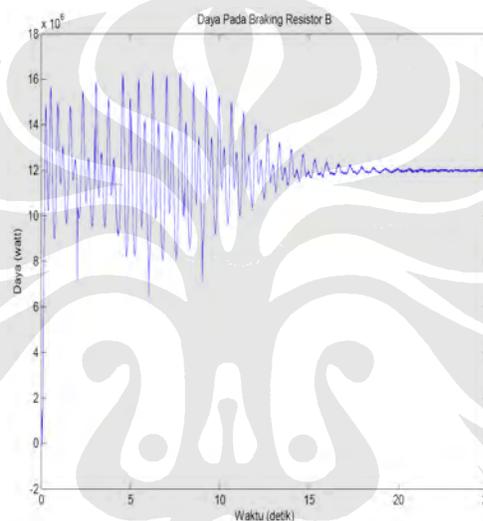
Gambar 4.48 Perubahan kecepatan pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* ( $A=B$ )



Gambar 4.49 Perubahan kecepatan pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* ( $A=B$ )

Kadaan kestabilan yang seperti ini terjadi sebagai akibat ketidakstabilan dalam kondisi tunak dan peralihan yang terjadi pada kedua generator ditanggung satu *braking resistor* saja. Pada gambar 4.47 dan 4.49 terlihat perbaikan stabilitas

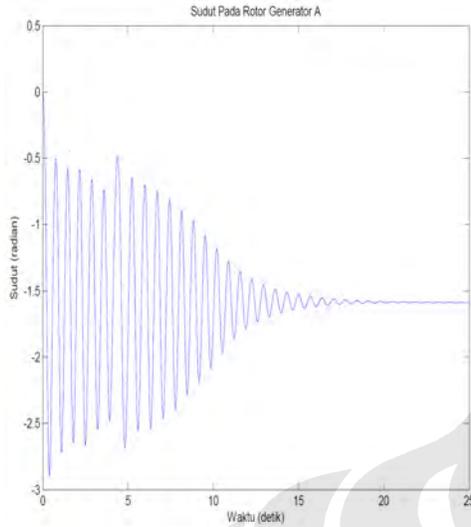
generator B yang menggunakan *braking resistor* lebih baik daripada perbaikan stabilitas generator A yang tidak menggunakan *braking resistor*. Selain itu akibat hanya generator B yang menggunakan *braking resistor*, generator A mengalami kenaikan pada sudut rotor dan perubahan kecepatan saat hampir semua beban lepas yaitu di detik keempat. Hal ini tentu saja mempengaruhi generator B yang tadinya osilasi sudut rotor dan perubahan kecepatan yang awalnya turun tiba-tiba naik kembali. Kejadian ini menyebabkan daya yang diserap oleh *braking resistor* naik kembali setelah sempat turun seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.50.



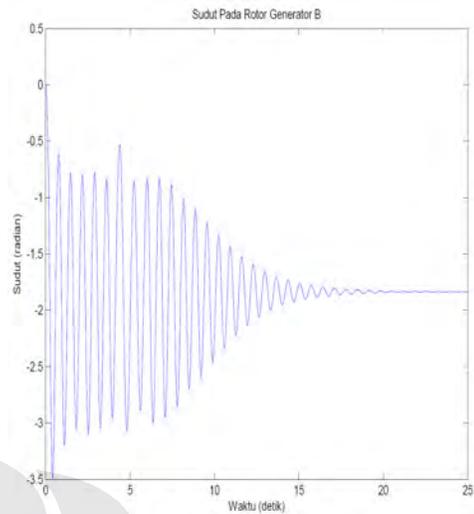
Gambar 4.50 Daya pada *braking resistor* B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* (A=B)

#### **b. generator berbeda (generator B menggunakan *braking resistor*)**

Simulasi dua generator berbeda dengan keadaan mengalami gangguan dan hanya generator B yang memiliki kapasitas daya 187 MVA diberikan *braking resistor* mengakibatkan sistem tenaga listrik stabil. Sama seperti simulasi sejenis yang menggunakan dua generator identik, kestabilan pada simulasi ini diperoleh dalam waktu yang lebih lama bila dibandingkan dengan waktu kestabilan yang dapat dicapai apabila kedua generator diberikan *braking resistor*. Kondisi kestabilan sudut putar pada kedua generator dapat dilihat pada gambar 4.51 dan 4.52.

