

**ANALISIS KESTABILAN PERALIHAN GENERATOR  
TURBIN UAP TERHADAP HUBUNG SINGKAT DI  
PABRIK III PT. PETROKIMIA GRESIK**

**SKRIPSI**

**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**Disusun Oleh:**

**DHANIE ANUGRAH DEWANTA  
NIM. 0410630030**

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2009**

# ANALISIS KESTABILAN PERALIHAN GENERATOR TURBIN UAP TERHADAP HUBUNG SINGKAT DI PABRIK III PT. PETROKIMIA GRESIK

## SKRIPSI

### KONSENTRASI SISTEM TENAGA

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

**DHANIE ANUGRAH DEWANTA**  
NIM. 0410630030

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ir. Mahfudz Shidiq, MT.  
NIP 131 699 002

Ir. Teguh Utomo, MT.  
NIP. 131 960 444



repository.ub.ac.id

# ANALISIS KESTABILAN PERALIHAN GENERATOR TURBIN UAP TERHADAP HUBUNG SINGKAT DI PABRIK III PT. PETROKIMIA GRESIK

Disusun Oleh :

**DHANIE ANUGRAH DEWANTA**  
**NIM. 0410630030-63**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada  
tanggal 28 Januari 2009

Majelis Penguji :

**Ir. Chairuzzaini**  
**NIP. 130 682 589**

**Ir. Soemarwanto**  
**NIP. 130 873 485**

**Ir. Drs. Moch. Dhofir, MT**  
**NIP. 131 879 031**

Mengetahui :  
**Ketua Jurusan Teknik Elektro**

**Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom.**  
**NIP. 131 879 033**

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami ucapkan ke hadirat Allah swt yang telah melimpahkan anugrah, perlindungan, rahmat, kasih sayang- Nya, sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar sarjana Teknik Elektro pada bidang studi Sistem Tenaga, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya. Dengan rasa hormat, disampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada:

1. Bapak Ir. Heru Nurwarsito, M.Kom. sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Rudi Yuwono ST. MSc. sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Ir. Mahfudz Shidiq, MT. selaku dosen pembimbing I dan sebagai guru yang dengan segenap hati telah memberikan bimbingan, masukan, saran dan motivasi hingga skripsi ini selesai.
4. Bapak Ir. Teguh Utomo, MT. selaku dosen pembimbing II dan sebagai guru yang telah segenap hati memberikan perhatian, arahan, dorongan, saran dan masukan mulai ide dasar hingga terselesainya skripsi ini.
5. Bapak Ir. Solekhan, selaku Kepala Bagian Departemen Pemeliharaan Pabrik III PT.Petrokima Gresik dan juga selaku pembimbing lapangan di Pabrik III PT. Petrokimia Gresik yang memudahkan dalam pemberian data bagi skripsi.
6. Bapak Ir. Purnomo, selaku Kepala Bagian Departemen Pemeliharaan Pabrik II PT. Petrokima Gresik dan sebagai penyumbang ide di awal pembuatan skripsi.
7. Bapak Wahyudiono dan keluarga, yang telah memberikan dukungan besar dalam permikiran ide awal skripsi.
8. Kedua orang tua yang telah memberikan dorongan spiritual maupun material sehingga skripsi ini selesai dengan baik.
9. Rolina Puspita Sari sebagai motivator dan alasan untuk menyelesaikan skripsi dengan baik.

Sebagai manusia biasa kami menyadari sepenuhnya atas keterbatasan serta kekurangan yang ada pada tulisan ini, untuk itu diharapkan kritik dan saran agar tulisan ini menjadi lebih baik.



Akhirnya kami berharap semoga tulisan ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu dan pengetahuan.

Malang, Februari 2009

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	vi
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	x
<b>ABSTRAK</b> .....	xi

**I. Pendahuluan**

1.1. Latar belakang.....	1
1.2. Rumusan masalah.....	1
1.3. Batasan masalah.....	2
1.4. Tujuan.....	2
1.5. Manfaat.....	2
1.6. Sistematika pembahasan.....	2

**II. Tinjauan Pustaka**

2.1. Stabilitas sistem tenaga listrik.....	4
2.2. Generator sinkron.....	7
2.2.1. Karakteristik sudut daya mesin sinkron kutub silindris.....	8
2.2.1.1. Keadaan mantap.....	8
2.2.1.2. Keadaan Peralihan.....	10
2.2.2. Pengaruh perubahan penguatan pada generator sinkron.....	11
2.2.3. Sistem dengan unit n generator.....	12
2.3. Dinamika rotor dan persamaan ayunan.....	18
2.3.1. Penyelesaian persamaan diferensial dengan metode <i>Runge-Kutte</i> .....	20
2.3.2. Penyelesaian persamaan ayunan dengan metode <i>Runge-Kutte</i> .....	24
2.4. Metode kriteria sama luas.....	25
2.5. Hubung singkat.....	36
2.5.1. Gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah.....	36
2.5.2. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.....	38



2.5.3. Gangguan hubung singkat antar fasa.....	40
2.5.4. Gangguan hubung singkat antar fasa ke tanah.....	41
2.5.5. Hubung singkat generator sinkron tanpa beban.....	43
2.5.6. Hubung singkat generator sinkron dalam keadaan berbeban.....	44
2.5.6.1. Beban $Z_L$ .....	44
2.5.6.2. Beban motor sinkron.....	45

### III. Metodologi Penelitian

3.1. Studi literatur.....	47
3.2. Survei lapangan.....	47
3.3. Pengambilan data.....	47
3.4. Analisis dan pembahasan.....	48
3.5. Penutup.....	49

### IV. Sistem Kelistrikan Pabrik III PT. Petrokimia Gresik

4.1. Umum.....	50
4.2. Sistem pembangkitan.....	53
4.3. Sistem distribusi beban.....	56

### V. Analisis Kestabilan Generator Turbin Uap Terhadap Hubung Singkat di PT. Petrokimia Gresik

5.1. Pengolahan data.....	58
5.1.1. Pengolahan data generator.....	58
5.1.2. Pengolahan data saluran.....	59
5.1.3. Pengolahan data beban.....	60
5.2. Rangkaian ekivalen sistem.....	61
5.2.1. Reaktansi ekivalen sebelum gangguan.....	62
5.2.2. Reaktansi ekivalen selama gangguan.....	65
5.2.3. Reaktansi ekivalen setelah gangguan.....	68
5.3. Persamaan sudut daya.....	70
5.3.1. Generator TG-65.....	70
5.3.2. Generator TG-66.....	72
5.4. Perhitungan perubahan sudut rotor.....	73

5.4.1	Perhitungan perubahan sudut rotor generator TG-65	74
5.4.2	Perhitungan perubahan sudut rotor generator TG-66	81
5.5.	Perhitungan waktu pemutusan kritis	88
5.5.1	Waktu pemutusan kritis generator TG-65	89
5.5.2	Waktu pemutusan kritis generator TG-66	90
5.6	Kestabilan Sistem Kelistrikan Pabrik III PT.Petrokimia Gresik	92

**VI. Penutup**

6.1	Kesimpulan	96
6.2	Saran	96

**DAFTAR PUSTAKA**

97

**Lampiran**

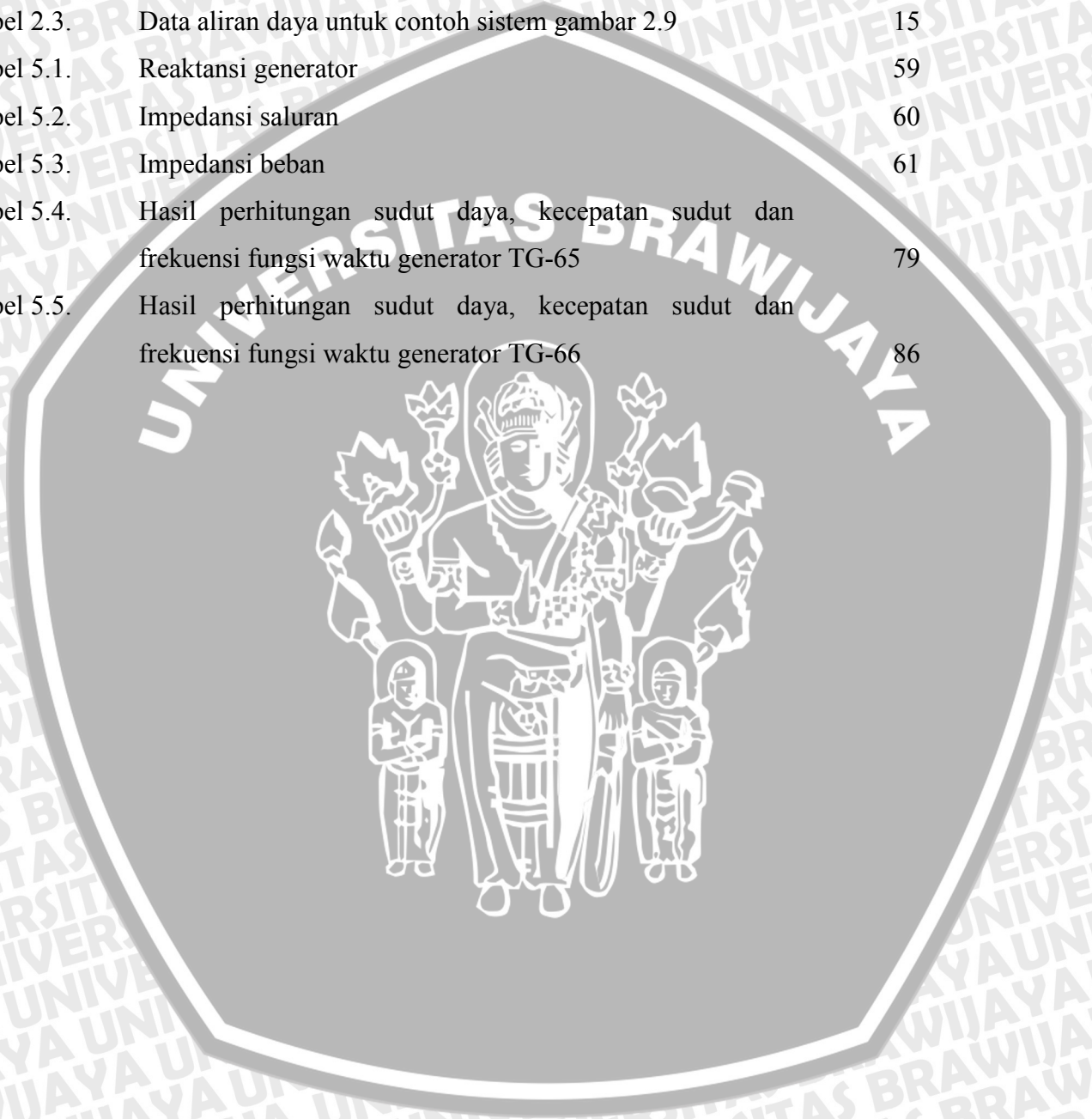
98





DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Data mesin sinkron untuk contoh sistem gambar 2.9	15
Tabel 2.2.	Data admitansi saluran untuk contoh sistem gambar 2.9	15
Tabel 2.3.	Data aliran daya untuk contoh sistem gambar 2.9	15
Tabel 5.1.	Reaktansi generator	59
Tabel 5.2.	Impedansi saluran	60
Tabel 5.3.	Impedansi beban	61
Tabel 5.4.	Hasil perhitungan sudut daya, kecepatan sudut dan frekuensi fungsi waktu generator TG-65	79
Tabel 5.5.	Hasil perhitungan sudut daya, kecepatan sudut dan frekuensi fungsi waktu generator TG-66	86



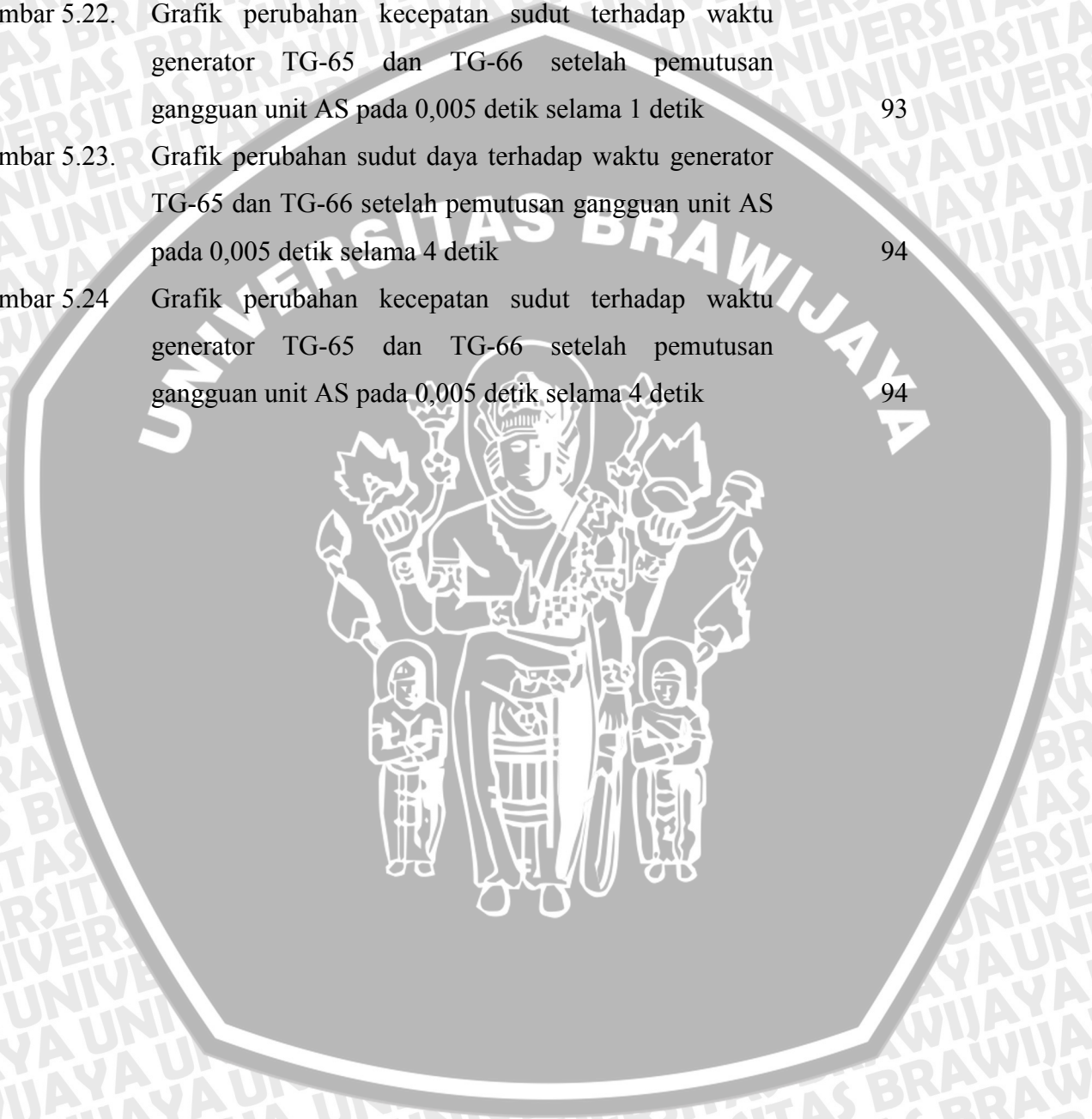
## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Sistem tenaga listrik sederhana yang terdiri dari dua mesin	4
Gambar 2.2.	Lengkung sudut-daya	6
Gambar 2.3.	Impedansi yang menghubungkan dua tegangan	8
Gambar 2.4.	Diagram fasor impedansi yang menghubungkan dua tegangan	9
Gambar 2.5.	Kurva sudut daya	10
Gambar 2.6.	Kurva sudut daya keadaan mantap dan peralihan	11
Gambar 2.7.	Skematis sistem tenaga listrik dengan n unit generator	12
Gambar 2.8.	Representasi sistem mesin sinkron majemuk	14
Gambar 2.9.	Sistem dua mesin	14
Gambar 2.10.	Kurva berayun untuk contoh soal	17
Gambar 2.11.	Kurva penyelesaian persamaan diferensial	21
Gambar 2.12.	Contoh diagram segaris suatu sistem sederhana	26
Gambar 2.13.	Kurva sudut daya generator yang menunjukkan luas $A_1$ dan $A_2$ adalah sama demikian pula luas $A_3$ dan $A_4$	27
Gambar 2.14.	Kurva sudut daya yang menunjukkan pemutusan kritis	29
Gambar 2.15.	Diagram segaris untuk contoh aplikasi metode kriteria sama luas	31
Gambar 2.16.	Rangkaian ekivalen untuk contoh aplikasi metode kriteria sama luas selama gangguan	32
Gambar 2.17.	Penyederhanaan gambar selama gangguan	33
Gambar 2.18.	Kriteria sama luas yang diterapkan pada contoh soal	35
Gambar 2.19.	Gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah	37
Gambar 2.20.	Rangkaian pengganti hubung singkat tiga fasa ke tanah	38
Gambar 2.21.	Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah	39
Gambar 2.22.	Rangkaian pengganti hubung singkat satu fasa ke tanah	39
Gambar 2.23.	Gangguan hubung singkat antar fasa	40
Gambar 2.24.	Rangkaian pengganti hubung singkat antar fasa	41
Gambar 2.25.	Gangguan hubung singkat antar fasa ke tanah	42



Gambar 2.26.	Rangkaian pengganti hubung singkat antar fasa ke tanah	43
Gambar 2.27.	Hubung singkat generator dalam keadaan berbeban	44
Gambar 2.28.	Hubung singkat generator sinkron dengan motor sinkron	46
Gambar 3.1.	<i>Flowchart</i> metodologi penelitian	49
Gambar 5.1.	Diagram satu garis sistem kelistrikan pabrik III PT.Petrokimia Gresik	58
Gambar 5.2.	Rangkaian ekivalen sistem kelistrikan pabrik III PT. Petrokimia Gresik	62
Gambar 5.3.	Rangkaian penyederhanaan gambar 5.2	63
Gambar 5.4.	Rangkaian penyederhanaan gambar 5.3	64
Gambar 5.5.	Rangkaian penyederhanaan gambar 5.4	65
Gambar 5.6.	Rangkaian ekivalen selama gangguan	65
Gambar 5.7.	Rangkaian penyederhanaan gambar 5.6	66
Gambar 5.8.	Rangkaian penyederhanaan gambar 5.7	67
Gambar 5.9.	Rangkaian penyederhanaan gambar 5.8	67
Gambar 5.10.	Rangkaian penyederhanaan gambar 5.9	68
Gambar 5.11.	Rangkaian ekivalen setelah gangguan	69
Gambar 5.12.	Rangkaian penyederhanaan gambar 5.11	69
Gambar 5.13.	Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-65 saat gangguan unit AS	80
Gambar 5.14.	Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-65 saat gangguan unit AS	80
Gambar 5.15.	Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-66 saat gangguan unit AS	87
Gambar 5.16.	Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-66 saat gangguan unit AS	87
Gambar 5.17.	Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 saat gangguan unit AS	88
Gambar 5.18.	Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 saat gangguan unit AS	89
Gambar 5.19.	Sudut daya TG-65 yang menunjukkan sudut pemutusan kritis	91

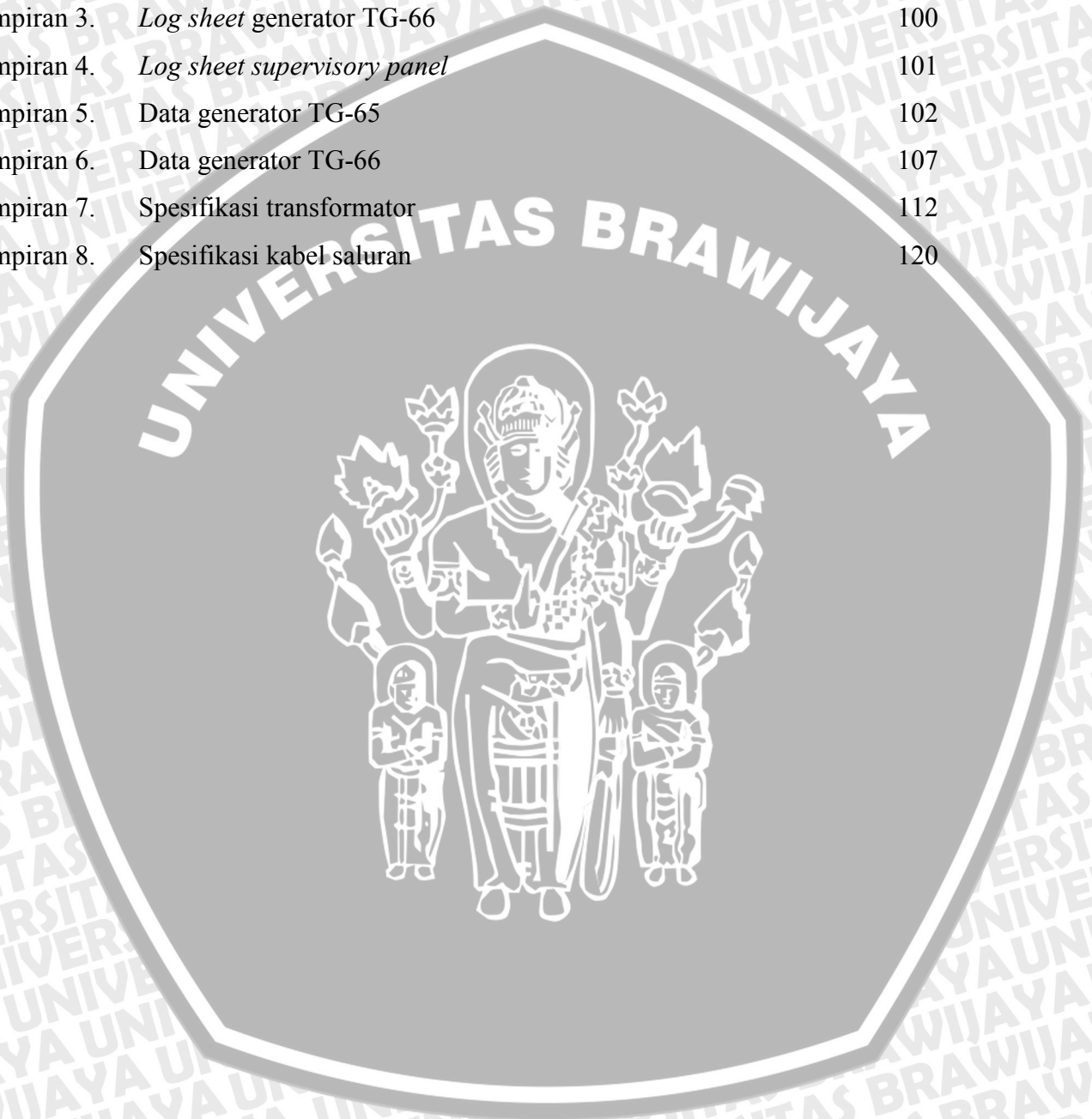
Gambar 5. 20.	Sudut daya TG-66 yang menunjukkan sudut pemutusan kritis	92
Gambar 5.21.	Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 setelah pemutusan gangguan unit AS pada 0,005 detik selama 1 detik	92
Gambar 5.22.	Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 setelah pemutusan gangguan unit AS pada 0,005 detik selama 1 detik	93
Gambar 5.23.	Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 setelah pemutusan gangguan unit AS pada 0,005 detik selama 4 detik	94
Gambar 5.24	Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 setelah pemutusan gangguan unit AS pada 0,005 detik selama 4 detik	94





## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	<i>Single-line</i> diagram pabrik III	98
Lampiran 2.	<i>Log sheet</i> generator TG-65	99
Lampiran 3.	<i>Log sheet</i> generator TG-66	100
Lampiran 4.	<i>Log sheet supervisory panel</i>	101
Lampiran 5.	Data generator TG-65	102
Lampiran 6.	Data generator TG-66	107
Lampiran 7.	Spesifikasi transformator	112
Lampiran 8.	Spesifikasi kabel saluran	120



## ABSTRAK

**Dhanie Anugrah Dewanta**, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Desember 2008, “**Analisis Kestabilan Generator Uap Terhadap Hubung Singkat di Pabrik III PT. Petrokimia Gresik**”. Dosen pembimbing: Ir. Mahfudz Shidiq, M.T. dan Ir. Teguh Utomo M.T.

*PT. Petrokimia Gresik merupakan produsen pupuk yang terdapat di Gresik, Jawa Timur memiliki tiga unit produksi salah satunya adalah unit produksi III atau Pabrik III. Pabrik III ini menggunakan dua generator sinkron 10.675 MVA (TG-65) dan 14.375 MVA (TG-66). Dalam menjaga kelangsungan produksinya diperlukan keandalan yang tinggi. Agar sistem tenaga listrik handal maka harus menjaga kestabilannya terhadap gangguan terbesar sekalipun. Untuk mengetahui kestabilan sistem tenaga listrik pada pabrik III PT. Petrokimia Gresik, gangguan tiga fasa seimbang akan dikenai pada posisi antara saluran dan beban unit AS (Amonnium Sulphate). Dalam analisis terdapat tiga keadaan yaitu perhitungan reaktansi ekuivalen sebelum gangguan, saat gangguan dan sesudah gangguan. Hasil perhitungan dan analisis diketahui ketika terjadi gangguan pada unit AS, perubahan sudut rotor dan kecepatan sudut masing-masing generator bertambah sangat cepat. Selanjutnya ditentukan sudut pemutusan kritis menggunakan metode kriteria sama luas dan didapatkan 1,0335 radian untuk generator TG-65 dan 0,9343 radian untuk generator TG-66. Dengan diketahuinya sudut pemutusan kritis maka didapatkan waktu pemutusan kritis generator TG-65 adalah 0,1059 detik dan generator TG-66 adalah 0,0056 detik. Jika gangguan dihilangkan sesaat sebelum waktu pemutusan terkecil yaitu pada 0,005 detik hingga 1 detik, sistem masih belum kembali ke keadaan seimbangnya dengan kata lain sistem kelistrikan pada pabrik III PT. Petrokimia Gresik bukan sistem yang stabil.*

**Kata kunci** : kestabilan, gangguan, sudut daya, kecepatan sudut, sudut pemutusan kritis, waktu pemutusan kritis



## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Salah satu masalah dalam sistem tenaga listrik adalah kestabilan. Kestabilan sistem tenaga dengan komponen-komponen dinamisnya adalah kemampuan sistem tersebut untuk kembali kepada operasi normal atau stabil setelah mengalami gangguan. Karena itu tanggapan sistem selama peralihan yang mengikuti suatu gangguan harus diredam dan diselesaikan dalam selang waktu tertentu agar tetap dapat dikatakan stabil. Penyebab dari ketidakstabilan tersebut adalah gangguan-gangguan, perubahan-perubahan beban dalam tingkat dan waktu tertentu. Jadi kestabilan sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh pembangkit, jenis gangguan maupun koordinasi beban.

Bila generator digerakkan oleh mesin uap (reciprocating steam engines), salah satu persoalan utama dalam pengoperasian mesin tersebut adalah masalah ayunan (hunting)(stevenson, 1996:349). Untuk itu kestabilan generator perlu dijaga dengan mengetahui ayunan yang terjadi apabila ada gangguan dan sedapat mungkin mengurangnya sehingga apabila terjadi gangguan, generator bisa kembali ke keadaan serempaknya.

Gangguan tiga fasa adalah jenis gangguan simetri yang memiliki pengaruh paling berbahaya karena arus gangguan yang mengalir besar dan terjadi pada semua fasa. Dengan mempelajari selang peralihan tersebut dapat diketahui tingkah laku generator serempak karena adanya suatu gangguan. Dalam Penulisan ini akan dipelajari bagaimana generator serempak di pabrik III PT. Petrokimia Gresik harus mempertahankan kestabilannya dalam menyalurkan daya beban bilamana sistem mengalami gangguan berupa hubung singkat tiga fasa seimbang.

Pabrik III PT. Petrokimia Gresik menggunakan dua buah generator sinkron yang bekerja paralel untuk memasok kebutuhan tenaga listrik. Oleh karena itu kelancaran proses sangat tergantung kestabilan generator baik pada saat operasi normal maupun pada saat gangguan.

### 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas pada penulisan skripsi ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana kenaikan sudut daya dan kecepatan sudut generator TG-65 dan TG-66 saat terjadi gangguan pada bus unit AS.

2. Berapa besarnya sudut dan waktu pemutusan kritis yang harus diterapkan pada pengaman agar tercapai tujuan pengaman secara maksimal.
3. Bagaimana kestabilan sistem ketika diambil waktu pemutusan sebelum waktu pemutusan kritis yaitu 0,05 detik.

### 1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan skripsi ini lebih terarah dan sesuai tujuan, maka perlu diberikan batasan masalah sebagai berikut :

1. Gangguan yang terjadi adalah gangguan hubung singkat tiga fasa seimbang
2. Tinjauan kestabilan disebabkan oleh adanya gangguan tiga fasa seimbang pada bus HVS-51 (Unit AS)
3. Tidak membahas secara detail tentang rele.

### 1.4 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dari penulisan skripsi ini adalah :

1. Untuk mengetahui besarnya ayunan yang terjadi pada generator akibat adanya gangguan hubung singkat tiga fasa seimbang.
2. Untuk mengetahui dan menganalisis besar sudut dan waktu pemutusan kritis yang bisa digunakan sebagai acuan pada *setting* rele-rele pengaman.

### 1.5 Manfaat

Manfaat dari penyusunan skripsi ini adalah mengetahui sejauh mana generator turbin uap berayun (*hunting*) terhadap gangguan yang terjadi di bus HVS-51 dan sudut dan waktu pemutusan kritis yang digunakan untuk acuan *setting* rele-rele pengaman.

### 1.6 Sistematika Pembahasan

Untuk mendapatkan gambaran tentang langkah-langkah yang akan dilakukan, maka penulisan skripsi ini dibagi dalam lima bab dengan garis besar penulisan sebagai berikut:

- BAB I : merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan, metodologi dan sistematika pembahasan.
- BAB II : berisi tinjauan pustaka atau dasar teori yang digunakan untuk dasar penelitian yang dilakukan dan untuk mendukung permasalahan yang diungkapkan.
- BAB III : menjelaskan mengenai metodologi yang digunakan dalam penelitian ini.



BAB IV : menjelaskan mengenai tentang sistem kelistrikan yang terdiri dari profil perusahaan, pembangkit listrik dan mayoritas beban yang terpasang.

BAB V : berisi pembahasan, analisa terhadap masalah yang diajukan dalam skripsi dan pengujian hasil analisa.

BAB VI : berisi kesimpulan dari tujuan skripsi yang akan dibuat serta saran dari penulis.



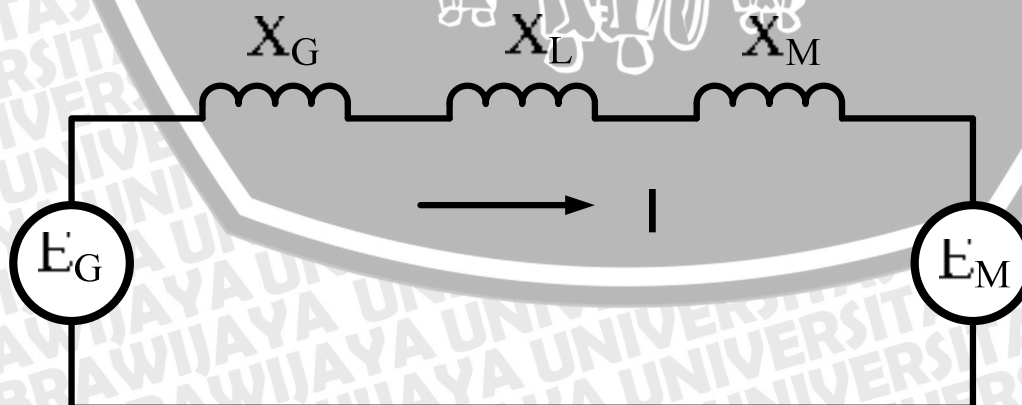
## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik

Secara umum stabilitas sistem tenaga listrik dapat didefinisikan sebagai sifat sistem yang memungkinkan mesin bergerak serempak dalam sistem untuk memberikan reaksinya terhadap gangguan dalam keadaan kerja normal serta balik kembali ke keadaan semula bila keadaan menjadi normal (Stevenson, 1994:348). Komponen-komponen dari sistem tenaga listrik memberikan keseimbangan dan saling mempengaruhi antara satu dengan yang lain pada keadaan operasi normal. Ketika terjadi perubahan mendadak dalam sistem maka akan terjadi ayunan atau osilasi yang berdampak pada kinerja mesin-mesin. Dari perubahan mendadak ini akan ada dua hal kemungkinan yang terjadi, yaitu sistem akan tetap kembali stabil atau sistem akan mengalami osilasi yang terus menerus sampai membuat kegagalan total (black out). Dengan kata lain perbedaan kondisi komponen-komponen sistem tenaga listrik ini tidak bisa mengembalikan pada posisi serempak. Kemampuan komponen-komponen pada sistem tenaga listrik dalam memberikan keseimbangan disebut kestabilan.

Pandangan suatu sistem tenaga yang sederhana dapat dilihat pada gambar di bawah 2.1. Memandang bahwa hal yang berpengaruh adalah komponen reaktansi yang terdiri dari reaktansi generator ( $X_G$ ), reaktansi saluran ( $X_L$ ) dan reaktansi motor sinkron ( $X_M$ ). Satu generator sinkron menyuplai daya kepada satu motor sinkron melalui saluran dengan arus sebesar  $I$ . Besaran dalam per unit.



Gambar 2.1 sistem tenaga listrik sederhana yang terdiri dari dua mesin

Sumber : Choiri, 2000:77



Pada gambar diatas dapat dinyatakan persamaan arus adalah :

$$I = \frac{E_G - E_M}{jX} \text{ pu} \quad (2.1)$$

dimana

$$X = X_G + X_M + X_L \text{ pu} \quad (2.2)$$

Dengan mengambil generator sebagai acuan, maka dapat kita misalkan :

$$E_M = |E_M| \angle 0^\circ \text{ pu} \quad (2.3)$$

$$E_G = |E_G| \angle \delta^\circ \text{ pu} \quad (2.4)$$

Daya keluaran generator sama dengan daya masuk motor karena tahanan-tahanannya diabaikan.

$$P = \text{Re}(E_G \cdot I^*) \quad (2.5)$$

$$= \text{Re} \left[ |E_G| \angle \delta \left\{ \frac{|E_G| \angle -\delta - |E_M|}{X \angle -90^\circ} \right\} \right] \quad (2.6)$$

$$= \frac{|E_G| |E_M|}{X} \cos(90^\circ - \delta) \quad (2.7)$$

$$= \frac{|E_G| |E_M|}{X} \sin \delta \text{ pu} \quad (2.8)$$

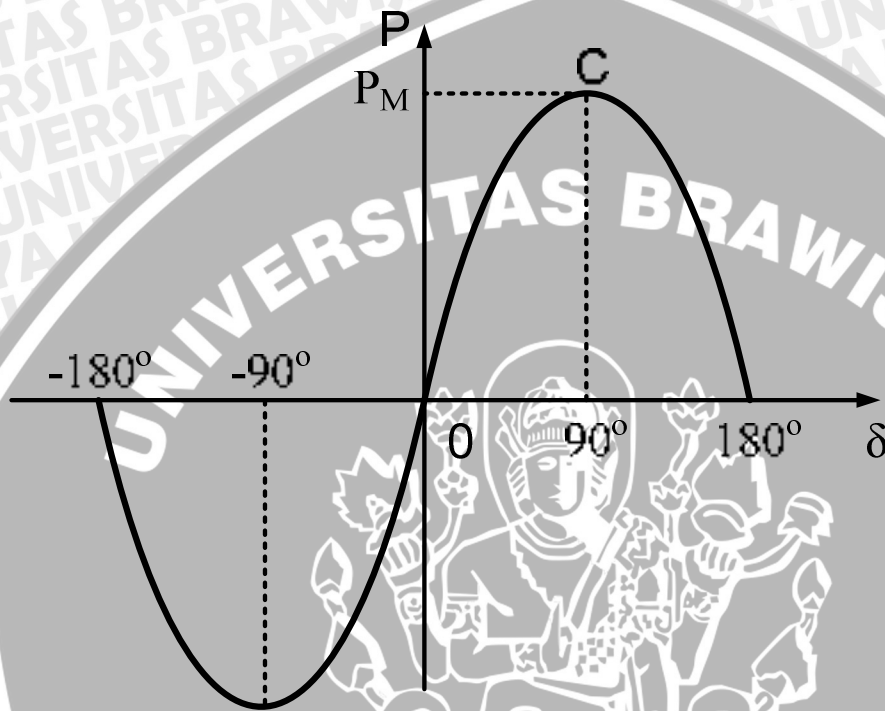
Dalam keadaan mantap (steady state), daya maksimum yang dapat disalurkan diperoleh bila  $\delta = 90^\circ$ .

$$P_m = \frac{|E_G| |E_M|}{X} \text{ pu} \quad (2.9)$$

Nilai  $P_m$  dapat diperbesar bila salah satu  $|E_G|$  atau  $|E_M|$  diperbesar atau juga bisa dilakukan dengan memperkecil reaktansi saluran  $X_L$ .

Lengkung daya  $P$  sebagai fungsi sudut-daya  $\delta$  diberikan pada gambar 2.2. Misalkan daya masuk generator dinaikkan sedikit demi sedikit sampai titik maksimum di C. Bila setelah itu beban generator dinaikkan lagi maka sudut daya  $\delta$  akan semakin besar, bila sebaliknya daya masukan semakin kecil dan akhirnya menuju ke nol. Ini disebut generator keluar dari keadaan sinkron.  $P_m$  disebut limit stabilitas mantap (steady state limit). Bila penambahan beban dilakukan secara tiba-tiba dan cukup besar maka generator itu kemungkinan keluar dari keadaan sinkron walaupun besar beban belum mencapai limit stabilitas mantap  $P_m$ . Secara rinci hal tersebut menggambarkan daya keluar listrik generator akan jauh melampaui daya masuk mekanis. Kekurangan ini akan disuplai dengan berkurangnya energi kinetis generator. Jadi generator akan berputar lebih lambat sehingga

sudut daya  $\delta$  bertambah besar dan daya masuk generator juga bertambah. Bila penambahan beban tiba-tiba itu melampaui harga tertentu generator akan keluar dari keadaan sinkron. Tetapi bila penambahan tiba-tiba itu masih dibawah harga tertentu tadi generator masih bisa bekerja normal pada keadaan beban baru. Harga tertentu tadi disebut limit batas transien (transient stability limit)(Choiri, 2000:79).



Gambar 2.2 Lengkung sudut-daya  
Sumber : Choiri, 2000: 78

Studi tentang kestabilan membahas sejauh mana sistem akan tetap stabil terhadap gangguan, misalnya gangguan sistem transmisi, perubahan beban yang mendadak akibat terputusnya unit pembangkit atau *switching* saluran. Dari penjelasan di atas kestabilan digolongkan dalam dua jenis tergantung pada sifat dan besarnya gangguan yang terdiri dari kestabilan keadaan mantap (steady state), dinamis, dan kestabilan peralihan (transient).

Studi stabilitas mantap adalah studi yang menentukan limit atas dari pembebanan mesin sebelum kehilangan keadaan sinkron bila penambahan beban dilakukan secara perlahan.

Stabilitas dinamis adalah lebih mungkin dari stabilitas mantap. Karena pada keadaan sebenarnya gangguan-gangguan pada sistem tenaga listrik terus-menerus terjadi. Hal ini disebabkan beban yang senantiasa berubah dan tidak sampai membuat mesin kehilangan



sinkron. Jadi dalam keadaan ini sistem disebut secara dinamis stabil. Tetapi bila gangguan yang terjadi cukup besar dan bertahan lama (redaman sangat kecil atau bahkan tidak ada) maka karakteristik ketidakstabilan yang demikian menimbulkan ancaman yang berbahaya bagi sistem dan menimbulkan operasi yang sangat sulit. Studi stabilitas dinamis ini biasanya dilakukan dalam waktu 5 sampai 10 detik dan kadang sampai 30 detik. Karena waktu studi yang cukup lama, pengaruh pengaturan tegangan otomatis dan pengaturan governor biasanya diikutsertakan jadi sangat sulit.

Dalam studi stabilitas transien, waktu yang dipandang hanya kira-kira 1 detik, dengan demikian cukup singkat sehingga pengaruh-pengaruh dari governor dan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) biasanya diabaikan karena dalam waktu yang singkat tersebut masih dianggap tidak bekerja. Keadaan inilah yang paling baik untuk keperluan operasi maupun perencanaan.

## 2.2 Generator Sinkron

Sebuah mesin sinkron dapat berfungsi sebagai generator maupun sebagai motor. Sebagai generator, mesin sinkron dapat dioperasikan sebagai mesin tunggal dan dapat pula dioperasikan secara paralel.

Dalam keadaan beroperasi sebagai generator yang bekerja paralel, agar dapat beroperasi dengan baik generator-generator harus tetap dalam keadaan sinkron dengan sistem dan menanggung sebagian tertentu dari beban secara keseluruhan.

Konstruksi mesin-mesin sinkron dapat dibedakan menjadi dua bagian :

- Mesin sinkron kutub luar, yaitu apabila belitan jangkar berputar (pada rotor) dan kutub medan utama tidak bergerak (pada stator), atau dapat dikatakan suatu mesin yang kutub medannya berada di luar (stator).
- Mesin sinkron kutub dalam, yaitu apabila kutub magnetnya yang berputar sedangkan belitan jangkar tidak bergerak (belitan jangkar pada stator), atau dapat dikatakan suatu mesin yang kutub magnetnya berada di dalam (rotor).

Perbedaan prinsip konstruksi mesin kutub dalam dengan konstruksi mesin kutub luar adalah bahwa pada mesin sinkron kutub dalam, tegangan dan arus tidak diambil melalui cincin geser dan sikat, melainkan langsung dari belitan yang tidak berputar. Hal ini sangat menguntungkan untuk daya yang besar dengan tegangan dan arus yang tinggi.

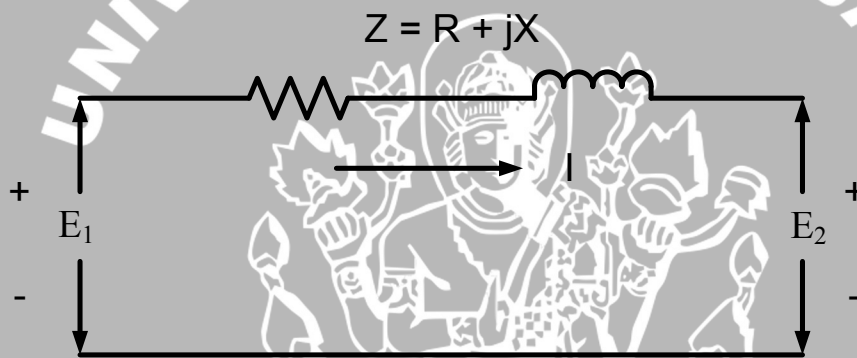
Mesin sinkron kutub dalam berdasarkan konstruksi rotornya dibedakan menjadi dua macam, yaitu bentuk menonjol dan silindris. Suatu persoalan pada rotor dengan kutub

menonjol, untuk mesin-mesin dengan putaran tinggi agak sulit membuat rotor dengan kutub menonjol mempunyai keseimbangan dinamis yang baik. Keseimbangan dinamis yang lebih baik mudah tercapai apabila rotor diberi bentuk kutub silindris (tidak menonjol).