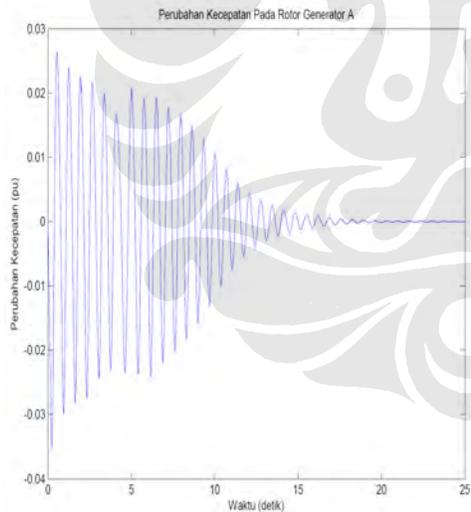


Gambar 4.51 Sudut rotor pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* ( $A \neq B$ )

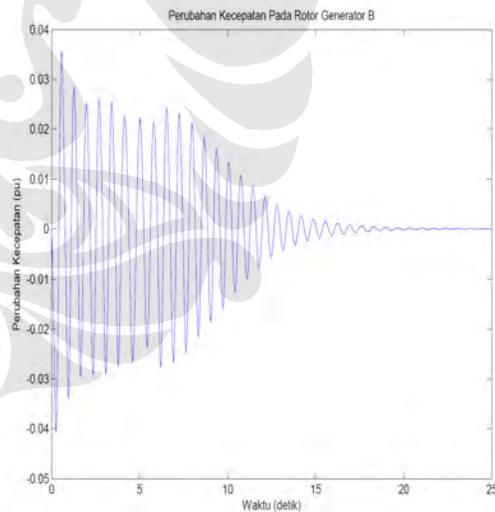


Gambar 4.52 Sudut rotor pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* ( $A \neq B$ )

Sedangkan kestabilan pada perubahan kecepatan untuk kedua generator dapat dilihat pada gambar 4.53 dan 4.54.



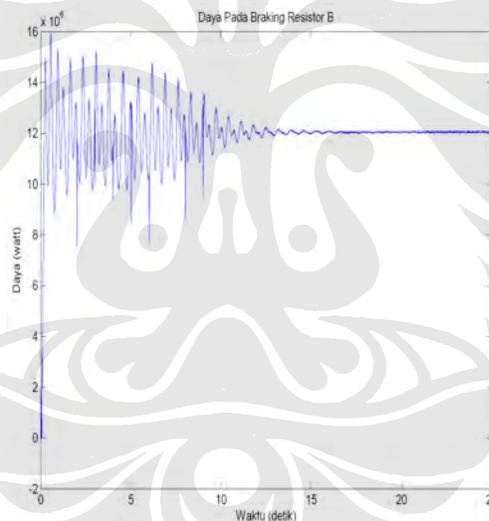
Gambar 4.53 Perubahan kecepatan pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* ( $A \neq B$ )



Gambar 4.54 Perubahan kecepatan pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* ( $A \neq B$ )

Penggunaan *braking resistor* tidak membuat perbaikan stabilitas generator B lebih baik daripada generator A yang memiliki kapasitas daya 200 MVA dan tidak menggunakan *braking resistor*. Dapat dilihat pada gambar bahwa osilasi sudut rotor dan perubahan kecepatan generator B lebih besar bila dibandingkan dengan generator A. Hal ini terjadi karena saat diinterkoneksi dengan generator A, pada kondisi tunak generator B tidak stabil. Sehingga *braking resistor* selain harus memperbaiki stabilitas peralihan akibat beban yang lepas juga harus memperbaiki stabilitas pada kondisi tunak.

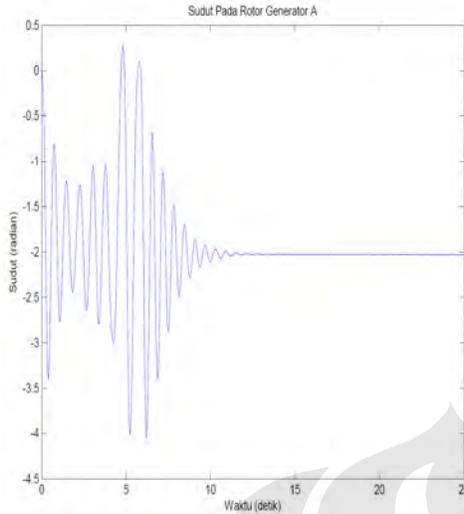
Daya yang diserap pada braking resistor dapat dilihat seperti pada gambar 4.55. Terlihat pada gambar tidak seperti simulasi sejenis dengan generator identik, daya yang diserap braking resistor tidak mengalami kenaikan saat terjadi gangguan.