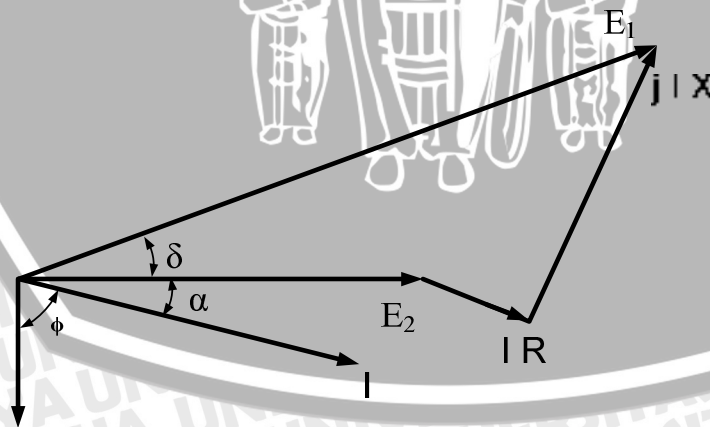
## 2.2.1 Karakteristik Sudut Daya Mesin Sinkron Kutub Silindris

### 2.2.1.1 Keadaan Mantap

Daya terbesar yang dapat dihasilkan oleh suatu mesin sinkron ditentukan oleh momen-kakas terbesar yang dapat diberikan tanpa kehilangan keserempakannya dengan sistem luar yang dihubungkan padanya (Fitzgerald,1994:353). Dari gambar 2.3 dapat dilihat ada dua tegangan bolak-balik  $E_1$  dan  $E_2$  yang dihubungkan oleh impedansi  $Z$  yang mengalirkan arus sebesar  $I$ . diagram fasornya ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.3 Impedansi yang menghubungkan dua tegangan  
 Sumber : Fitzgerald, 1994:354



Gambar 2.4 Diagram fasor impedansi yang menghubungkan dua tegangan  
 Sumber : Fitzgerald, 1994:354

Daya yang diberikan melalui impedansi kepada ujung beban  $E_2$  yang besarnya dalam per unit adalah (Fitzgerald, 1994:354):



$$P_2 = E_2 I \cos \alpha \text{ pu} \quad (2.10)$$

dimana  $\alpha$  merupakan sudut fasa  $I$  terhadap  $E_2$ . Persamaan arus fasornya,

$$\hat{I} = \frac{\hat{E}_1 - \hat{E}_2}{Z} \quad (2.11)$$

Bila tegangan fasor dan impedansi dinyatakan dalam bentuk polar, maka

$$\hat{I} = \frac{E_1 \angle \delta - E_2 \angle 0^\circ}{|Z| \angle \alpha} = \frac{E_1}{|Z|} \angle \delta - \alpha - \frac{E_2}{|Z|} \angle -\alpha \quad (2.12)$$

dimana  $E_1, E_2$  = besar tegangan

$\delta$  = beda fasa  $E_1$  mendahului  $E_2$

$|Z|$  = besar impedansi

$\alpha$  = sudut impedansi dalam polar

bagian yang nyata dari persamaan fasor 2.12 merupakan komponen  $I$  yang sefasa dengan  $E_2$ , sehingga

$$I \cos \alpha = \frac{E_1}{|Z|} \cos(\delta - \alpha) - \frac{E_2}{|Z|} \cos(-\alpha) \text{ pu} \quad (2.13)$$

dengan mengingat bahwa

$$\cos(-\alpha) = \cos \alpha = \frac{R}{|Z|} \quad (2.14)$$

Dan memasukkan persamaan 2.13 ke dalam persamaan 2.10 diperoleh

$$P_2 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \cos(\delta - \alpha) - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2} \text{ pu} \quad (2.15)$$

dan

$$P_2 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin(\delta + \Phi) - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2} \text{ pu} \quad (2.16)$$

dimana

$$\Phi = 90^\circ - \alpha = \tan^{-1} \frac{R}{X} \quad (2.17)$$

biasanya merupakan sudut kecil

dengan cara yang sama, daya  $P_1$  pada ujung sumber  $E_1$  dapat dinyatakan sebagai:

$$P_1 = \frac{E_1 E_2}{|Z|} \sin(\delta - \Phi) - \frac{E_1^2 R}{|Z|^2} \text{ pu} \quad (2.18)$$

Jika tahanan diabaikan, maka:

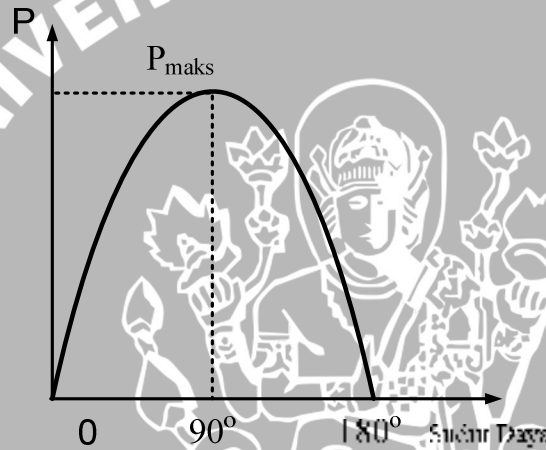
$$P_1 = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta \text{ pu} \quad (2.19)$$

Persamaan diatas dikenal sebagai karakteristik sudut daya untuk mesin serempak dan sudut  $\delta$  disebut sudut daya.

Daya maksimum diperoleh jika nilai  $\sin \delta = 1$ , sehingga :

$$P_{1maks} = P_{2maks} = \frac{E_1 E_2}{X} \text{ pu} \quad (2.20)$$

Gambar 2.5 menjelaskan kedudukan  $\delta = 90^\circ$ , daya yang disalurkan mencapai harga terbesar dan merupakan nilai kritis. Jika daya yang disalurkan lebih besar lagi, sistem menjadi tidak stabil. Hal ini menyebabkan generator kehilangan sinkronisasinya.



Gambar 2.5 Kurva sudut daya  
Sumber : Sulasno, 1993:301

### 2.2.1.2 Keadaan Peralihan

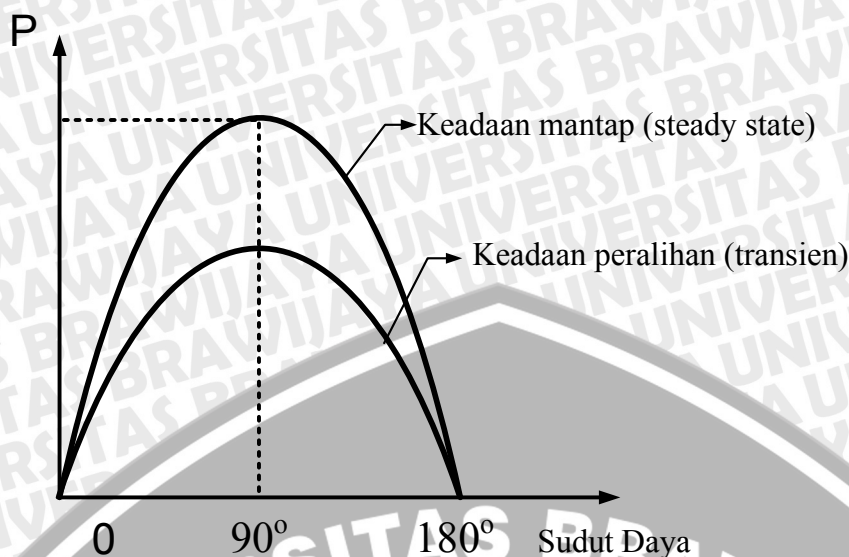
Untuk memperlihatkan mesin sinkron dalam kondisi peralihan, notasi-notasi pada persamaan mesin dalam kondisi mantap harus diubah menjadi notasi-notasi kondisi peralihan (Fitzgerald, 1994:415).

Bila analisis dalam kondisi mantap diulangi dengan  $E_G'$  dan  $X'$  menggantikan  $E_1$  dan  $X$ , maka persamaannya adalah :

$$P = \frac{E_g' E_2}{X'} \sin \delta \text{ pu} \quad (2.21)$$

Persamaan 2.21 merupakan suatu persamaan sudut daya yang digunakan analisis atau gangguan pembebanan mendadak pada generator. Gambar 2.6 menunjukkan adanya perbedaan persamaan sudut daya antara keadaan mantap dan peralihan.





Gambar 2.6 Kurva sudut daya keadaan mantap dan peralihan

Sumber : Fitzgerald, 1994:409

Amplitudo kurva sudut daya dalam keadaan transien jauh lebih kecil daripada kurva sudut daya dalam keadaan mantap. Akibatnya adalah mesin tersebut merupakan elemen sistem yang jauh lebih kuat dalam keadaan peralihan, yaitu mesin tersebut akan tahan terhadap pembebanan lebih momen-kakas atau daya yang diberikan mendadak jika lamanya pembebanan relatif pendek.

### 2.2.2 Pengaruh Perubahan Penguatan Pada Generator Sinkron

Perubahan penguatan pada generator serempak adalah faktor yang penting dalam pengaturan aliran daya reaktif. Dengan mempertahankan masukan daya aktif dari generator ke dalam sistem berarti besaran  $V_t$  dan  $I_a \cos \theta$  mempunyai harga yang konstan karena :

$$P = V_t I_a \cos \theta \text{ pu} \tag{2.22}$$

dengan :  $V_t$  adalah tegangan keluaran terminal generator

$I_a$  adalah arus keluaran dari generator

$\theta$  adalah perbedaan sudut antara  $V_t$  dan  $I_a$

dari persamaan 2.19,  $E_2$  diganti dengan  $V_t$  dan  $X$  diganti dengan  $X_s$  sehingga persamaan 2.19 dapat ditulis sebagai :

$$P = \frac{E V_t}{X_s} \sin \delta \text{ pu} \tag{2.23}$$

dengan :  $E$  adalah tegangan dalam generator

$V_t$  adalah tegangan terminal generator

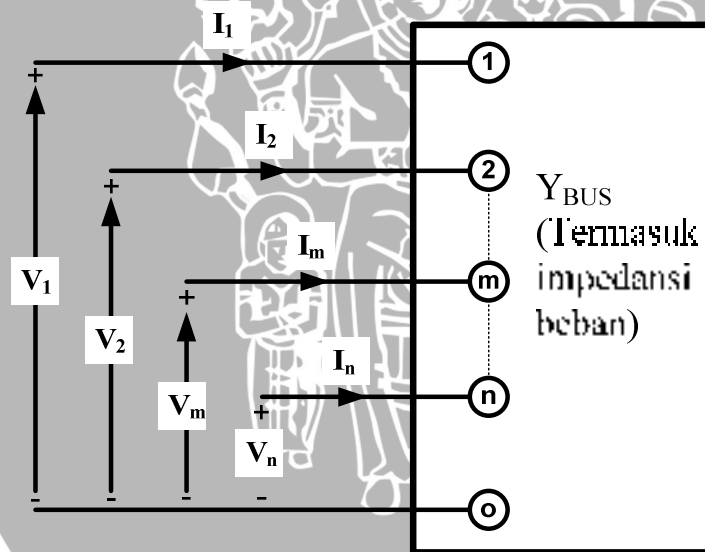
$\delta$  adalah sudut daya

Dengan mempertahankan  $P$  dan  $V_i$  pada nilai yang konstan, maka dengan memperbesar nilai  $E$  akan menyebabkan turunnya nilai  $\sin \delta$ .

### 2.2.3 Sistem Dengan n Unit Generator

Bila pada suatu sistem tenaga listrik terdapat  $n$  unit generator yang dihubungkan paralel atau interkoneksi melayani beberapa pusat beban, maka hal ini akan memepertinggi kestabilan sistem tersebut. Apabila salah satu generator atau pembangkit tenaga listrik mengalami gangguan yang sifatnya sementara maupun tetap, maka beban yang ada akan ditanggung oleh generator atau pembangkit yang lain selama masih dalam batas kemampuannya.

Sistem transmisi daya listrik dianggap memiliki  $n$  bus (tidak termasuk *ground bus*) dan  $m$  bus generator ( $m < n$ ) dengan jumlah masukan yang lebih dari satu seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Admitansi bus dinotasikan dengan  $Y_{bus}$ . Secara umum rugi-rugi diabaikan,  $m$  bus generator yang pertama didesain untuk bus generator.



Gambar 2.7 Skematis suatu sistem tenaga listrik dengan n unit generator

Sumber : Pai, 1979:145

Studi aliran beban untuk kondisi seperti di atas diprioritaskan akibat gangguan, seperti  $t = 0^-$  yang ditentukan dengan kondisi sebagai berikut :

- (i)  $P_{Li}, Q_{Li}, P_{Gi}, Q_{Gi} \quad i = 1, 2, \dots, m$
- (ii)  $P_{Li}, Q_{Li} \quad i = m + 1, \dots, n$
- (iii)  $|V_i| \angle \psi_i = V_1 \quad i = 1, 2, \dots, n$



$P$  dan  $Q$  adalah daya nyata dan reaktif pada bus-bus dan subskrip  $L$  dan  $G$  mengacu kepada beban dan pembangkitan.  $V_i$  adalah fasor dan  $\psi_i$  adalah sudut fasa pada tegangan pada bus  $i$ th.

Beban diubah dalam bentuk yang ekuivalen dengan admitansi  $y_{Li}$  antara bus dengan ground bus dengan :

$$y_{Li} = (P_{Li} - jQ_{Li})/|V_i|^2 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.24)$$

Apabila tidak ada beban pada bus  $i$ ,  $y_{Li} = 0$ .

Dengan penambahan elemen yang terkait dengan admitansi beban, representasi majemuk dapat dimodifikasi menjadi :

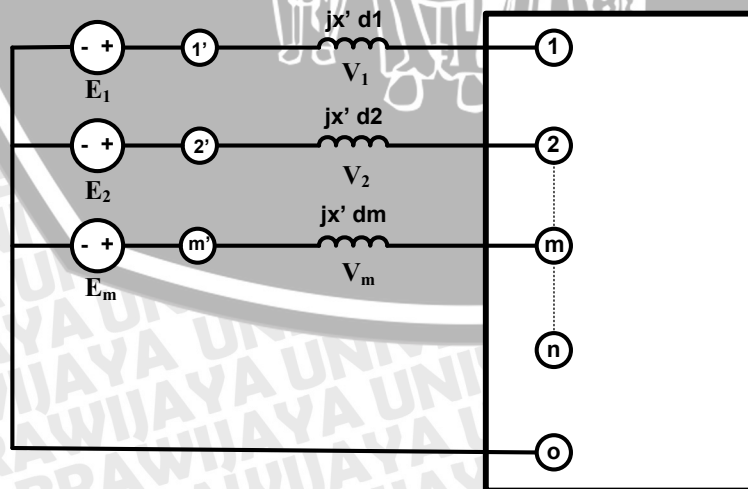
$$Y_{Bus} = Y_{Bus (lama)} + \text{diag} (y_{Li}) \quad (2.25)$$

Modifikasi persamaan 2.18 hanya dapat dilakukan jika elemen diagonal matiks admitansi bus sudah di modifikasi. Gambar 2.7 menunjukkan  $n$ -masukan dengan  $Y_{Bus}$  yang termodifikasi.

Pembangkitan pada bus-bus generator diubah menjadi sumber tegangan ekuivalen yang seri dengan reaktansi sumbu tegak transien dari mesin seperti berikut : (gambar 2.8)

$$E_i = V_i + jx'_{di} \frac{(P_{Gi} - jQ_{Gi})}{V_i^*} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.26)$$

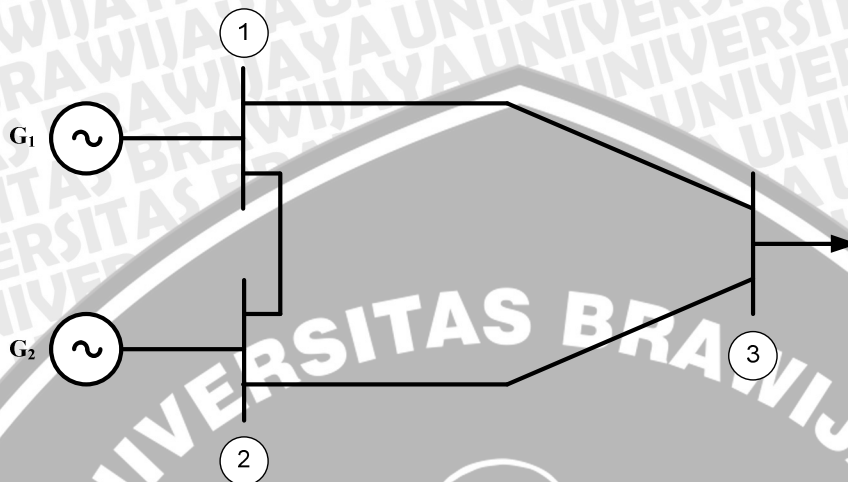
Dimana  $x'_{di}$  adalah reaktansi sumbu tegak transien dari mesin  $i$ th dan  $E_i$  adalah tegangan pada reaktansi transien mesin  $i$ th. Sistem transmisi generator ditunjukkan pada gambar 2.8 dimana reaktansi transien dan tegangan pada reaktansi-reaktansi tersebut ditunjukkan secara eksplisit.



Gambar 2.8 Representasi sistem mesin sinkron majemuk

Sumber : Pai, 1979:146

Berikut ini adalah contoh sistem yang dijelaskan pada gambar 2.9 untuk data mesin dan transmisi diperlihatkan pada tabel 2.1 dan 2.2 dalam satuan per unit. Data aliran beban ditunjukkan dalam tabel 2.3. Beban-beban direpresentasikan sebagai impedansi ke tanah.



Gambar 2.9 Sistem dua mesin

Sumber : Pai, 1979:157

Tabel 2.1

Data mesin sinkron untuk contoh sistem gambar 2.9

Nomer bus	Konstanta inersia $H$ dalam detik	Reaktansi sumbu tegak transien $x'_d$
1	160	0,1
2	3	0,3

Tabel 2.2

Data admitansi saluran untuk contoh sistem gambar 2.9

Nomer Saluran	Kode bus $p-q$	Admitansi $y_{pq}$ (pu)	Setengah saluran $y'_{pq}/2$ (pu)
1	1-2	1,47-j5,88	j0,15
2	1-3	2,94-j11,77	j0,07
3	2-3	2,75-j9,17	j0,04

Tabel 2.3

Data aliran daya untuk contoh sistem gambar 2.9

Nomer bus	Tegangan bus	Pembangkitan	Beban
-----------	--------------	--------------	-------





$P$	$V_p$ (pu)	MW	MVAR	MW	MVAR
1	1,04 $\angle 0^\circ$	212,14	93,26	0,00	0,00
2	1,02 $\angle -3,09^\circ$	100,00	70,00	50,00	20,00
3	0,93 $\angle -7,01^\circ$	0,00	0,00	250,00	150,00

Dalam penyelesaian kita akan menggunakan metode siklus alternatif untuk perhitungan perubahan sudut fasa generator untuk gangguan tiga fasa pada bus 2 untuk durasi 0,1 detik. Mengambil perubahan waktu setiap kenaikan 0,02 detik dan panjang waktu untuk contoh kasus ini adalah 1 detik. Bus 1 sebagai *slack bus*. Selanjutnya mengulang penyelesaian kasus menggunakan metode langsung yaitu mengintegrasikan persamaan ayunan secara langsung.

Mengkonversi beban-beban menjadi admitansi ekuivalen. Beban-beban direpresentasikan sebagai admitansi ke tanah sebagai berikut :

$$y_{L2} = 0,48 - j0,19 \text{ pu} ; y_{L3} = 2,91 - j1,75 \text{ pu}$$

Selanjutnya adalah mengubah pembangkitan ke sumber tegangan yang ekuivalen, tegangan pada reaktansi transien untuk mesin 1 dan 2 akan didapat :

$$E_1 = 1,15 \angle 10,24^\circ \text{ pu} ; y_1 = -j/x'_{d1} = -j10,0 \text{ pu}$$

$$E_2 = 1,26 \angle 10,39^\circ \text{ pu} ; y_2 = -j/x'_{d2} = -j3,33 \text{ pu}$$

sehingga

$$\delta_1 = 10,24^\circ = 0,1786 \text{ radian} ; \delta_2 = 10,39^\circ = 0,181 \text{ radian}$$

Generator dan saluran diubah dalam bentuk matriks (termasuk beban-beban yang direpresentasikan sebagai impedansi tetap), maka persamaan jaringan akan menjadi sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} 4,41 - j27,43 & -1,47 + j5,88 & -2,94 + j11,77 \\ -1,47 + j5,88 & 4,70 - j18,39 & -2,75 + j9,17 \\ -2,94 + j11,77 & -2,75 + j9,17 & 8,61 - j22,58 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j10E_1 \\ -j3,3E_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pada  $t = 0$ , gangguan pada bus 2 disimulasikan pada persamaan di atas dengan membuat  $V_2 = 0$  dan secara berulang menyelesaikan persamaan untuk  $V_1$  dan  $V_2$  dengan  $E_1$  dan  $E_2$  yang diberikan sesuai persamaan di atas. Dari hasil perhitungan didapat tegangan pada bus adalah  $V_1 = 0,53 \angle 0,56^\circ \text{ pu}$ ,  $V_2 = 0$ ,  $V_3 = 0,27 \angle -6,27^\circ \text{ pu}$ . Arus dan daya keluaran pada masing-masing generator akan didapat sebagai berikut :

$$I_1 = 1,99 - j6,0 \text{ pu} ; I_2 = 0,76 - j4,13 \text{ pu}$$

$$P_{e1} = 1,0212 \text{ pu} \text{ dan } P_{e2} = 0,0 \text{ pu}$$

Persamaan diferensialnya adalah

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_0 \quad \text{dengan } i = 1,2.$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\pi f_0}{H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \quad \text{dengan } i = 1,2.$$

dengan kondisi awal  $\delta_1(0) = 0,1786$  radian,  $\delta_2(0) = 0,181$  radian,  $\omega_1(0) = \omega_2(0) = 314,16$  radian/detik. Menggunakan metode Euler, pendekatan pertama dari variabel-variabel di atas menghasilkan :

$$\delta_{1(0,02)}^{(1)} = 0,1786 \text{ radian}; \delta_{2(0,02)}^{(1)} = 0,1814 \text{ radian}$$

$$\omega_{1(0,02)}^{(1)} = 314,1816 \text{ radian/detik}; \omega_{2(0,02)}^{(1)} = 315,2072 \text{ radian/detik}$$

Persamaan jaringan diselesaikan untuk tegangan  $V_i$  dan juga untuk daya nyata  $P_{ei}$  ( $i = 1, 2$ ).

Pendekatan kedua dan yang terakhir untuk  $\delta_i$  dan  $\omega_i$  menggunakan metode *Euler* akan didapat:

$$\delta_{1(0,02)} = 0,1789 \text{ radian} = 10,25^\circ; \delta_{2(0,02)} = 0,1918 \text{ radian} = 10,99^\circ$$

$$\omega_{1(0,02)} = 314,1816 \text{ radian/detik}; \omega_{2(0,02)} = 315,2072 \text{ radian/detik}$$

Tegangan di belakang reaktansi transien adalah

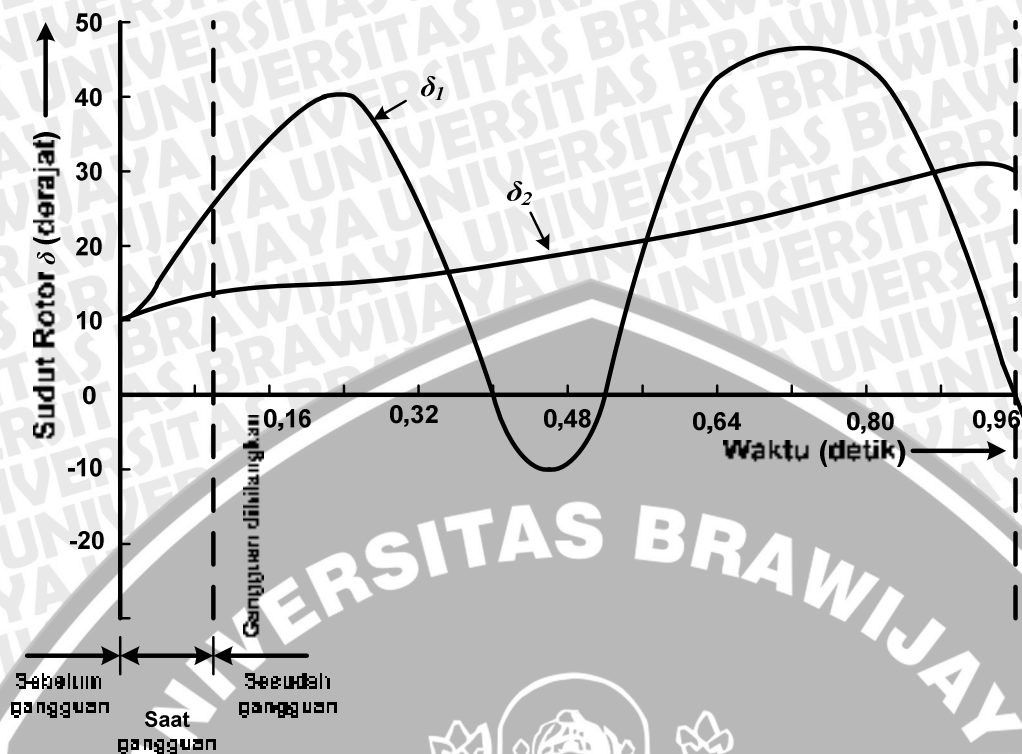
$$E_1 = 1,15 \angle 10,25^\circ \text{ pu}; \quad E_2 = 1,26 \angle 10,99^\circ \text{ pu}$$

Dengan diketahui tegangan dalam, maka persamaan jaringan akan didapat  $V_1, V_2, P_{e1}, P_{e2}$  pada  $t = 0,02$  detik yaitu :

$$V_1 = 0,53 \angle 0,57^\circ \text{ pu}; \quad V_2 = 0 \text{ pu}; \quad V_3 = 0,27 \angle -6,26^\circ \text{ pu}; \quad P_{e1} = 1,02 \text{ pu}; \quad P_{e2} = 0 \text{ pu}$$

Penyelesaian perhitungan untuk  $t + \Delta t = 0,02$  detik telah ditunjukkan di atas. Perhitungan hasil akhir akan selesai pada tingkatan selanjutnya pada penambahan waktu hingga  $t = 0,10$  detik. Persamaan jaringan diselesaikan tanpa gangguan untuk mendapatkan kondisi setelah gangguan. Besarnya tegangan pada reaktansi transien tetap konstan. Proses akan berlanjut sampai  $t = 1,0$  detik. Sudut rotor generator 1 dan 2 akan ditunjukkan pada gambar 2.10. sistem tetap stabil untuk gangguan ini.





Gambar 2.10 Kurva berayun untuk contoh soal

Sumber : Pai, 1979:159

### 2.3 Dinamika Rotor dan Persamaan Ayunan

Persamaan yang mengatur gerakan rotor suatu mesin sinkron didasarkan pada prinsip dasar dinamika yang menyatakan bahwa momen-putar percepatan (accelerating torque) adalah hasil kali momen kelembaman (momen inersia) rotor dengan percepatan sudutnya.

Persamaannya dapat ditulis sebagai (Stevenson, 1994:351) :

$$J \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \quad \text{Nm} \quad (2.27)$$

dimana :  $J$  adalah momen kelembaman motor

$\theta_m$  adalah pergeseran sudut rotor terhadap sumbu diam (radian)

$t$  adalah waktu dalam detik

$T_m$  adalah momen putaran mekanis poros penggerak yang diberikan penggerak mula dikurangi dengan rugi-rugi (Nm)

$T_e$  adalah momen putar listrik (Nm)

$T_a$  adalah momen putar percepatan (Nm)

Momen putar mekanis  $T_m$  dan momen putar listrik  $T_e$  dianggap positif untuk generator sinkron. Ini berarti bahwa  $T_m$  adalah resultan momen putar poros yang mempunyai kecenderungan untuk mempercepat rotor dalam arah perputaran  $\theta_m$  yang positif. Untuk

generator yang bekerja dalam keadaan tetap,  $T_m$  dan  $T_e$  adalah sama, sedangkan momen putar  $T_a$  sama dengan nol. Dalam keadaan ini tidak ada percepatan ataupun perlambatan terhadap massa rotor dan kecepatan tetap resultan adalah kecepatan serempak. Dalam penulisan ini  $T_m$  dianggap konstan pada setiap keadaan kerja yang diberikan.

Karena  $\theta_m$  diukur terhadap sumbu pedoman yang diam pada stator, maka  $\theta_m$  adalah ukuran absolut sudut rotor. Karena itu pula  $\theta_m$  akan terus bertambah dengan waktu, bahkan juga pada kecepatan serempak yang konstan. Dengan memperhatikan kecepatan rotor relatif terhadap kecepatan serempak, maka akan lebih mudah untuk mengukur posisi sudut rotor terhadap sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan serempak. Dari sini didefinisikan :

$$\theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \text{ radian} \quad (2.28)$$

dimana  $\omega_{sm}$  adalah kecepatan serempak mesin dalam radian mekanis per detik dan  $\delta_m$  adalah pergeseran sudut rotor dalam radian mekanis dari sumbu pedoman yang berputar dengan kecepatan serempak. Dengan menurunkan persamaan terhadap waktu diperoleh:

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{sm} + \frac{d\delta_m}{dt} \text{ radian/detik} \quad (2.29)$$

dan

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \text{ radian/detik}^2 \quad (2.30)$$

Persamaan 2.27 di atas menunjukkan bahwa kecepatan sudut rotor  $d\theta_m/dt$  adalah konstan dan sama dengan kecepatan serempak hanya bila  $d\theta_m/dt$  sama dengan nol. Karena itu  $d\theta_m/dt$  adalah penyimpangan sudut rotor dari keadaan serempak dan dilihat dalam satuan radian mekanis per detik.

Dengan mensubsitusikan persamaan 2.30 dengan persamaan 2.27 dapat diperoleh :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \text{ Nm} \quad (2.31)$$

dengan mengingat bahwa :

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \omega_m \text{ radian/detik} \quad (2.32)$$

sebagai kecepatan sudut rotor. Daya adalah sama dengan hasil kali momen putar dengan kecepatan sudut, sehingga bila persamaan 2.32 dikalikan dengan  $\omega_m$  diperoleh :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ watt} \quad (2.33)$$

Dimana  $P_m$  adalah masukan daya poros ke mesin dikurangi daya rugi-rugi perputaran,  $P_e$  adalah daya listrik pada celah udaranya dan  $P_a$  adalah daya percepatan yang menjelaskan



setiap ketidakseimbangan antara  $P_m$  dan  $P_e$ . Umumnya rugi-rugi perputaran dan  $I^2R$  jangkar dapat diabaikan sehingga  $P_m$  dapat dianggap sebagai daya yang dicatu oleh penggerak mula dan  $P_e$  sebagai keluaran daya listrik.

Koefisien  $J\omega_m$  adalah momen sudut rotor. Pada kecepatan serempak momen ini dinyatakan dengan  $M$  dan disebut konstanta kelembaman (inertia constant) dari mesin itu dan dituliskan sebagai :

$$M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ watt} \quad (2.34)$$

Meski telah digunakan  $M$  dalam persamaan ini, koefisien tersebut bukanlah suatu koefisien dalam arti sebenarnya karena  $\omega_m$  tidak sama dengan kecepatan serempak pada semua keadaan kerja. Namun dalam prakteknya  $\omega_m$  tidak terlalu berbeda dari kecepatan serempak bila mesinnya stabil. Karena daya lebih memudahkan perhitungan dalam perhitungan daripada momen putar, maka persamaan 2.32 lebih banyak dipilih. Dalam data mesin yang diberikan untuk studi kestabilan, satu lagi konstanta yang diperlukan yaitu konstanta  $H$  yang didefinisikan sebagai hasil bagi antara daya kinetis yang disimpan dalam megajoule pada kecepatan serempak dengan *rating* mesin dalam MVA.

$$H = \frac{1,5J\omega_{sm}^2}{S} = \frac{0,5M\omega_{sm}}{S} \text{ MJ/MVA} \quad (2.35)$$

dengan menyelesaikan persamaan 2.35 didapat

$$M = \frac{2H}{\omega_{sm}} S \text{ MJ/radian mekanis} \quad (2.36)$$

dan dengan memasukkan persamaan ini ke persamaan 2.32 didapatkan

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S} = \frac{P_m - P_e}{S} \quad (2.37)$$

persamaan di atas bila dinyatakan dalam per unit dapat dituliskan dalam bentuk

$$\frac{2H}{\omega_{sm}} \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ pu} \quad (2.38)$$

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \text{ pu} \quad (2.39)$$

dan dari persamaan 2.37 didapat

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - \omega_s \text{ radian/detik} \quad (2.40)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \text{ radian/detik} \quad (2.41)$$

persamaan di atas merupakan persamaan ayunan generator serempak.

### 2.3.1 Penyelesaian Persamaan Diferensial dengan Metode Runge-Kutte

Persamaan diferensial orde pertama :

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \tag{2.42}$$

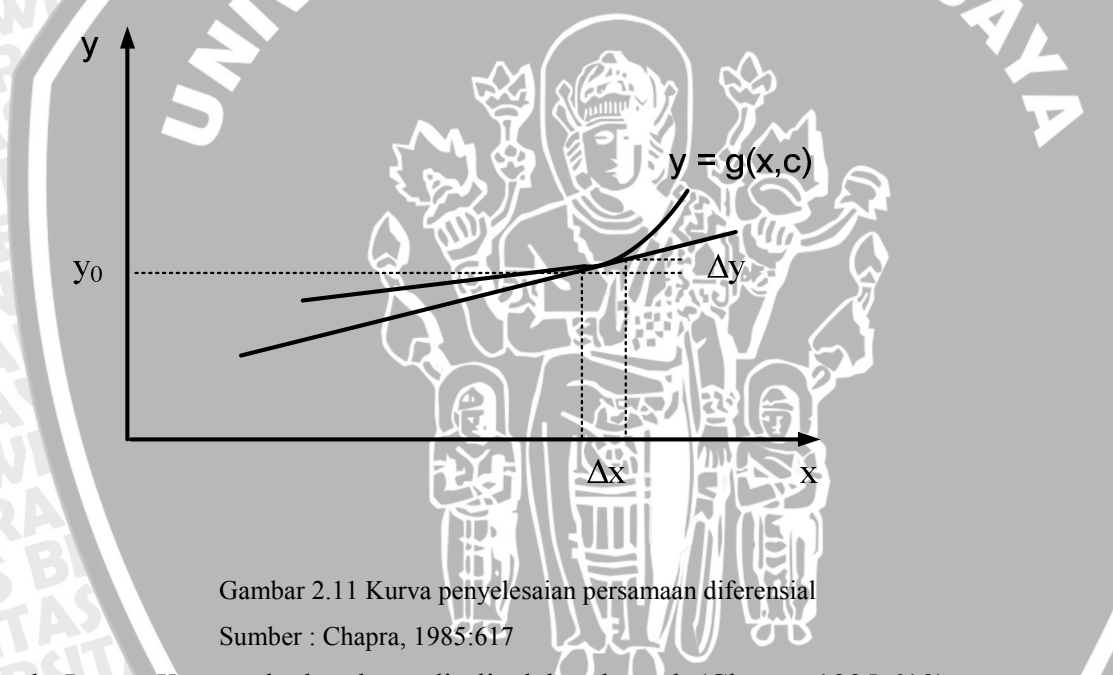
dimana  $x$  adalah variabel bebas dan  $y$  adalah variabel tidak bebas. Penyelesaian persamaan

2.42 memperoleh bentuk :

$$y = g(x, c) \tag{2.43}$$

dengan  $c$  merupakan konstanta yang dihitung pada kondisi awal.

Kurva penyelesaian persamaan ditunjukkan pada gambar 2.11 berikut :



Gambar 2.11 Kurva penyelesaian persamaan diferensial

Sumber : Chapra, 1985:617

Metode Runge-Kutte orde dua dapat ditulis dalam bentuk (Chapra, 1995:619) :

$$y_1 = y_0 + a_1 + a_2 k_2 \tag{2.44}$$

dengan :

$$k_1 = f(x_0, y_0)h$$

$$k_2 = f(x_0 + b_1 h, y_0 + b_2 k_1)h$$

koefisien  $a_1, a_2, b_1$  dan  $b_2$  harus dicari.

Pertama, diuraikan  $f(x_0 + b_1 h, y_0 + b_2 k_1)$  ke dalam deret Taylor, didapat

$$k_2 = \left\{ f(x_0, y_0) + b_1 \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_0 h + b_2 k_1 \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_0 + \dots \right\} h$$





Substitusikan  $k_1$  dan dua deret  $k_2$  ke dalam persamaan 2.44 diperoleh :

$$y_1 = y_0 + (a_1 + a_2)f(x_0, y_0)h + a_2b_1 \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_0 h^2 + a_2b_2f(x_0, y_0) \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_0 h^2 \quad (2.45)$$

Deret *Taylor* diperluas 2.45 untuk  $y$  :

$$y_1 = y_0 = \frac{\partial y}{\partial x} \Big|_0 h + \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \Big|_0 f(x_0, y_0) \quad (2.46)$$

dengan

$$\frac{dy}{dx} \Big|_0 = f(x_0, y_0) \quad \text{dan}$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} \Big|_0 = \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_0 f(x_0, y_0)$$

Persamaan 2.46 dapat ditulis

$$y_1 = y_0 + f(x_0, y_0)h + \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_0 \frac{h^2}{2} + \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_0 f(x_0, y_0) \frac{h^2}{2} + \dots \quad (2.47)$$

koefisien persamaan 2.45 dan persamaan 2.47 :

$$a_1 + a_2 = 1$$

$$a_1.b_1 = 1/2$$

$$a_2.b = 1/2$$

diambil  $a_1 = 1/2$ , sehingga :

$$a_2 = 1/2$$

$$b_1 = 1$$

$$b_2 = 1$$

substitusi nilai-nilai ini ke dalam persamaan 2.44 dan didapat persamaan *Runge-Kutte* orde dua sebagai berikut :

$$y_1 = y_0 + 1/2 k_1 + 1/2 k_2$$

dengan :

$$k_1 = f(x_0, y_0)$$

$$k_2 = f(x_0 + h, y_0 + k_1)h$$

sehingga

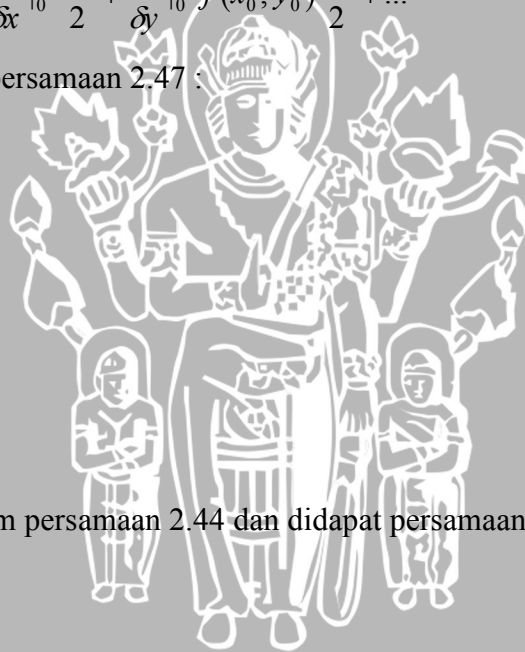
$$\Delta y = 1/2 (k_1 + k_2)$$

dengan 2 menyatakan orde dua.

Metode *Runge-Kutte* orde empat dapat ditulis (Chapra, 1985:626):

$$y_1 = y_0 + a_1k_1 - a_2k_2 + a_3k_3 + a_4k_4 \quad (2.48)$$

dengan :



$$k_1 = f(x_0, y_0)h$$

$$k_2 = f(x_0 + b_1h, y_0 + b_2k_1)h$$

$$k_3 = f(x_0 + b_3h, y_0 + b_4k_2)h$$

$$k_4 = f(x_0 + b_5h, y_0 + b_6k_3)h$$

dengan cara yang sama seperti pada orde dua, koefisien dalam persamaan 2.48 diperoleh:

$$a_1 = 1/6$$

$$a_2 = 2/6$$

$$a_3 = 2/6$$

$$a_4 = 1/6$$

dan

$$b_1 = 1/2$$

$$b_2 = 1/2$$

$$b_3 = 1/2$$

$$b_4 = 1/2$$

$$b_5 = 1$$

$$b_6 = 1$$

dengan mensubstitusikan nilai-nilai ini ke dalam persamaan 2.48, maka persamaan *Runge-Kutte* orde empat dapat ditulis :

$$y_1 = y_0 + 1/6(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

dengan :

$$k_1 = f(x_0, y_0)h$$

$$k_2 = f(x_0 + h/2, y_0 + k_1/2)h$$

$$k_3 = f(x_0 + h/2, y_0 + k_2/2)h$$

$$k_4 = f(x_0 + h, y_0 + k_3)h$$

Metode *Runge-Kutte* orde empat untuk menyelesaikan secara simultan persamaan diferensial dari bentuk :

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y, z)$$



$$\frac{dz}{dx} = g(x, y, z)$$

dengan :

$$y_1 = y_0 + 1/6 (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)$$

$$z_1 = z_0 + 1/6 (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4)$$

dengan :

$$k_1 = f(x_0, y_0, z_0)h$$

$$k_2 = f(x_0 + h/2, y_0 + k_1/2, z_0 + l_1/2)h$$

$$k_3 = f(x_0 + h/2, y_0 + k_2/2, z_0 + l_2/2)h$$

$$k_4 = f(x_0 + h, y_0 + k_3, z_0 + l_3)h$$

$$l_1 = f(x_0, y_0, z_0)h$$

$$l_2 = f(x_0 + h/2, y_0 + k_1/2, z_0 + l_1/2)h$$

$$l_3 = f(x_0 + h/2, y_0 + k_2/2, z_0 + l_2/2)h$$

$$l_4 = f(x_0 + h, y_0 + k_3, z_0 + l_3)h$$

### 2.3.2 Penyelesaian Persamaan Ayunan dengan metode Runge-Kutte

Metode Runge-Kutte orde empat seperti yang telah diuraikan akan dipergunakan untuk menyelesaikan persamaan ayunan.

Persamaan ayunan dari persamaan 2.34 ditulis kembali :

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega}{2H} (P_m - P_e)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s$$

dengan menyesuaikan metode Runge-Kutte dengan persamaan ayunan diperoleh

$$\Delta\delta_{i(t+\Delta t)} = 1/6 (k_1 + 2k_2 + 2k_{3i} + k_{4i})$$

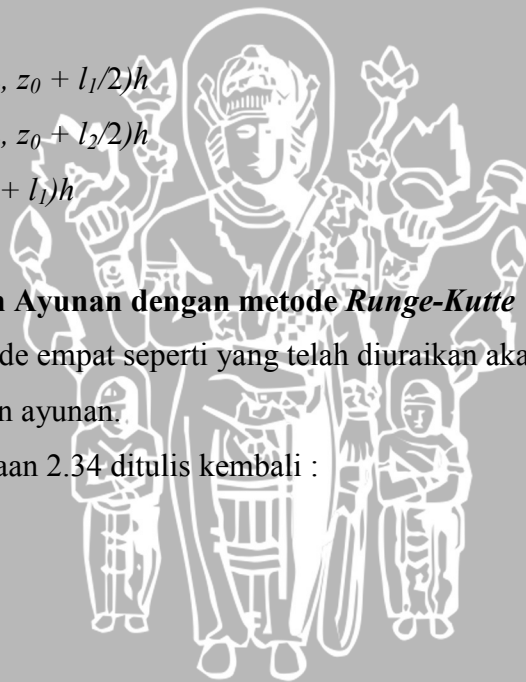
$$\Delta\omega_{i(t+\Delta t)} = 1/6 (l_1 + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i})$$

dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  sehingga

$$\Delta\delta_{i(t+\Delta t)} = \delta_{i(t)} + 1/6 (k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i})$$

$$\Delta\omega_{i(t+\Delta t)} = \omega_{i(t+\Delta t)} + 1/6 (l_{1i} + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i}) \quad (2.49)$$

Nilai  $k$  dan  $l$  dapat dicari dari :



Perkiraan pertama :

$$k_{1i} = (\omega_{li} - \omega_s)\Delta t \quad (2.50)$$

$$l_{1i} = \frac{\omega}{H} (P_{mi} - P_{ei}^{(1)}(t))\Delta t \quad (2.51)$$

dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$

$P_{ei}^{(1)}(t)$  adalah daya keluaran generator saat sudut daya  $\delta_0 (t = 0)$

Perkiraan kedua :

$$k_{2i} = \left\{ \left( \omega_{(t)} + \frac{l_{1i}}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t \quad (2.52)$$

$$l_{2i} = \frac{\omega}{H} (P_{mi} - P_{ei}^{(2)}(t))\Delta t \quad (2.53)$$

dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  dimana daya keluaran generator saat sudut daya  $(\delta_{i(t)} + k_{1i}/2)$

Perkiraan ketiga :

$$k_{3i} = \left\{ \left( \omega_{(t)} + \frac{l_{2i}}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t \quad (2.54)$$

$$l_{3i} = \frac{\omega}{H} (P_{mi} - P_{ei}^{(3)}(t))\Delta t \quad (2.55)$$

dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  dimana  $P_{ei}^{(3)}(t)$  adalah daya keluaran generator saat sudut daya  $(\delta_{i(t)} + k_{2i}/2)$

Perkiraan keempat :

$$k_{4i} = \left\{ \left( \omega_{(t)} + \frac{l_{3i}}{2} \right) - \omega_s \right\} \Delta t \quad (2.56)$$

$$l_{4i} = \frac{\omega}{H} (P_{mi} - P_{ei}^{(4)}(t))\Delta t \quad (2.57)$$

dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  dimana  $P_{ei}^{(4)}(t)$  adalah daya keluaran generator saat sudut daya  $(\delta_{i(t)} + k_{3i}/2)$ , sehingga pada suatu interval didapat :

$$\Delta \delta_{i(t+\Delta t)} = \delta_{i(t)} + 1/6 (k_{1i} + 2k_{2i} + 2k_{3i} + k_{4i}) \quad (2.58)$$

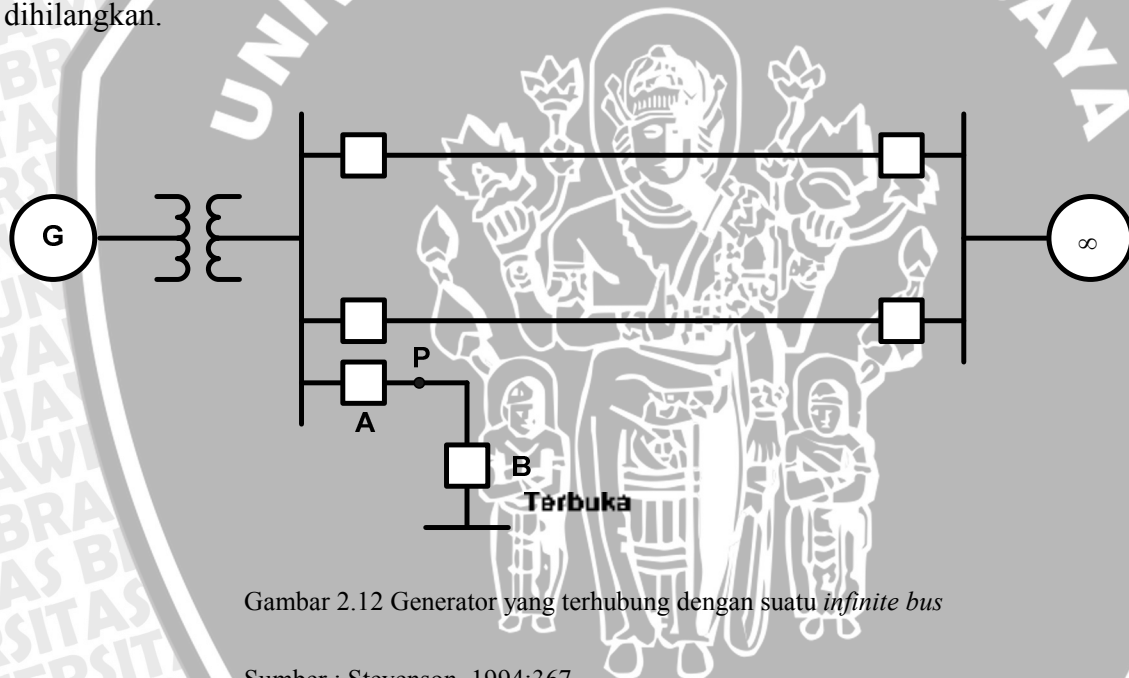
$$\Delta \omega_{(t+\Delta t)} = \omega_{i(t+\Delta t)} + 1/6 (l_{1i} + 2l_{2i} + 2l_{3i} + l_{4i}) \quad (2.59)$$

## 2.4 Metode Kriteria Sama Luas



Kriteria sama luas menyatakan bahwa berapapun energi kinetis yang ditambahkan pada rotor setelah terjadinya gangguan harus dihilangkan untuk mengembalikan rotor pada kecepatan sinkronnya (Stevenson, 1994:370). Untuk menentukan waktu pemutusan kritis, setting rele perlu diketahui waktu atau sudut daya dimana rele itu selambat-lambatnya harus bekerja supaya sistem itu tetap stabil. Sudut terbesar dimana rele harus sudah bekerja supaya sistem itu tetap stabil dinamakan sudut kritis  $\delta$ . Metode kriteria luas dapat digunakan untuk menentukan sudut dan waktu kritis yang dapat dijelaskan berdasarkan kurva sudut daya.