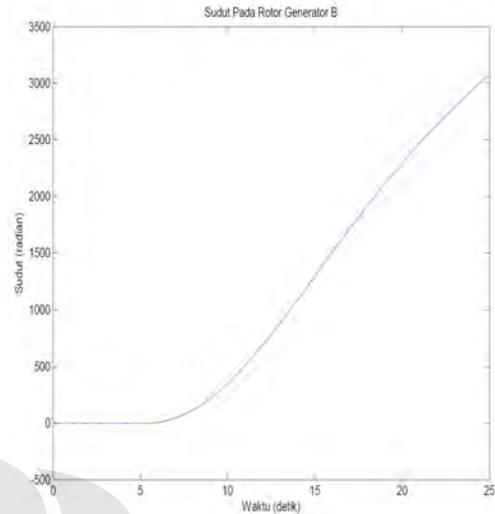
Gambar 4.55 Daya untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator B yang diberikan *braking resistor* pada braking resistor B ( $A \neq B$ )

### c. Generator Berbeda (generator A menggunakan *braking resistor*)

Simulasi dua generator berbeda dengan keadaan mengalami gangguan dan hanya generator A yang memiliki kapasitas daya 200 MVA diberikan *braking resistor* mengakibatkan generator A stabil dan generator B yang memiliki kapasitas daya 187 MVA tidak stabil. Sudut rotor dari kedua generator dapat dilihat pada gambar 4.56 dan 4.57.

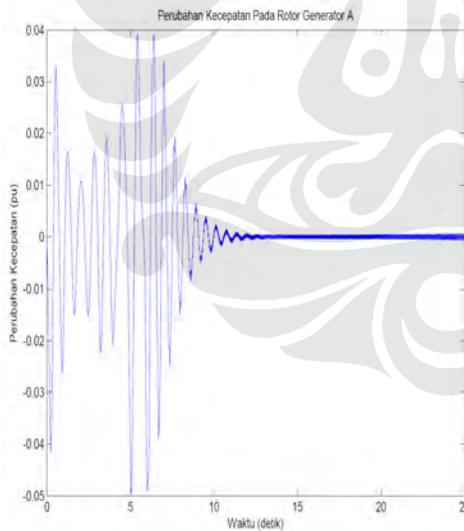


Gambar 4.56 Sudut rotor pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan *braking resistor* ( $A \neq B$ )

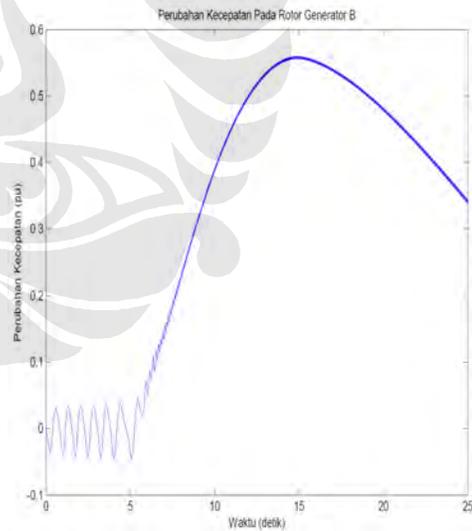


Gambar 4.57 Sudut rotor pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan *braking resistor* ( $A \neq B$ )

Keadaan perubahan kecepatan dari kedua generator dapat dilihat pada gambar 4.58 dan 4.59.



Gambar 4.58 Perubahan kecepatan pada generator A untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan *braking resistor* ( $A \neq B$ )

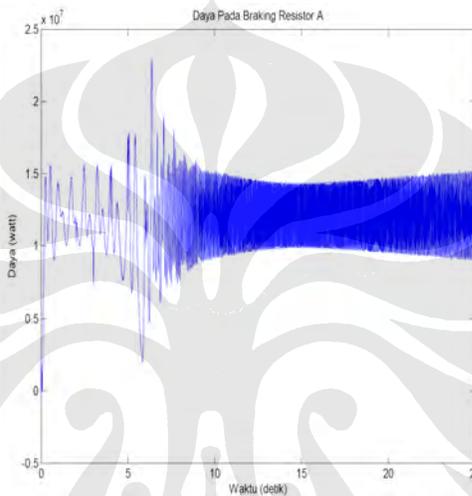


Gambar 4.59 Perubahan kecepatan pada generator B untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan *braking resistor* ( $A \neq B$ )