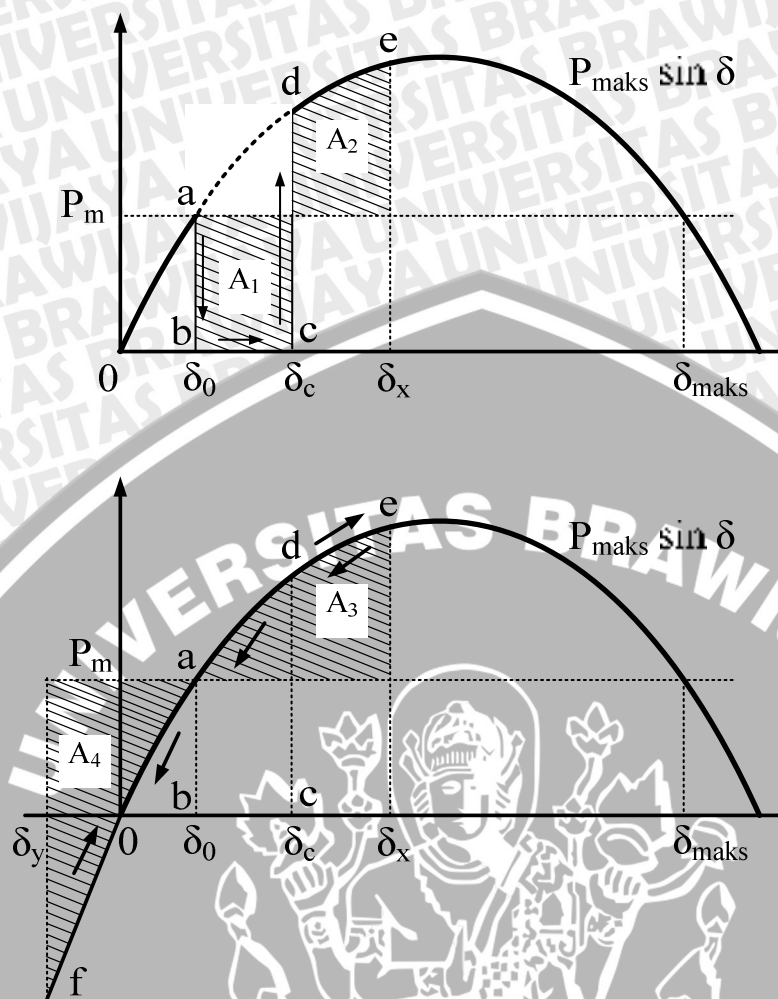
Sistem yang terlihat pada gambar 2.12 menunjukkan mula-mula pemutus rangkaian A tertutup tetapi pemutusan rangkaian B pada ujung lain dari saluran lain dari saluran pendek itu terbuka. Titik P yang dekat dengan rel, suatu gangguan tiga fasa timbul dan dalam kurun waktu singkat diputuskan oleh pemutus rangkaian A. Oleh karena itu, sistem transmisi efektif berada pada rel sehingga daya listrik keluaran generator adalah nol sampai gangguan berhasil dihilangkan.



Gambar 2.12 Generator yang terhubung dengan suatu *infinite bus*

Sumber : Stevenson, 1994:367

Sebelum terjadi gangguan, generator bekerja pada kecepatan serempak dengan sudut rotor sebesar  $\delta_0$  dan daya mekanik ( $P_m$ ) yang sama dengan daya elektrik ( $P_e$ ) seperti yang ditunjukkan pada titik a. pada saat terjadi gangguan  $t = 0$ , keluaran daya berubah seperti terlihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Kurva sudut daya untuk generator yang menunjukkan luas  $A_1$  dan  $A_2$  adalah sama demikian pula luas  $A_3$  dan  $A_4$ .

Sumber : Stevenson, 1994:368.

Jika waktu yang diperlukan untuk memutuskan gangguan yang diperlukan untuk memutuskan gangguan yang dinyatakan dengan  $t_c$ , percepatan adalah konstan yang dinyatakan oleh :

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H} P_m \quad (2.60)$$

Sementara gangguan bekerja, penambahan kecepatan diatas percepatan serempak diperoleh dengan mengintegalkan persamaan ini sehingga didapatkan :

$$\frac{d\delta}{dt} = \int_0^1 \frac{\omega_s}{2H} P_m dt = \frac{\omega_s}{2H} P_m t \quad (2.61)$$



$$\delta = \frac{\omega_s}{4H} P_a t^2 + \delta_0 \quad (2.62)$$

Persamaan di atas menunjukkan bahwa kecepatan rotor relatif terhadap kecepatan serempak bertambah secara linier dengan waktu, sedangkan sudut rotor maju dari  $\delta_0$  ke sudut pemutusan  $\delta_c$ , yang berarti sudut-sudut  $\delta$  berubah dari b ke c.

Bila gangguan dihilangkan pada sudut  $\delta_c$ , keluaran daya listrik mendadak naik ke d. Pada d, keluaran generator melebihi daya mekanis sehingga daya percepatan adalah negatif. Akibat percepatan rotor menurun sementara  $P_e$  berubah dari d ke c. Pada e, kecepatan rotor kembali serempak meskipun sudut rotor sudah maju sampai  $\delta_x$ .

Daya percepatan pada e masih negatif (memperlambat), sehingga rotor tidak tetap pada kecepatan serempak dan harus terus mengurangi kecepatannya. Kecepatan relatif sekarang menjadi negatif dan sudut rotor bergerak dari e ke a dimana kecepatan rotor adalah kurang dari kecepatan serempak. Dari a ke f daya mekanis melebihi daya listrik dan kecepatan rotor naik lagi sehingga mencapai kecepatan serempak pada titik f. Titik f terletak sedemikian hingga luas  $A_3$  sama dengan luas  $A_4$ , jika tidak ada redaman, rotor akan terus berosilasi dalam urutan f-a-e, e-a-f dan seterusnya dengan kecepatan serempak terjadi pada e dan f.

Selanjutnya persamaan ayunan yang telah dijelaskan di sebelumnya ditulis kembali :

$$\frac{2Hd^2 \delta}{\omega_s dt^2} = P_m - P_e \quad (2.63)$$

didefinisikan kecepatan sudut rotor relatif terhadap kecepatan serempak adalah :

$$\omega_r = \frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_s \quad (2.64)$$

definisikan persamaan 2.64 terhadap  $t$  dan masukkan ke persamaan 2.63 menghasilkan :

$$\frac{2Hd\omega_r}{\omega_s dt^2} = p_m - P_e \quad (2.65)$$

Persamaan 2.65 dikalikan dengan  $\omega_s = \frac{d\delta}{dt}$  didapat :

$$\frac{H}{\omega_s} 2\omega_r \frac{d\omega_r}{dt} = (P_m - P_e) \frac{d\delta}{dt} \quad (2.66)$$

dengan mengalikan persamaan 2.66 dengan dt diperoleh :

$$\frac{H}{\omega_s} (\omega_{re}^2 - \omega_{ra}^2) = \int_{\delta_0}^{\delta_x} (P_m - P_e) dt \quad (2.67)$$

dimana

$\omega_{re}, \omega_{ra}$  = kecepatan relatif rotor yang bersesuaian dengan  $\delta_x, \delta_a$ .

Karena  $\omega_r$  mewakili penyimpangan kecepatan rotor dari kecepatan serempak dengan mudah akan dilihat untuk a dan e (gambar 2.13),  $\omega_{ra}$ , dan  $\omega_{re} = 0$  sehingga persamaan 2.67 menjadi :

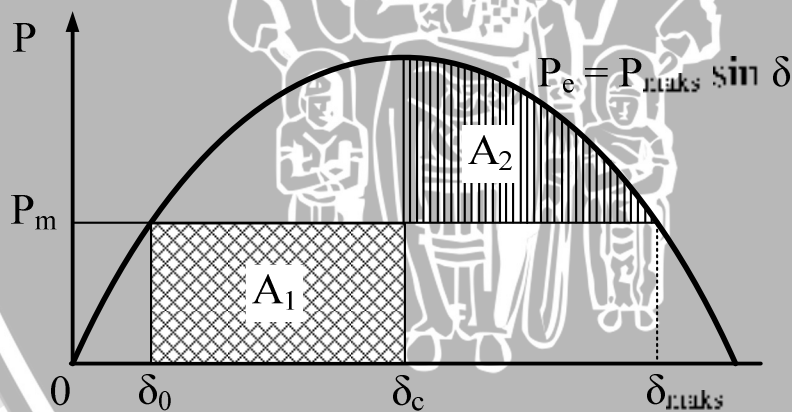
$$\int_{\delta_0}^{\delta_x} (P_m - P_e) dt = 0 \tag{2.68}$$

Bila dilakukan integral dalam dua langkah dapat ditulis :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_0}^{\delta_x} (P_e - P_m) d\delta \tag{2.69}$$

Dalam gambar 2.14 luas  $A_1$  dan  $A_2$  berbanding lurus dengan kenaikan energi kinetik rotor. Selama rotor itu mengalami percepatan, sedangkan luas  $A_3$  dan  $A_4$  sebanding dengan penurunan energi kinetik rotor selama rotor itu diperlambat.

Pada gambar 2.14, luas  $A_1$  yang diarsir tergantung pada waktu yang diperlukan untuk menghilangkan gangguan. Jika ada keterlambatan dalam pemutusan gangguan, sudut  $\delta_c$  akan bertambah. Jika keterlambatan tersebut diperpanjang sedemikian rupa sehingga sudut rotor  $\delta$  berayun melebihi sudut  $\delta_{maks}$ , maka kecepatan rotor pada titik itu dalam lengkung daya adalah lebih dari kecepatan serempak ketika didapatkan lagi daya percepatan positif.



Gambar 2.14 Kurva sudut daya yang menunjukkan sudut pemutusan kritis.

Sumber : Ibid, 371.

Dengan adanya pengaruh daya percepatan positif ini, sudut daya akan meningkat tanpa batas dan terjadilah ketidakstabilan. Karena itu pada metode kriteria sama luas, luas  $A_1$  antara  $\delta_0$  sampai  $\delta_c$  dan luas  $A_2$  antara  $\delta_c$  sampai  $\delta_{maks}$  harus sama, sehingga diperoleh :



$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_c} P_m d\delta = P_m (\delta_c - \delta_0) \quad (2.70)$$

$$A_2 = \int_{\delta_c}^{\delta_{maks}} (P_{maks} \sin \delta - P_m) d\delta \quad (2.71)$$

Dengan menyamakan kedua persamaan di atas dan memindahkan suku-sukunya dihasilkan :

$$\cos \delta_c = (P_m / P_{maks}) (\delta_{maks} - \delta_0) + \cos \delta_{maks} \quad (2.72)$$

Karena  $\delta_{maks} = \pi - \delta_0$

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

$\delta_{maks}$  dan  $P_m$  dimasukkan ke persamaan 2.72 didapat :

$$\cos \delta_c = \cos^{-1} (\pi - 2 \delta_0) \sin \delta_0 - \cos \delta_0 \quad (2.73)$$

Jika  $\delta_0$  dimasukkan ke persamaan 2.55 akan dihasilkan

$$\delta = \frac{\omega_s}{2H} P_a t_c^2 + \delta_0 \text{ radian} \quad (2.74)$$

sehingga diperoleh waktu pemutusan kritis  $t_c$

$$t_c = \sqrt{\frac{4H(\delta_c - \delta_0)}{\omega_s P_a}} \text{ detik} \quad (2.75)$$

Bila daya dipancarkan selama gangguan bekerja, kriteria sama luas diterapkan seperti terlihat dalam contoh soal gambar 2.17. Sebelum gangguan, daya dapat dipancarkan ialah  $P_{maks} \sin \delta$ .

Selama gangguan, daya tersebut adalah  $r_1 P_{maks} \sin \delta$ , sedangkan  $r_2 P_{maks} \sin \delta$  adalah daya yang dapat dipancarkan setelah gangguan tersebut diputuskan dengan saklar pada saluran pada saat  $\delta = \delta_c$ . Pemeriksaan gambar 2.17 menunjukkan bahwa  $\delta_c$  adalah pemutusan kritis.

Dengan menghitung luas  $A_1$  dan  $A_2$  akan didapatkan :

$$\cos \delta = \frac{(P_m / P_{maks}) (\delta_{maks} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{maks} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \quad (2.76)$$

Dimana harga  $r_1$  dan  $r_2$  dapat dinyatakan sebagai :

$$r_1 = \frac{X(\text{sebelum gangguan})}{X(\text{sesudah gangguan})}$$

$$r_2 = \frac{X(\text{saat gangguan})}{X(\text{sesudah gangguan})}$$

Besarnya daya yang dipancarkan selama adanya gangguan mempengaruhi nilai  $A_1$  untuk setiap sudut pemutusan yang diberikan. Jadi, makin kecil nilai  $r_1$  makin besar gangguan yang timbul pada sistem itu, karena nilai  $r_1$  yang kecil berarti bahwa daya yang dipancarkan selama gangguan adalah rendah dan bahwa  $A_1$  menjadi lebih luas.

## 2.5 Hubung Singkat

Studi hubung singkat atau studi gangguan bertujuan untuk :

1. Menentukan kapasitas alat pemutus daya berdasarkan besar arus hubung singkat maksimum yang mungkin timbul pada suatu titik (bus bar) dalam sistem bila terjadi hubung singkat atau gangguan.
2. Menentukan kelambatan waktu dari rele-rele yang menggerakkan alat-alat pemutus daya dalam koordinasi rele. Yang dimaksud dengan keterlambatan waktu ialah waktu terlama yang diizinkan, terhitung mulai saat terjadi gangguan, sebelum rele bekerja untuk menggerakkan alat pemutus daya. Waktu terlama ini dapat diperoleh dari studi stabilitas peralihan.
3. Menentukan arus dan tegangan minimum dan maksimum pada bagian-bagian atau titik-titik tertentu dari suatu sistem tenaga yang mungkin terjadi. Sehingga dapat ditentukan pola pengaman dan pemutus untuk mengamankan sistem dari keadaan abnormal dalam waktu seminimal mungkin.

Didalam menganalisa gangguan yang terjadi pada suatu sistem tenaga listrik akan menggunakan jala-jala urutan positif, urutan negatif dan urutan nol.

### 2.5.1 Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa Seimbang

Gangguan hubung singkat tiga fasa seimbang menyebabkan mengalirnya arus gangguan pada ketiga dasa tersebut. Arus-arus ini besarnya sama dan simetri sehingga mengalir hanya komponen positif saja. Keadaan sistem selama terjadi gangguan adalah sebagai berikut :

$$\bar{V}_a = \bar{I}_a \bar{Z}_f \quad (2.77a)$$

$$\bar{V}_b = \bar{I}_b \bar{Z}_f \quad (2.77b)$$

$$\bar{V}_c = \bar{I}_c \bar{Z}_f \quad (2.77c)$$

dalam bentuk matriks,

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_a \\ \bar{V}_b \\ \bar{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_f & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_f & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_a \\ \bar{I}_b \\ \bar{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.77d)$$

didapatkan pada  $Z_{012}$ ,



$$[Z_{012}] = [T]^{-1} \begin{bmatrix} \bar{Z}_f & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_f & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_f \end{bmatrix} [T] = \begin{bmatrix} \bar{Z}_f & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_f & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_f \end{bmatrix} \quad (2.78a)$$

selanjutnya akan menghasilkan,

$$V_0 = Z_f I_0 \quad (2.78b)$$

$$V_1 = Z_f I_1 \quad (2.78c)$$

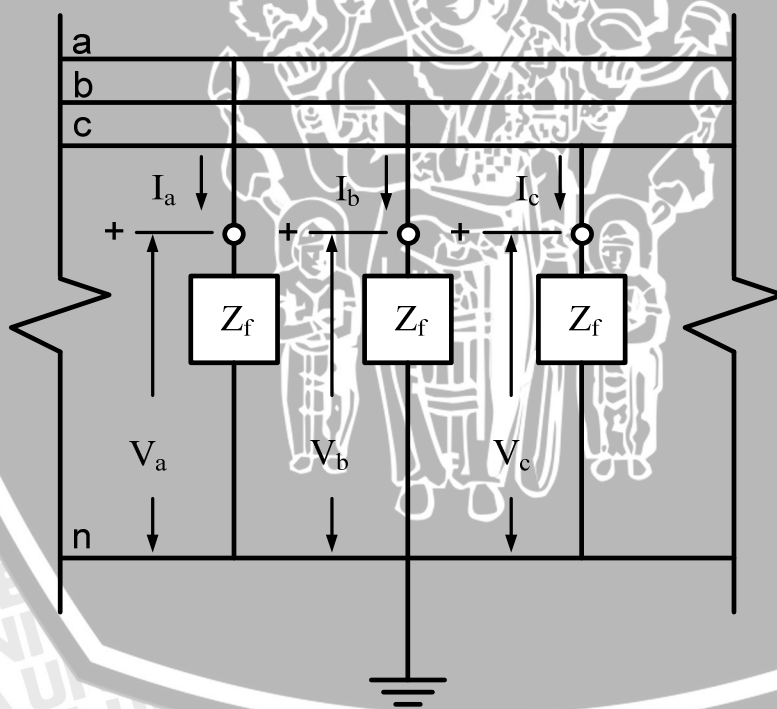
$$V_2 = Z_f I_2 \quad (2.78d)$$

$$I_a = I_b = I_c \quad (2.78e)$$

$$I_a = I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} = I_{a1} \quad (2.78f)$$

$$I_{a2} = I_{a0} = 0 \quad (2.78g)$$

Gambar 2.19 menunjukkan arus simetri yang mengalir pada ketiga fasa dengan notasi a, b dan c pada saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa seimbang.



Gambar 2.19 Gangguan hubung singkat tiga fasa seimbang

Sumber : Gross, 1979:267

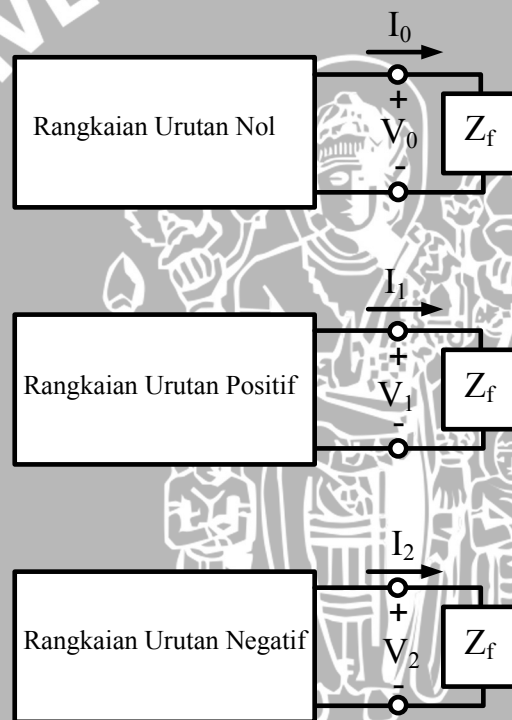
Persamaan di atas menunjukkan bahwa arus maupun tegangan pada keadaan gangguan tiga fasa tidak mengandung unsur urutan nol maupun impedansi negatif sehingga untuk gangguan tersebut  $Z_f = 0$  karena gangguan hanya dipengaruhi oleh  $Z_1$ . Dari gambar diperoleh bahwa :

$$I_0 = I_2 = 0 \tag{2.79a}$$

$$V_0 = V_2 = 0 \tag{2.79b}$$

$$I_a = \frac{V_a}{Z_1} \tag{2.79c}$$

Sedangkan untuk komponen urutan positif, negatif dan nol dari gangguan hubung singkat tiga fasa seimbang ditunjukkan pada gambar 2.20.



Gambar 2.20 Rangkaian pengganti gangguan hubung singkat tiga fasa seimbang  
 Sumber : Ibid, 268

### 2.5.5 Hubung Singkat Generator Sinkron Tanpa Beban

Pada mesin sinkron terdapat tiga macam reaktansi. Tahanan-tahanan biasanya diabaikan, kecuali dalam menentukan redaman atau konstanta waktu. Reaktansi-reaktansi tersebut adalah :

$X_d$  : reaktansi sinkron

$X_d'$  : reaktansi transien



$X_d''$  : reaktansi sub-transien

Sesuai dengan reaktansi-reaktansi di atas, maka arus-aruspun ada tiga macam :

$I$  : arus hubung singkat *steady state*, yaitu arus mantap setelah bagian transien hilang karena redaman.

$I'$  : arus hubung singkat transien, yaitu arus selama keadaan transisi, beberapa saat setelah gangguan terjadi.

$I''$  : arus sub-transien, yaitu arus maksimum pada saat terjadinya hubung singkat.

Untuk generator tanpa beban yang dihubungkan singkat, tegangan dalam (internal voltage) untuk ketiga keadaan (mantap, transien dan sub-transien) adalah sama, yaitu  $E$  adalah :

$$E'' = E' = E \quad (2.80)$$

maka arus-arusnya adalah :

$$I = \frac{E}{X} \quad \text{A} \quad (2.81a)$$

$$I' = \frac{E}{X'} \quad \text{A} \quad (2.81b)$$

$$I'' = \frac{E}{X''} \quad \text{A} \quad (2.81c)$$

Bila hubung singkat tiga fasa itu dilakukan dalam keadaan tanpa beban, maka besar arus hubung singkat maksimum itu dapat ditulis sebagai berikut :

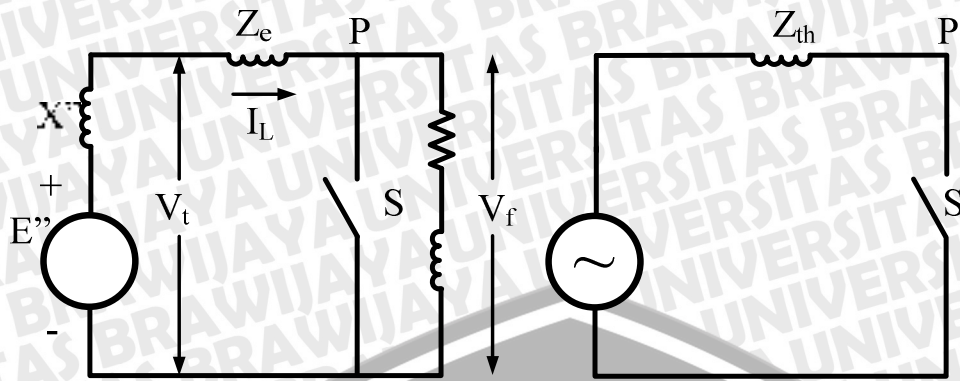
$$I_{maks} = \sqrt{\left(\frac{E}{X''}\right)^2 + \left(\sqrt{2} \frac{E}{X''}\right)^2} \quad \text{A} \quad (2.82a)$$

$$I_{maks} = \sqrt{3} \frac{E}{X''} = 1,732 \frac{E}{X''} \quad \text{A} \quad (2.82b)$$

## 2.5.6 Hubung Singkat Generator Sinkron Dalam Keadaan Berbeban

### 2.5.6.1 Beban $Z_L$

Gambar 2.27 menunjukkan rangkaian ekivalen generator yang mempunyai beban tiga fasa seimbang. Impedansi luar terlihat diantara terminal generator dan titik P sebelum terjadinya gangguan  $I_L$ , tegangan pada gangguan adalah  $V_f$ , dan tegangan terminal generator adalah  $V_t$ .



Gambar 2.27 Hubung singkat generator sinkron dalam keadaan berbeban

Sumber : Hutahuruk, 1984:139

$V_f$  = tegangan pada titik hubung singkat sebelum hubung singkat terjadi

Dalam gambar di atas diberikan sebuah generator sinkron dengan beban  $Z_L$ . Arus sebelum hubung singkat adalah arus beban  $I_L$ . Setelah terjadi hubung singkat, maka arus subtransien  $I''$  :

$$I'' = \frac{V_f}{Z_{th}} = \frac{V_f (Z_L + Z_e + jX'')}{Z_L (Z_e + jX'')} \quad (2.83a)$$

$$I'' = \frac{E''}{Z_e + jX''} \quad (2.83b)$$

Karena  $I_L = \frac{V_f}{Z_L}$

$$E'' = I_L (Z_L + Z_e + jX'') \quad (2.83c)$$

Dan karena  $V_t = I_L (Z_e + Z_L)$ , maka :

$$E'' = V_t + jI_L X' \quad (2.83d)$$

sebanding dengan

$$E' = V_t + jI_L X' \quad (2.83e)$$

Arus total generator =  $I'' + I_L$  (sub transien)

$$= I' + I_L \text{ (transien)}$$

dimana :

$$I'' = \frac{V_t + jI_L X'}{Z_e + jX''} \text{ A} \quad (2.84)$$

dan



$$I' = \frac{V_t + jI_L X'}{Z_e + jX'} \text{ A} \quad (2.85)$$

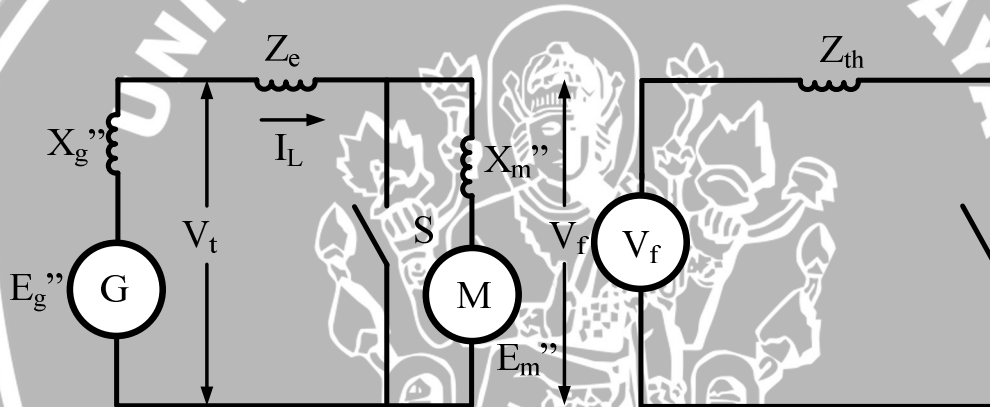
### 2.5.6.2 Beban Motor Sinkron

Rangkaian hubung singkat generator sinkron dengan beban motor sinkron terlihat pada gambar 2.28 dimana tegangan generator  $E_G'$  yang terhubung seri dengan  $X_G'$ , arus yang mengalir yaitu  $I_L$ . sedangkan  $V_f$  adalah tegangan pada titik hubung singkat sebelum hubung singkat terjadi. Dari gambar rangkaian tersebut didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$Z_{th} = \frac{jX_M''(Z_e + jX_g'')}{Z_e + j(X_g'' + X_M'')} \quad (2.86a)$$

$$E_g'' = V_t + jI_L X_g'' \quad (2.86b)$$

$$E_M'' = V_t - I_L(Z_e + jX_M'') \quad (2.86c)$$



Gambar 2.28 Hubung singkat generator sinkron dengan motor sinkron

Sumber : ibid, 141

Arus total generator :

$$I_g'' + I_L = \frac{E_g''}{Z_e + jX_g''} + I_L \text{ A} \quad (2.87)$$

Arus total motor :

$$I_M'' - I_L = \frac{E_M''}{X_M''} - I_L \text{ A} \quad (2.88)$$

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan mempelajari buku-buku literatur maupun dari situs internet tentang kestabilan sistem listrik dan segala hal yang menunjang dalam penyusunan skripsi ini.

### 3.2 Survei Lapangan

Kegiatan survei lapangan ini dilakukan sebagai pengenalan awal dan pengamatan terhadap objek yang akan dijadikan bahan kajian.

### 3.3 Pengambilan Data

Pengambilan data diperoleh dari Departemen Pemeliharaan Listrik Pabrik III PT. Petrokimia Gresik dan dengan melakukan observasi ke tiap-tiap unit *bus* yang ada di lapangan.

Adapun data-data yang diperlukan antara lain :

- a. Reaktansi peralihan generator
- b. Reaktansi transformator
- c. Impedansi Saluran
- d. Impedansi beban
- e. Konstanta inersia generator
- f. Diagram satu garis

### 3.4 Analisis dan Pembahasan

Setelah data terkumpul, maka dianalisis sesuai dengan teori-teori dan literatur. Analisis kestabilan peralihan masing-masing generator turbin uap di pabrik III PT. Petrokimia Gresik saat ini mengacu pada rumusan masalah yang meliputi :

- a. Pengolahan data antara lain reaktansi generator, saluran, transformator dan impedansi beban untuk dirubah dalam nilai per unit dengan dasar generator TG-66 yaitu 14,375 MVA.
- b. Analisis reaktansi ekuivalen meliputi reaktansi sebelum, saat dan sesudah gangguan terjadi. Data-data reaktansi yang diperoleh akan dibuat rangkaian ekuivalen yang mengacu pada diagram segaris dan menghitung reaktansi ekuivalen



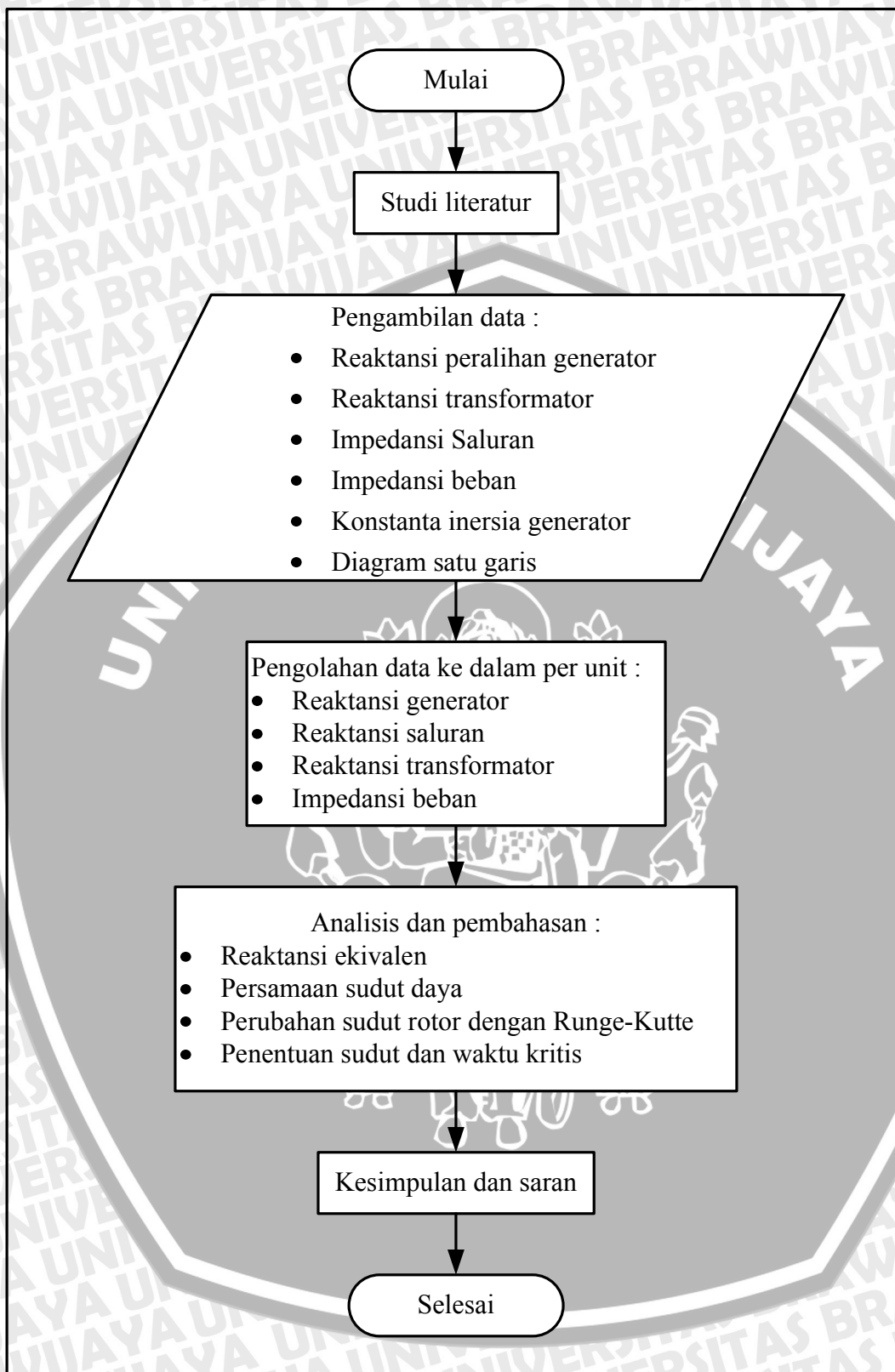
$Z_{th}$ . Setelah itu dengan cara yang sama  $Z_{th}$  saat dan sesudah gangguan dapat diperoleh.

- c. Analisis persamaan sudut daya sehingga didapatkan karakteristik sudut daya sebelum, saat dan sesudah gangguan. Dalam menganalisis persamaan sudut daya diperlukan menghitung tegangan dalam peralihan generator. Setelah itu didapat besar tegangan dalam peralihan generator, maka akan digunakan untuk menentukan persamaan sudut daya sebelum, selama dan sesudah gangguan. Selain itu juga akan ditentukan sudut daya awal  $\delta_0$  dan sudut daya maksimum  $\delta_{maks}$ .
- d. Analisis perubahan sudut rotor menggunakan metode *Runge-Kutte* dengan nilai-nilai awal diketahui dari data generator dan analisis sebelumnya. Adapun variabel-variabel yang digunakan adalah  $\Delta t$ ,  $\omega_s$ ,  $\omega_0$ ,  $H$  (konstanta inersia turbin) dan  $\delta_0$ . variabel-variabel tersebut akan dihitung dengan menggunakan metode *Runge-Kutte* pada  $t = 0,05$  detik,  $t = 0,1$  detik dan seterusnya. Keluaran yang didapat setelah perhitungan adalah perubahan sudut daya  $\delta$  dan kecepatan sudut  $\omega$ . Perubahan ini akan ditabelkan sampai  $t = 1$  detik dan digambar grafik ayunan masing-masing generator akibat gangguan.
- e. Analisis penentuan sudut kritis dan waktu pemutusan kritis. Sudut kritis dapat ditentukan menggunakan variabel-variabel pada keluaran hasil analisis persamaan sudut daya yaitu  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $\delta_0$  dan  $\delta_{maks}$ . Kemudian variabel-variabel tersebut digunakan ke dalam persamaan kriteria sama luas sehingga menghasilkan sudut pemutusan kritis. Untuk mengetahui waktu pemutusan kritis, maka akan dihitung dengan persamaan  $t_c$ .

### 3.5 Penutup

Dalam bagian penutup ini akan dilakukan pengambilan kesimpulan dari hasil analisis teknis sehingga dapat diketahui seberapa jauh ayunan generator terhadap hubung singkat yang terjadi dan waktu pemutusan kritis agar sistem tetap stabil.

Metodologi penelitian dalam skripsi ini dapat digambarkan pada *flowchart* seperti di bawah ini :



Gambar 9.1 Flowchart metodologi penelitian  
 Sumber : Penulis



## BAB IV

### SISTEM KELISTRIKAN PABRIK III PT. PETROKIMIA GRESIK

#### 4.1 Umum

PT. Petrokimia Gresik merupakan perusahaan BUMN dibawah koordinasi Departemen Perindustrian yang berdiri tahun 1960, berdasarkan TAP MPRS No. II/MPRS/1960 dan KEPPRES No.260/1960 yang merupakan proyek prioritas dengan nama PROYEK PETROKIMIA SURABAYA. Sesuai dengan INPRES No.1/1963, maka pada pengembangannya tahun 1964 PT. Petrokimia diborong oleh kontaktor CONSIDIT SpA dari Italia. Namun keberadaan Petrokimia ini sempat terhenti pada tahun 1968 akibat krisis ekonomi yang melanda Indonesia.

PT. Petrokimia Gresik ini diresmikan pada tanggal 10 Juli 1972 oleh presiden Soeharto dengan bentuk badan usaha Perusahaan Umum, dimana produk utamanya dipasarkan oleh PT. PUSRI Palembang dan pada tahun 1975 berubah menjadi Persero dengan nama PT. Petrokimia Gresik (Persero). Pada tahun 1997, setelah *holding* dengan PT. Pupuk Sriwijaya, maka perusahaan PT. Petrokimia Gresik tidak berbentuk Persero lagi. PT. Petrokimia Gresik.

Wilayah pabrik di PT. Petrokimia Gresik dibagi menjadi tiga, yaitu pabrik I, pabrik II dan pabrik III. Ketiga unit tersebut memiliki tugas yang berbeda dalam proses produksinya. Adapun unit produksinya adalah sebagai berikut :

- Unit Produksi I

Unit ini terdiri dari tiga pabrik pupuk ZA dan satu pabrik pupuk Urea, dengan kapasitas produksi 650.000 ton / thn.

1. Pabrik ZA I beroperasi tahun 1972 dengan kapasitas produksi 200.000 ton / thn.

Menggunakan bahan baku ammonia dan asam sulfat

2. Pabrik ZA III beroperasi tahun 1986 dengan kapasitas produksi 200.000 ton / thn.

Menggunakan bahan baku ammonia dan asam sulfat

3. Pabrik Urea beroperasi tahun 1994 dengan kapasitas produksi 460.000 ton / thn.

Selain produk utama di atas, juga menghasilkan produk samping untuk dijual, yaitu :

1. Ammonia dengan kapasitas produksi 415.000 ton / thn. Amonia digunakan untuk bahan baku pembuatan pupuk ZA dan Urea.

2. CO<sub>2</sub> cair dengan kapasitas produksi 23.200 ton / thn

3. Nitrogen gas dengan kapasitas produksi 6.500.000 NM<sup>3</sup>/thn

4. Nitrogen cair dengan kapasitas 8000 ton / thn
  5. Oksigen gas dengan kapasitas produksi 5.000.000 NM<sup>3</sup>/thn
  6. Oksigen cair dengan kapasitas produksi 7500 ton/thn
- Unit Produksi II (Unit Produksi Fosfat)  
Terdiri dari 2 pabrik pupuk fosfat :
    1. Pabrik pupuk fosfat I beroperasi tahun 1979. Kapasitas produksi sebesar 600.000 ton/thn. Pupuk TSP/SP-36 atau bervariasi produk, sebagai berikut :
      - a. Pupuk TSP/SP-36 dengan kapasitas produksi 400.000 ton/thn
      - b. Pupuk DAP dengan kapasitas produksi 80.000 ton/thn
      - c. Pupuk NPK dengan kapasitas produksi 50.000 ton/thn
    2. Pabrik pupuk fosfat II beroperasi tahun 1983
      - a. Pupuk TSP/ SP-36 dengan kapasitas produksi 600.000 ton/thn
    3. Pabrik Pupuk Phonska  
Kapasitas produksi pupuk NPK dengan berbagai formula sebesar 300.000 ton/thn
  - Unit Produksi III (Unit Produksi Asam Fosfat)  
Unit ini beroperasi sejak 1984, terdiri dari lima pabrik :
    1. Asam fosfat, kapasitas produksi 170.000 ton/thn, dipakai untuk pembuatan pupuk SP-36, TSP, NPK dan DAP.
    2. Asam Sulfat, kapasitas produksi 700.000 ton/thn, dipakai untuk bahan baku pembuatan pupuk (ZA, SP-36), gypsum, asam fosfat
    3. Cement Retarder, kapasitas produksi 440.000 ton/thn, dipakai untuk industri semen sebagai bahan penolong untuk pengatur kekerasan
    4. Aluminium Florida, kapasitas produksi 12.600 ton/thn, dipakai sebagai bahan untuk menurunkan titik lebur pada industri peleburan aluminium.
    5. Pabrik Za II beroperasi tahun 1984 dengan kapasitas produksi sebesar 250.000 ton/thn. Menggunakan bahan baku gypsum, ammonia dan CO<sub>2</sub> yang merupakan produksi PT. Petrokimia Gresik.

Unit Prasarana yang dimiliki oleh PT. Petrokimia Gresik adalah sebagai berikut :

1. Dermaga Khusus
  - a. Kapasitas bongkar muat 3 juta ton/thn
  - b. Kapasitas sandar 8 kapal sekaligus, terdiri dari :
    - 1) Tiga kapal bobot 40.000 – 60.000 DWT (sisi laut)
    - 2) Lima kapal bobot 10.000 DWT (sisi darat)



- c. Fasilitas bongkar muat, terdiri dari :
  - 1) Dua *crane* bongkar muat
  - 2) Satu *crane* bermuatan serba guna
  - 3) Dua ban berjalan bongkar bahan baku
  - 4) Ban berjalan bermuatan produk kantong
  - 5) Fasilitas perpipaan untuk mengangkut bahan cair.
2. Unit Penjernihan air
  - a. Di Gunung Sari Surabaya, dari Sungai Brantas dikirim ke Gresik menggunakan pipa sepanjang 22 km, dengan kapasitas 720 m<sup>3</sup>/jam.
  - b. Di Babat, dari sungai Bengawan Solo ke Gresik sepanjang 60 km, dengan kapasitas 1.500 m<sup>3</sup>/jam.
3. Sarana Jalan Kereta Api

Sarana ini berupa jalan kereta api yang dihubungkan dengan jalan utama PERUMKA, digunakan untuk pengangkutan pupuk dari gudang PT. Petrokimia Gresik ke stasiun terdekat dengan konsumen.
4. Ban berjalan

Ban berjalan merupakan prasarana penunjang transportasi bahan baku dan hasil produksi, dimana terdapat ban berjalan (*Belt Conveyor*) yang menghubungkan dermaga dengan pabrik – pabrik di unit I, II, dan III dengan total panjang bentangan sekitar 25 km.
5. Unit Industri Peralatan Pabrik

Unit ini untuk menunjang pemeliharaan pabrik yang telah ada dan dapat digunakan untuk fabrikasi peralatan pabrik dan permesinan atas pesanan perusahaan lain.
6. Pembangkit Tenaga Listrik

Induk perusahaan mempunyai dua unit pembangkit tenaga listrik dengan kapasitas 20 MW menggunakan tenaga uap dan 33 MW menggunakan tenaga gas. Sedangkan untuk unit produksi, pupuk fosfat, anak perusahaan, perumahan, SOR, masjid dan rumah sakit dari PLN.

Dalam menjalankan proses produksi dan keperluan utilitas, PT. Petrokima Gresik menggunakan energi listrik. Pada awalnya, PLN dipercaya sebagai pemasok utama kebutuhan energi listrik. Namun seiring dengan berkembangnya beban listrik dan suplai PLN yang kurang handal, PT. Petrokimia Gresik menyediakan pembangkit sendiri yaitu *gas*

turbine generator (GTG), steam turbine generator (STG), dan beberapa Diesel Generator sebagai suplai cadangan saat pembangkit utama mengalami kegagalan.

Area operasi GTG adalah keseluruhan pabrik I dan sebagian pabrik II, sedangkan sebagian pabrik II yang lain dipasok oleh PLN dan STG memasok pabrik III keseluruhan.