Keadaan yang stabil hanya untuk generator A dan tidak stabil untuk generator B terjadi karena generator B tidak stabil pada kondisi tunak saat diinterkoneksi

dengan generator A. Adanya ketidakstabilan peralihan yang diakibatkan beban lepas membuat generator B semakin tidak stabil. *Braking resistor* hanya dapat menstabilkan generator A saat gangguan terjadi, tetapi tidak dapat menstabilkan generator B.

Besarnya daya yang diserap oleh *braking resistor* dapat dilihat pada gambar 4.60. Terlihat daya yang diserap oleh *braking resistor* selalu berubah-ubah sebagai akibat dari generator B yang tidak stabil.



Gambar 4.60 Daya untuk keadaan dengan gangguan dan hanya generator A yang diberikan *braking resistor* pada *braking resistor* A ( $A \neq B$ )

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

1. Daya rata-rata yang diserap *braking resistor* pada generator identik ketika beban sebesar 140 MW lepas dari sistem adalah 11,77 MW dan ketika beban sebesar 360 MW lepas dari sistem adalah 11,43 MW.
2. Daya rata-rata yang diserap *braking resistor* pada generator berbeda ketika beban sebesar 140 MW lepas dari sistem adalah 11,78 MW untuk generator 200 MVA dan 11,83 MW untuk generator 187 MVA, sedangkan daya rata-rata ketika beban sebesar 360 MW lepas dari sistem adalah 11,44 MW untuk generator 200 MVA dan 11,49 MW untuk generator 187 MVA.
3. *Braking resistor* dapat membantu memperbaiki masa peralihan sistem tenaga listrik, setelah 8 detik dan putaran generator kembali stabil.
4. Untuk dua generator identik dengan kapasitas daya 200 MVA *braking resistor* dipasang pada salah satu generator.
5. Untuk dua generator berbeda dengan kapasitas daya 200 MVA dan 187 MVA *braking resistor* dipasang pada generator dengan kapasitas daya 187 MVA.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control* (California: McGraw-Hill / EPRI, 1994)
- [2] Rinaldy Dalimi, *Kuliah Analisa Sistem Tenaga Listrik*, Diktat (Depok: Jurusan Elektro FTUI, 2003)
- [3] Willam D. Stevenson Jr, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*, terj. Kamal Idris (Jakarta: Erlangga, 1996)
- [4] I. J. Nagrath, D. P. Kothari, *Modern Power System Analysis* (New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1983)
- [5] Timothy J. Ross, *Fuzzy Logic With Engineering Applications* (New York: McGraw-Hill, 1995)
- [6] Jun Yan, Michael Ryan, James Power, *Using Fuzzy Logic* (New York: Prentice Hall, 1994)
- [7] Yuning Chen, M.E. El-Hawary, *An EAC Based Braking Resistor Approach for Transient Stability Improvement* (New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2006)
- [8] Mohd. Hasan Ali, *et al.*, *A Fuzzy Logic Controlled Braking Resistor Scheme For Stabilization of Synchronous Generator* (New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001)
- [9] Matlab Help, Mathworks Inc.

## DAFTAR PUSTAKA

- J. Chapman, Stephen, *Electric Machinery and Power System Fundamentals* (Boston: McGraw-Hill Inc., 2002)
- B.M. Weedy, B.J. Cory, *Electric Power System* (Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2001)
- I.J. Nagrath, D.P. Kothari, *Modern Power System Analysis* (New Delhi: Tata McGraw-Hill Publ.Comp.Ltd., 1980)
- Kundur, Prabha, *Power System Stability and Control* (California: McGraw-Hill / EPRI, 1993)
- D. Stevenson Jr, William, *Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat, terj. Kemal Idris* (Jakarta: Erlangga, 1983)
- Ross, Timothy J., *Fuzzy Logic With Engineering Applications* (New York: McGraw-Hill Inc., 1995)
- Yuning Chen, M.E. El-Hawary, *An EAC Based Braking Resistor Approach for Transient Stability Improvement* (New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2006)
- Mohd. Hasan Ali, *et al.*, *A Fuzzy Logic Controlled Braking Resistor Scheme For Stabilization of Synchronous Generator* (New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., 2001)