#### 4.2 Sistem Pembangkitan

Sistem pembangkitan tenaga listrik di pabrik III dihasilkan dari dua *turbo generator* (TG 65 dan TG 66) untuk operasi normalnya dan dua *emergency generator* (EG 65 dan EG 66) untuk operasi darurat atau bila salah satu dari turbo generator tidak bisa dioperasikan. Sedangkan data teknis dari keempat generator adalah sebagai berikut :

##### I. TG 65 ( Back Pressure Steam Turbine)

Type	: <i>Horizontal Totally Enclosed Water Cooled, Salient Rotor, Rotating Field Brushless Type Synchronous Generator</i>
Power Output	: 10.625 KVA (8.500 KW)
Voltage	: 6 KV
Power Factor	: 0,8
Phase	: 3
Speed	: 3000 rpm
Frequency	: 50 Hz
Pole(s)	: 2
Cooling System	: <i>Self Ventilated, Closed Air Circuit with Water Air Cooler</i>
Excitation	: <i>Brushless AC Exciter System</i>
Inlet Steam Con.	: 34,5 Kg/cm <sup>2</sup>
Temperature	: 390°C

##### II. TG 66 (Condensing Steam Turbine)

Type	: <i>Horizontal Totally Enclosed Water Cooled, Salient Rotor, Rotating Field Brushless Type Synchronous Generator</i>
Power Output	: 10.625 KVA (8.500 KW)
Voltage	: 6 KV
Power Factor	: 0,8
Phase	: 3
Speed	: 3000 rpm



Frequency : 50 Hz  
 Pole(s) : 2  
 Cooling System : *Self Ventilated, Closed Air Circuit with Water Air Cooler*  
 Excitation : *Brushless AC Exciter System*  
 Inlet Steam Con. : 10 Kg/cm<sup>2</sup>  
 Temperature : 270°C

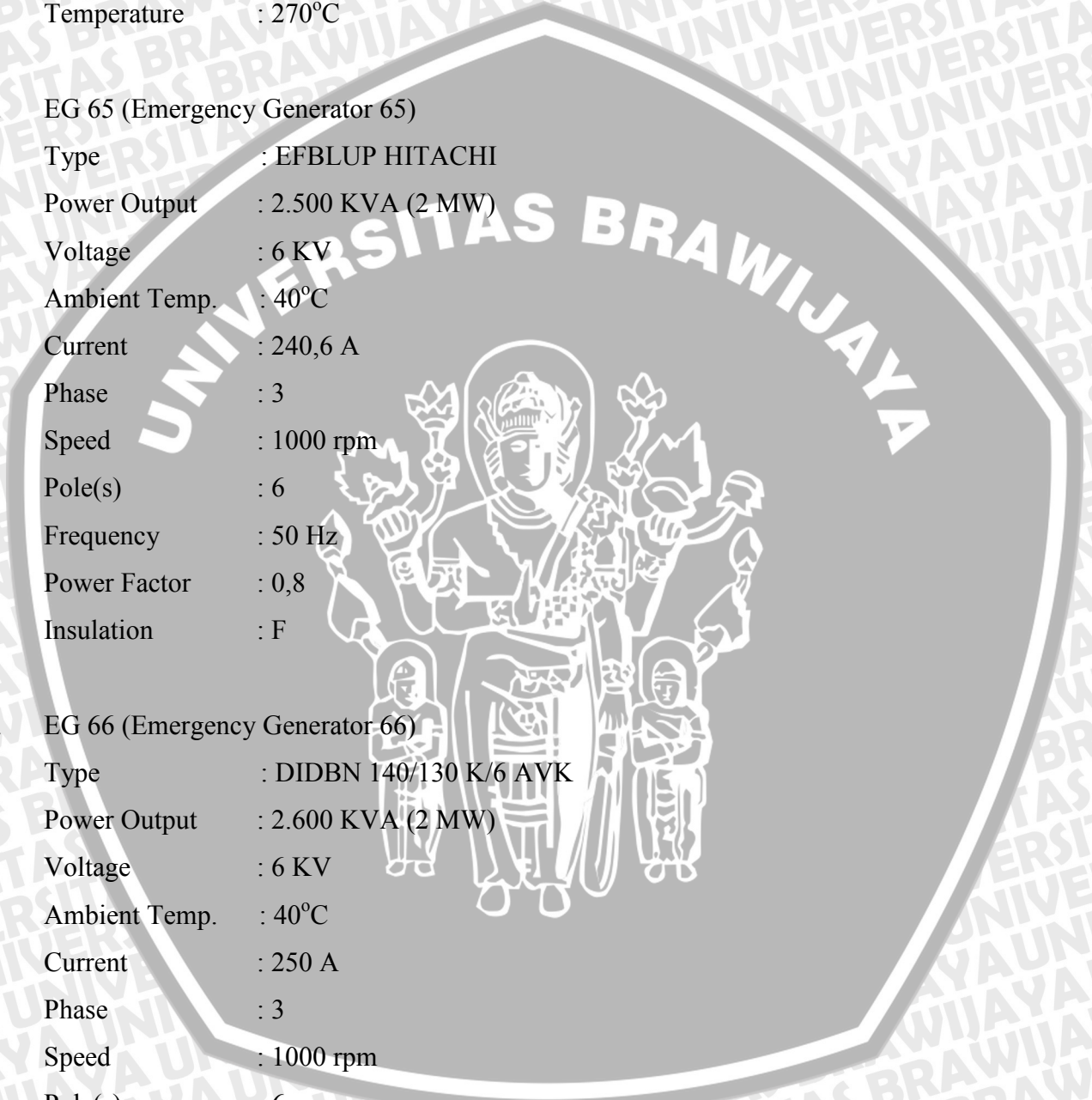
III. EG 65 (Emergency Generator 65)

Type : EFBLUP HITACHI  
 Power Output : 2.500 KVA (2 MW)  
 Voltage : 6 KV  
 Ambient Temp. : 40°C  
 Current : 240,6 A  
 Phase : 3  
 Speed : 1000 rpm  
 Pole(s) : 6  
 Frequency : 50 Hz  
 Power Factor : 0,8  
 Insulation : F

IV. EG 66 (Emergency Generator 66)

Type : DIDBN 140/130 K/6 AVK  
 Power Output : 2.600 KVA (2 MW)  
 Voltage : 6 KV  
 Ambient Temp. : 40°C  
 Current : 250 A  
 Phase : 3  
 Speed : 1000 rpm  
 Pole(s) : 6  
 Frequency : 50 Hz  
 Power Factor : 0,8  
 Insulation : F

Sumber : Departemen Pemeliharaan Listrik Pabrik III PT. Petrokimia Gresik



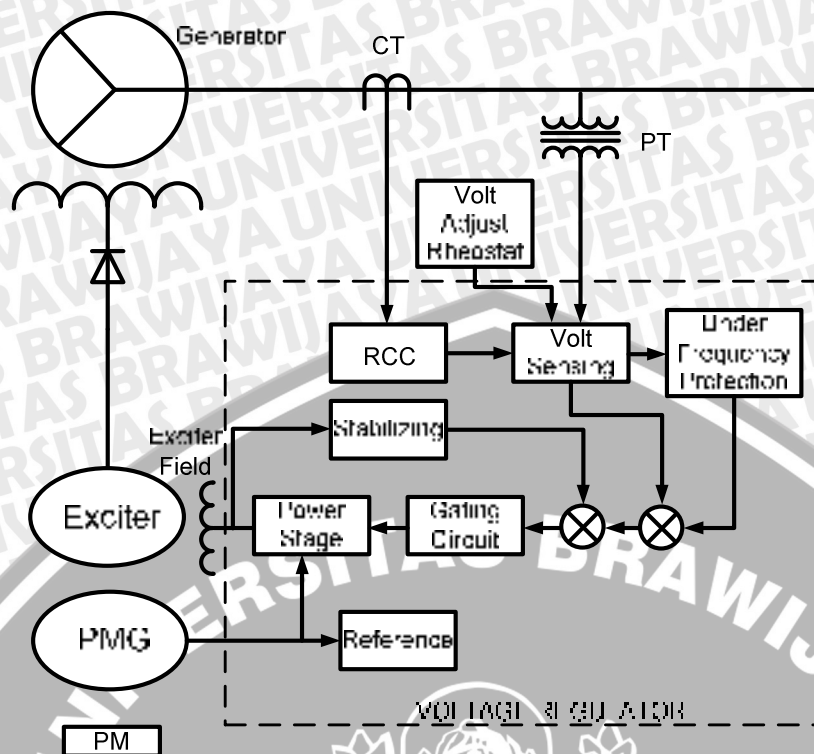
Jenis generator dengan sistem eksitasi tanpa sikat mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan dengan generator yang menggunakan *slip ring* untuk mensuplai daya eksitasi pada rotor. Dengan cara ini tegangan dan arus jangkar tidak diambil melalui cincin geser dan sikat, sehingga daya yang besar dengan tegangan dan arus tinggi dapat disalurkan dengan mudah tanpa sikat. Adapun keuntungan penggunaan generator tanpa sikat adalah :

1. Pemeliharaan maupun pemeriksaan (maintenance and inspection) akan lebih mudah.
2. Kehandalan daya tahan terhadap *corrosive* maupun untuk daerah explosive gas akan bertambah lebih baik karena tidak terdapat percikan-percikan bunga api.
3. Kehandalan dan keamanan dari sistem suplai eksitasinya akan lebih baik karena rugi-rugi jauh berkurang.

Blok diagram dari eksitasi tanpa sikat tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah. Prinsip dasar dari timbulnya tegangan suatu generator adalah karena terpotongnya kumparan stator oleh medan magnet yang ditimbulkan oleh arus eksitasi pada kumparan rotor. Agar tegangan keluaran generator stabil, diperlukan pengontrol atau pengatur tegangan otomatis menggunakan AVR (Automatic Voltage Regulator). AVR mengatur besarnya arus eksitasi agar tegangan yang timbul di stator bisa diambil besarnya.

Pembangkitan awal dimulai dari magnet permanen (PM) yang ikut berputar pada saat turbin digerakkan oleh uap, karena PM dan rotor terhubung dalam satu poros. Medan magnet yang memotong kumparan stator PMG (Permanent Magnet Generator) akan menimbulkan tegangan AC. Tegangan ini yang dijadikan input AVR untuk dirubah menjadi tegangan DC. *Output* DC inilah yang dipakai sebagai eksitasi bagi *brushless exciter*. *Output brushless exciter* yang berupa tegangan AC kemudian disearahkan dan dijadikan eksitasi bagi generator utama. Penyearah eksitasi utama ini berupa rangkaian diode yang terdapat pada rotor dan ikut berputar, sehingga tidak diperlukan adanya cincin geser.





Gambar 3.1 Blok diagram brushless AC generator

Sumber : Departemen Pemeliharaan Listrik Pabrik III PT. Petrokimia Gresik

### 4.3 Sistem Distribusi Beban

Daya dari generator disalurkan ke bus HVS-65 untuk selanjutnya dibagi menjadi 8 saluran. Adapun kedelapan saluran tersebut adalah beban-beban yang terdiri dari

- Unit *Sulphuric Acid* (pabrik asam sulfat)
- Unit *Phospat Acid* (asam fosfat)
- Unit *Ammonium Sulphate* (amonium sulfat)
- Unit *Cement Retarder*
- Utilitas pabrik III
- Unit CT
- Power Gent. SS1
- (MCC3101-12) dan (MCC3113-26)
- HVS-6508

Pengaturan distribusi beban pada tiap-tiap unit dilakukan pada bus masing-masing. Beban terbesar adalah beban jenis motor induksi baik tiga fasa. Untuk motor induksi tegangan medium (6 KV) langsung disuplai dari bus 6 KV pada masing-masing unit. Sedangkan motor induksi tegangan rendah (0,38 KV) disuplai dari trafo penurun tegangan 6KV/0,38KV sebelum masuk ke beban.

Beban yang lain selain motor induksi adalah utilitas yang digunakan untuk keperluan penerangan kantor, pelabuhan, dan lainnya. Total keseluruhan pembangkitan adalah hampir mendekati 19,5 MW.



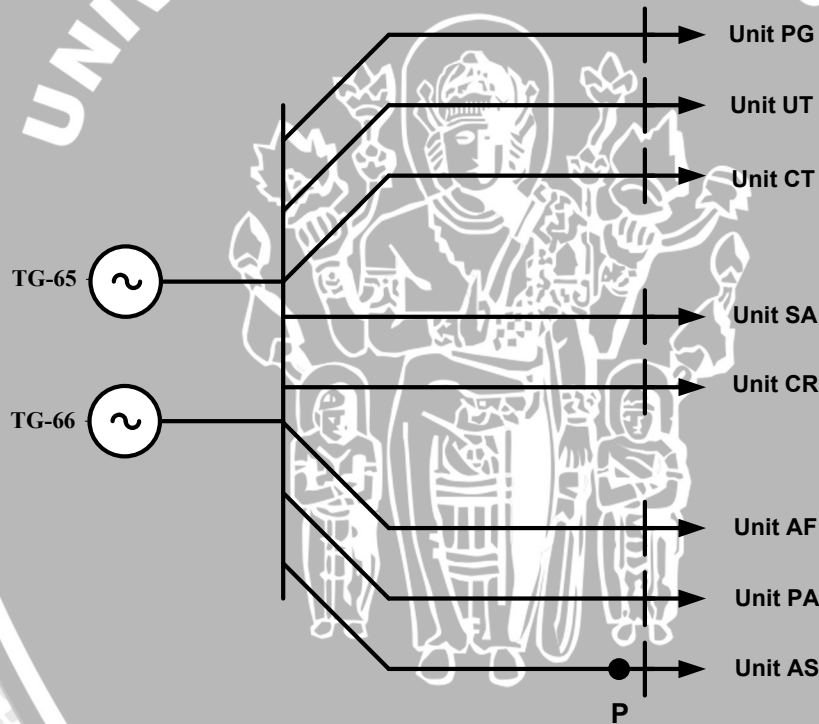


BAB V

ANALISIS KESTABILAN PERALIHAN GENERATOR TURBIN UAP TERHADAP HUBUNG SINGKAT DI PABRIK III PT. PETROKIMIA GRESIK

1.7 Pengolahan Data

Pengolahan data meliputi pengolahan data transformator, data saluran dan data beban, dalam hal ini akan mengubah nilai sebenarnya sehingga didapat nilai per unit dengan menggunakan dasar nilai dasar yang sama. Perhitungan mengenai nilai dasar menggunakan teraan generator TG-66 sebagai dasar yaitu  $MVA_{dasar} = 14,375 \text{ MVA}$  dan  $KV_{dasar} = 6 \text{ KV}$ . Gambar 5.1 menunjukkan diagram satu garis yang akan digunakan pada analisis dan gangguan terjadi pada titik P.



Gambar 5.1 Diagram satu garis sistem kelistrikan pabrik III PT. Petrokimia Gresik  
 Sumber : Departemen Pemeliharaan Pabrik III PT. Petrokimia Gresik

5.1.1. Pengolahan Data Generator

Harga impedansi generator dalam per unit dapat dikonversi dengan persamaan 5.1 di bawah ini (Stevenson, 1996:32):

$$X_{(pu)} = X_{lama} \left[ \frac{KV_{lama} \text{ dasar}}{KV_{baru} \text{ dasar}} \right]^2 \left[ \frac{MVA_{baru} \text{ dasar}}{MVA_{lama} \text{ dasar}} \right] \tag{5.1}$$



Misalnya pada Generator TG-65

$$X_{(pu)} = j0,241 \cdot \left[ \frac{6}{6} \right]^2 \cdot \left[ \frac{14,375}{10,625} \right] = j0,326 \text{ per unit}$$

Dengan menggunakan cara yang sama berlaku untuk generator lainnya lainnya, maka dapat dibuat tabel impedansi masing-masing generator dengan menggunakan nilai dasar generator yang telah ditentukan di atas seperti pada tabel 5.1.

Tabel 5.1  
Reaktansi Generator

NO	GENERATOR	REAKTANSI (PU)	REAKTANSI BARU(PU)
1	TG-65	j0,241	j0,326
2	TG-66	j0,231	j0,231

### 5.1.2. Pengolahan Data Saluran

Untuk mengubah data saluran dari nilai data sebenarnya ke dalam satuan per unit menggunakan persamaan 5.2 yaitu :

$$X_{(pu)} = \frac{X_{sebenarnya}}{X_{dasar}} \tag{5.2}$$

dimana nilai dasar didapat dari persamaan :

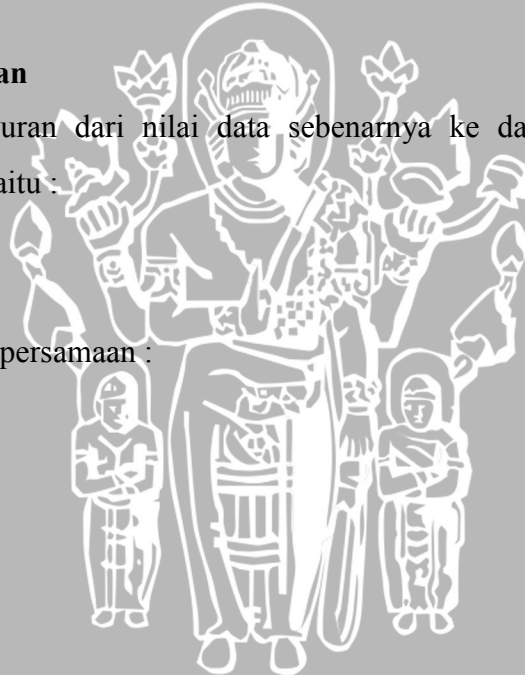
$$X_{dasar} = \frac{(KV_{dasar})^2}{MVA_{dasar}}$$

sehingga

$$Z_{dasar} = \frac{(6)^2}{14,375}$$

$$Z_{(pu)} = 2,504347826 \text{ ohm}$$

Dengan cara yang sama dapat digunakan untuk mengubah nilai satuan untuk data saluran yang lain sehingga didapat data seperti pada tabel 5.2.





Tabel 5.2  
Impedansi Saluran

NO	SALURAN	REAKTANSI (OHM)	REAKTANSI (PU)
1	Terminal generator – Unit PG	j 0,04185	j 0,059306113
2	Terminal generator – Unit UT	j 0,4158	j 0,166021181
3	Terminal generator – Unit CT	j 0,5346	j 0,213529994
4	Terminal generator – Unit SA	j 0,024	j 0,009686662
5	Terminal generator – Unit CR	j 0,5346	j 0,213529947
6	Terminal generator – Unit AF	j 0,4955	j 0,197924662
7	Terminal generator – Unit PA	j 0,0837	j 0,033433483
8	Terminal generator – Unit AS	j 1,116	j 0,445778505

### 5.1.3. Pengolahan Data Beban

Nilai impedansi dari beban akan diubah menjadi nilai dalam per unit dengan persamaan berikut :

$$X_{(pu)} = \frac{X_{sebenarnya}}{X_{dasar}}$$

dimana nilai dasar didapat dari persamaan :

$$Z_{dasar} = \frac{(KV)^2}{MVA}$$

sebagai contoh beban pada unit PG dengan diketahui data sebagai berikut :

$$P = 0,77 \text{ MW}$$

$$I = 98 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = 0,81$$

Sesuai dengan persamaan :

$$P = |I|^2 \cdot |Z| \cdot \cos \varphi$$

Maka sesuai dengan memasukkan data P, I dan  $\cos \varphi$ , maka dapat diketahui

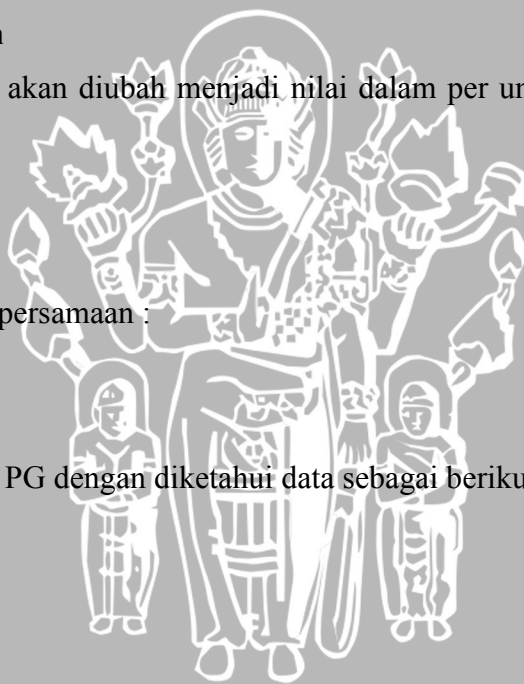
$$Z = 98,9813915 \text{ ohm}$$

dengan membagi nilai Z dengan  $Z_{dasar} = 2,504347826 \text{ ohm}$  maka Z dalam satuan per unit adalah :

$$Z = 39,52381952 \angle 35,90406^\circ \text{ per unit}$$

$$= 32,01429728 + j23,1779438 \text{ per unit}$$

jadi



$$X_{pu} = 23,1779438 \text{ per unit}$$

Impedansi-impedansi beban pada bus bar yang lain didapat dengan cara yang sama sehingga mendapatkan data pada tabel 5.3.

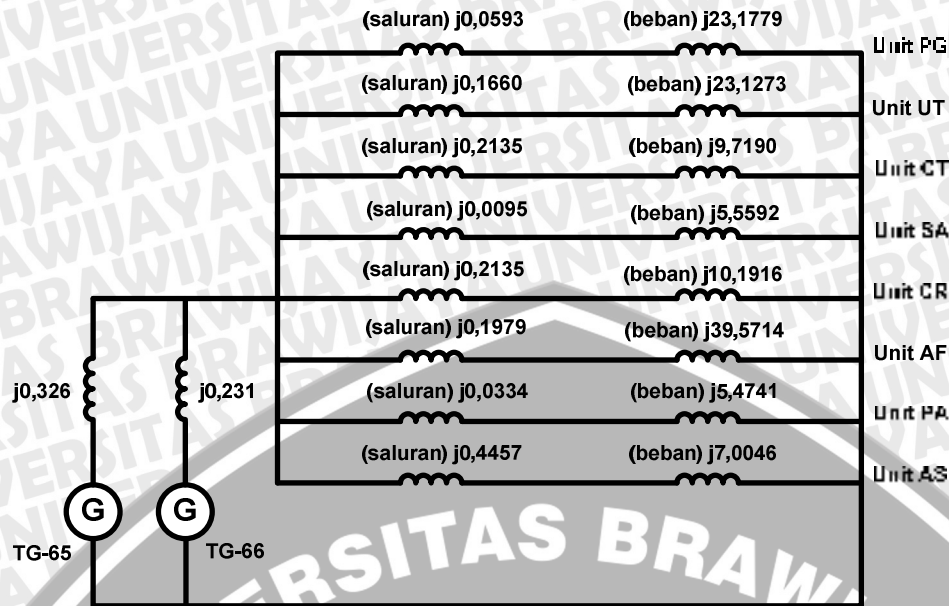
Tabel 5.3  
Impedansi beban

NO	UNIT	Z (OHM)	X(PU)
1	PG	98,9813915	j 23,1779438
2	UT	98,7654321	j 23,1273737
3	CT	41,4909651	j 9,71909239
4	SA	23,7325625	j 5,55925770
5	CR	43,5081490	j 10,1916096
6	AF	168,931258	j 39,5714707
7	PA	23,3693220	j 5,47417009
8	AS	29,9030287	j 7,00466471

### 1.8 Rangkaian Ekuivalen Sistem

Rangkaian ekuivalen dari sistem pabrik III PT. Petrokimia Gresik yang ditunjukkan pada diagram saluran tunggal dapat digambarkan dalam rangkaian reaktansinya pada gambar 5.2 (nilai reaktansi dalam pu). Gambar rangkaian sistem tersebut akan digunakan untuk mendapatkan reaktansi pada saat sebelum gangguan, selama gangguan dan sesudah gangguan sehingga akan diketahui persamaan sudut daya dari ketiga keadaan tersebut.





Gambar 5.2 Rangkaian ekivalen sistem kelistrikan pabrik III PT. Petrokimia Gresik  
 Sumber : hasil perhitungan

Reaktansi ekivalen dari sistem kelistrikan sebelum gangguan, selama gangguan akan dibahas pada sub bab berikut ini.

### 5.2.1. Reaktansi Ekivalen Sebelum Gangguan

Dengan menyederhanakan gambar 4.1 maka :

$$\begin{aligned}
 X_{unit\ PG} &= \text{Saluran unit PG} + \text{beban PG} \\
 &= j0,0593 + j23,1779 \\
 &= j23,2372 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

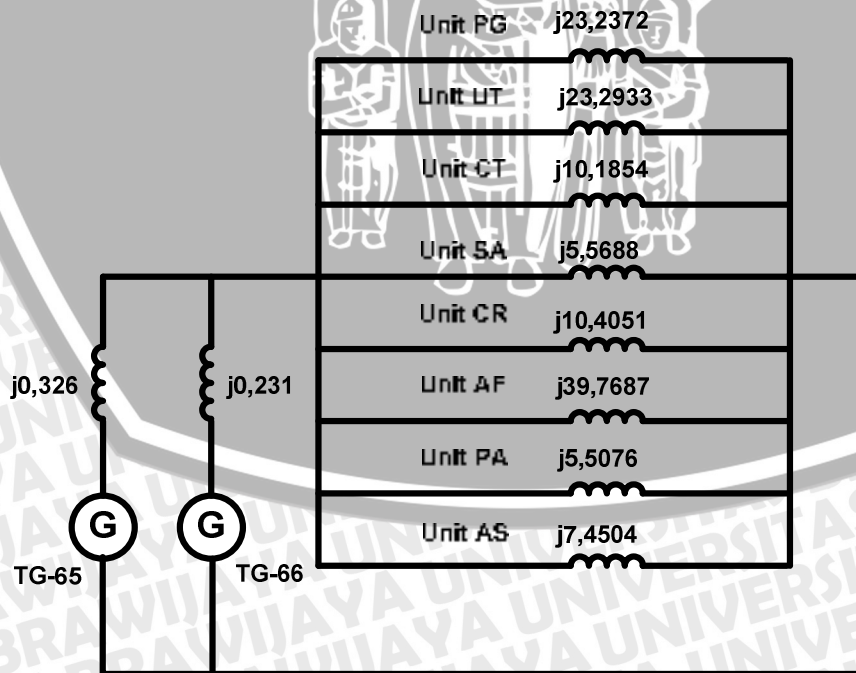
$$\begin{aligned}
 X_{unit\ UT} &= \text{Saluran unit UT} + \text{beban UT} \\
 &= j0,1660 + j23,1273 \\
 &= j23,2933 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_{unit\ CT} &= \text{Saluran unit CT} + \text{beban CT} \\
 &= j0,2135 + j9,7190 \\
 &= j10,1854 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 X_{unit\ SA} &= \text{Saluran unit SA} + \text{beban SA} \\
 &= j0,0095 + j5,5592
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= j5,5688 \text{ pu} \\
 X_{unit CR} &= \text{Saluran unit CR} + \text{beban CR} \\
 &= j0,2135 + j10,1916 \\
 &= j10,4051 \text{ pu} \\
 X_{unit AF} &= \text{Saluran unit AF} + \text{beban AF} \\
 &= j0,1979 + j39,5714 \\
 &= j39,7687 \text{ pu} \\
 X_{unit PA} &= \text{Saluran unit PA} + \text{beban SA} \\
 &= j0,0334 + j5,4741 \\
 &= j5,5076 \text{ pu} \\
 X_{unit AS} &= \text{Saluran unit AS} + \text{beban AS} \\
 &= j0,4457 + j7,0046 \\
 &= j7,4504 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Dari perhitungan diatas, gambar 5.2 disederhanakan menjadi gambar 5.3 seperti di bawah ini.



Gambar 5.3 Rangkaian penyederhanaan gambar 5.2

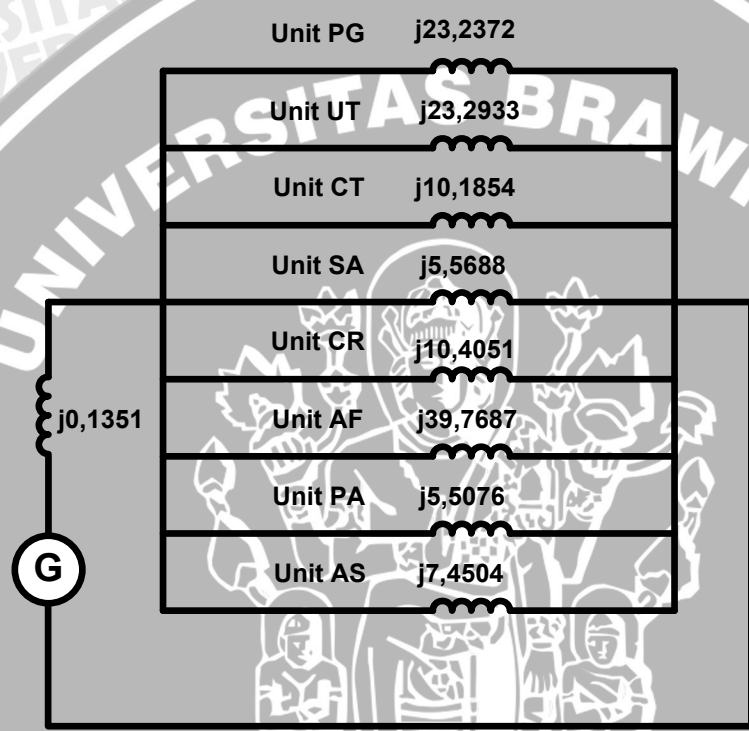
Sumber : hasil perhitungan



Dengan menyederhanakan rangkaian generator gambar 5.3 lebih lanjut didapatkan nilai reaktansi ekivalen baru sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{1}{X_G} &= \frac{1}{0,326} + \frac{1}{0,231} \\ &= j7,3964 \\ &= j0,1351 \text{ pu} \end{aligned}$$

Sehingga didapat rangkaian yang lebih sederhana seperti gambar 5.4.



Gambar 5.4 Rangkaian penyederhanaan gambar 5.3

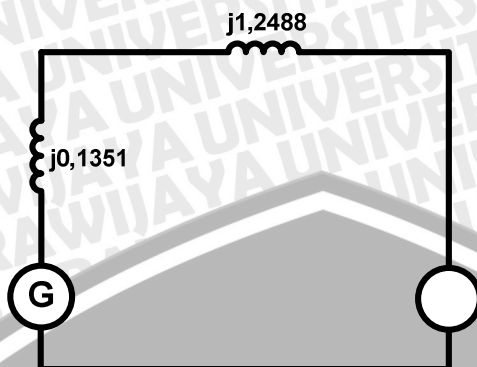
Sumber : hasil perhitungan

Penyederhanaan rangkaian unit PG hingga AS adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{1}{X_{beban}} &= \frac{1}{j23,2372} + \frac{1}{j23,2933} + \frac{1}{j10,1854} + \frac{1}{j7,4504} + \frac{1}{j10,4051} + \\ &\quad \frac{1}{j39,7687} + \frac{1}{j5,5076} + \frac{1}{j5,5688} \\ &= -j0,8007 \\ X_{beban} &= j1,2488 \text{ pu} \end{aligned}$$



Selanjutnya gambar 5.5 menunjukkan rangkaian paling sederhana setelah melalui perhitungan di atas.



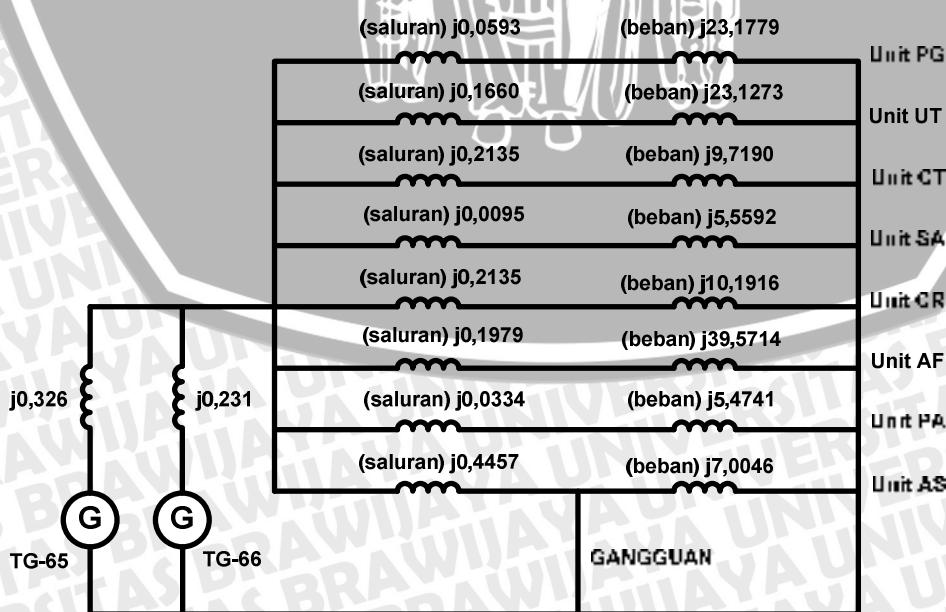
Gambar 5.5 Rangkaian penyederhanaan gambar 5.4  
 Sumber : hasil perhitungan

Dari gambar 5.5 dapat dihitung besarnya impedansi pengganti  $X_{th}$ , sehingga nilai reaktansi ekuivalen sebelum terjadi gangguan adalah :

$$\begin{aligned} X_{ek} &= X_G + X_{beban} \\ &= j0,1351 + j1,2488 \\ &= j1,3840 \text{ pu} \end{aligned}$$

### 5.2.2. Reaktansi Ekuivalen Selama Gangguan

Rangkaian ekuivalen selama gangguan dapat diuraikan pada gambar 5.6. Di dalam penelitian ini akan dianalisis gangguan di busbar HVS-51 (Unit AS).

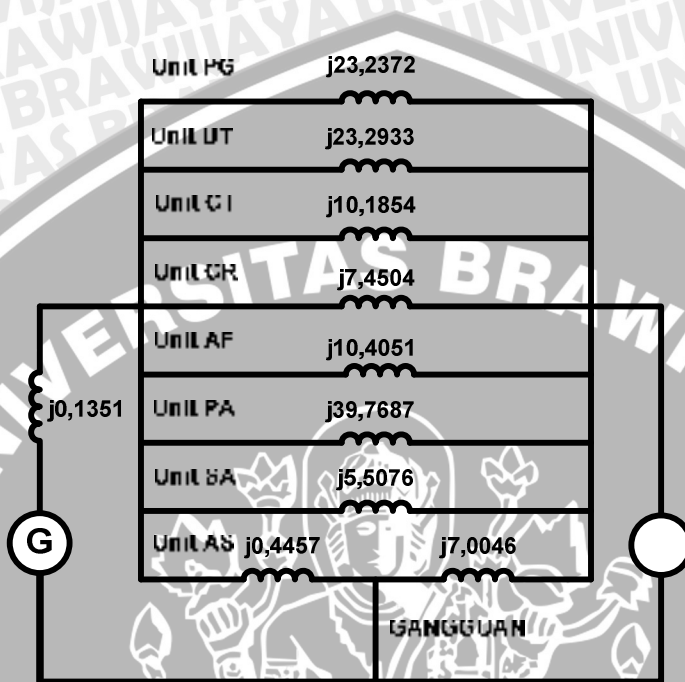




Gambar 5.6 Rangkaian ekivalen selama gangguan

Sumber : hasil perhitungan

Sesuai dengan perhitungan sebelumnya, dari gambar 5.6 dapat disederhanakan menjadi gambar 5.7 berikut :



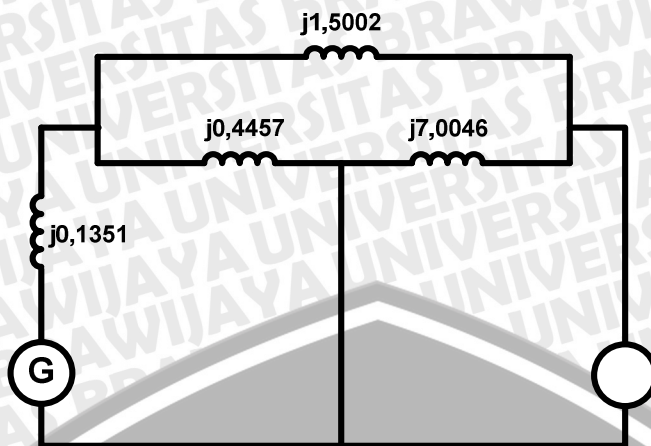
Gambar 5.7 Rangkaian penyederhanaan gambar 5.6

Sumber : hasil perhitungan

Perhitungan untuk penyederhanaan rangkaian berikutnya adalah dengan menghitung impedansi ekivalen unit yang tidak terkena gangguan adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \frac{1}{X_{beban}} &= \frac{1}{j23,2372} + \frac{1}{j23,2933} + \frac{1}{j10,1854} + \frac{1}{j10,4051} + \frac{1}{j39,7687} + \\ &\quad \frac{1}{j5,5076} + \frac{1}{j5,5688} \\ &= -j0,6665 \\ X_{beban} &= j1,5002 \text{ pu} \end{aligned}$$

Selanjutnya rangkaian dapat digambarkan seperti gambar 5.8 berikut :



Gambar 5.8 Rangkaian penyederhanaan gambar 5.7

Sumber : hasil perhitungan

Nilai reaktansi pada gambar 5.8 selain reaktansi generator ( $j0,1351$ ) dapat kita ubah melalui perhitungan sebagai berikut :

$$X_{ao} = \frac{j1,5002 \times j0,4457}{j1,5002 + j0,4457 + j7,0046}$$

$$= j0,0747 \text{ pu}$$

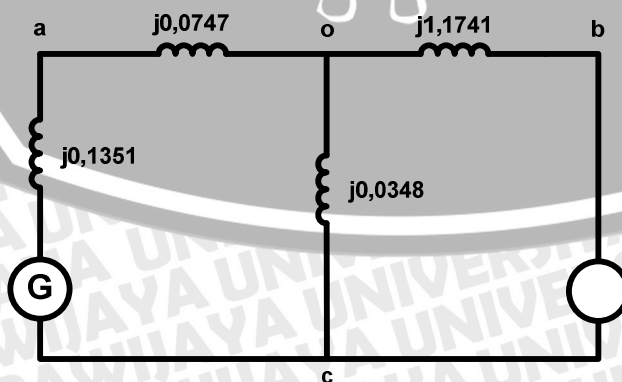
$$X_{bo} = \frac{j1,5002 \times j7,0046}{j1,5002 + j0,4457 + j7,0046}$$

$$= j1,1741 \text{ pu}$$

$$X_{co} = \frac{j0,4457 \times j7,0046}{j1,5002 + j0,4457 + j7,0046}$$

$$= j0,0348 \text{ pu}$$

Sehingga rangkaian menjadi gambar 5.9 dibawah ini.



Gambar 5.9 Rangkaian penyederhanaan gambar 5.8

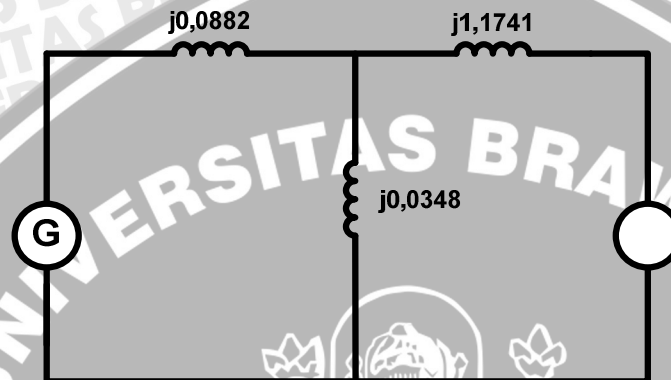
Sumber : hasil perhitungan



Selanjutnya disederhanakan menjadi :

$$\begin{aligned} X_{baru} &= X_{generator} + X_{ao} \\ &= j0,1351 + j0,0747 \\ &= j0,0882 \text{ pu} \end{aligned}$$

Maka rangkaian akan menjadi gambar 5.10 sebagai berikut.



Gambar 5.10 Rangkaian penyederhanaan gambar 5.9

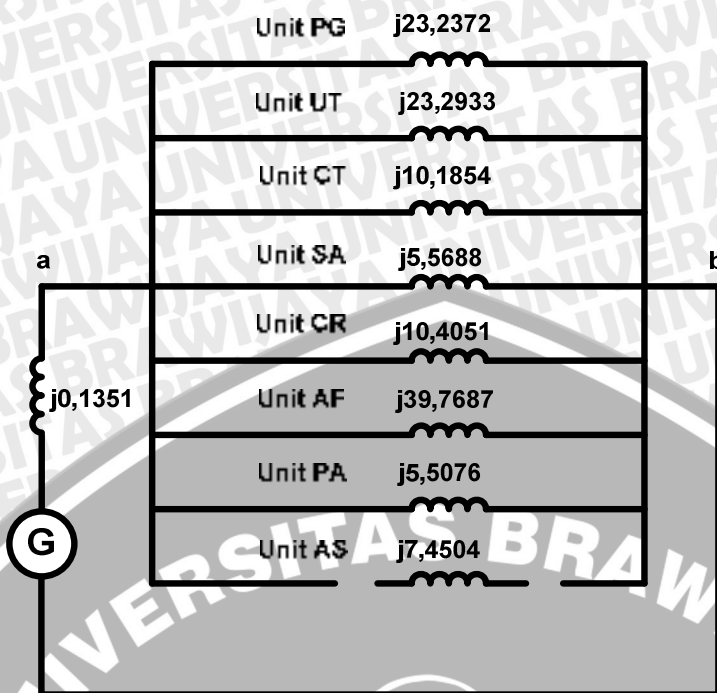
Sumber : hasil perhitungan

Karena terdapat hubung singkat tiga fasa ke tanah di titik 0 (HVS 51) sehingga impedansi ekuivalen selama gangguan :

$$\begin{aligned} X_{th} &= \frac{(j0,0882 \times j1,1741) + (j1,1741 \times j0,0348) + (j0,0882 \times j0,0348)}{j0,0348} \\ &= j4,2321 \text{ pu} \end{aligned}$$

### 5.2.3. Reaktansi Ekuivalen Setelah Gangguan

Setelah gangguan dihapuskan dengan terbukanya pemutus rangkaian pada saluran yang mengalami gangguan, reaktansinya ditunjukkan pada gambar 5.11 di bawah ini.



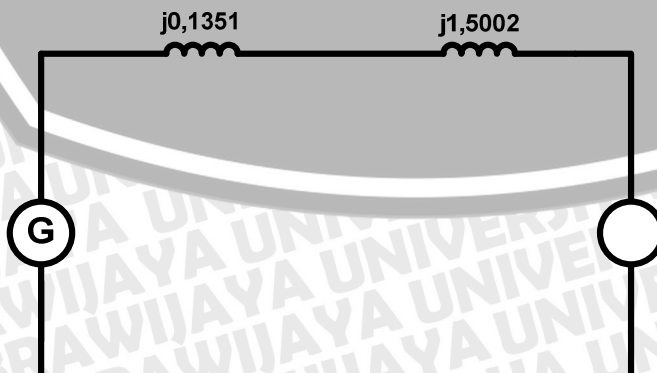
Gambar 5.11 Rangkaian ekuivalen setelah gangguan  
 Sumber : hasil perhitungan

$$\frac{1}{X_{ab}} = \frac{1}{j23,2372} + \frac{1}{j23,2933} + \frac{1}{j10,1854} + \frac{1}{j10,4051} + \frac{1}{j39,7687} + \frac{1}{j5,5076} + \frac{1}{j5,5688}$$

$$= -j0,6665$$

$$X_{ab} = j1,5002 \text{ pu}$$

Sehingga reaktansi ekuivalen setelah melalui perhitungan ditunjukkan pada gambar 5.12.



Gambar 5.12 Rangkaian penyederhanaan gambar 5.11

Sumber : hasil perhitungan



Reaktansi ekuivalen setelah gangguan adalah :

$$\begin{aligned} X_{ek} &= j0,1351 + j1,5002 \\ &= j1,6354 \text{ pu} \end{aligned}$$

### 1.9 Persamaan Sudut Daya

Dalam perhitungan persamaan sudut daya diperlukan tegangan dalam peralihan generator dengan menggunakan persamaan 5.4.

$$E' = V_t + j X_d' I \quad (5.4)$$

Dari lampiran didapat nilai pembangkitan kedua generator yaitu  $(7,8 - j5,3)$  MVA untuk TG-65 dan  $(9,4 - j7,2)$  MVA. Dengan menggunakan persamaan 5.4 akan dihitung untuk masing-masing generator.

#### 5.3.1. Generator TG-65

Nilai pembangkitan diubah sebagai berikut :

$$(7,8 - j5,3) \text{ MVA} = 9,4302 \angle 34,1956^\circ \text{ MVA}$$

Nilai pembangkitan yang diketahui diubah dalam nilai per unit adalah :

$$\begin{aligned} (P_1 - jQ_1) &= \frac{9,4302 \angle 34,1956^\circ}{14,375} \\ &= 0,6560 \angle 34,1956^\circ \\ &= 0,5426 - j0,3689 \text{ pu} \end{aligned}$$

Nilai daya dalam per unit digunakan untuk mendapatkan arus keluaran dari generator, sehingga :

$$\begin{aligned} I_t &= \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} \\ &= \frac{0,5426 - j0,3689}{1,00 - j0} \\ &= 0,5426 - j0,3689 \text{ pu} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Maka tegangan dalam peralihan generator :

$$E_g' = V_l + jX_g' I_t$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 + j0,326(0,5426 - j0,3689) \\
 &= 1,1201 + j0,1768 \\
 &= 1,1340 \angle 8,9735^\circ \text{ pu}
 \end{aligned}$$

Persamaan sudut daya akan dianalisa dengan menggunakan variabel tegangan dalam peralihan generator. Sehingga persamaan-persamaan sudut daya dari ketiga keadaan adalah :

$$\begin{aligned}
 \text{Sebelum gangguan} &= P_{maks} \sin \delta & (5.6) \\
 &= \frac{1,1,1340}{1,3840} \sin \delta \\
 &= 0,8194 \sin \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Selama gangguan} &= r_1 P_{maks} \sin \delta & (5.7) \\
 &= \frac{1,1,1340}{4,2321} \sin \delta \\
 &= 0,2679 \sin \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Setelah gangguan} &= r_2 P_{maks} \sin \delta & (5.8) \\
 &= \frac{1,1,1340}{1,6354} \sin \delta \\
 &= 0,6934 \sin \delta
 \end{aligned}$$

Untuk memperoleh nilai  $\delta_0$  dan  $\delta_{maks}$  maka menggunakan persamaan :

$$P_e = P_{maks} \sin \delta_0 \quad (5.9)$$

dan

$$P_e = r_2 P_{maks} \sin \delta_{maks} \quad (5.10)$$

sehingga

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{0,5426}{0,8194}$$

$$= 41,4677^\circ$$

$$= 0,7258 \text{ radian}$$

$$\delta_{maks} = \pi - \sin^{-1} \frac{0,5426}{0,6934}$$

$$= 128,6081^\circ$$

$$= 2,2428 \text{ radian}$$



Variabel-variabel persamaan sudut daya tersebut akan digunakan untuk mengetahui perubahan sudut rotor dan waktu pemutusan kritis.

### 5.3.2 Generator TG-66

Nilai pembangkitan diubah sebagai berikut :

$$(9,4 - j7,2) \text{ MVA} = 11,8406 \angle 37,4505^\circ \text{ MVA}$$

Nilai pembangkitan yang diketahui diubah dalam nilai per unit adalah :

$$\begin{aligned} (P_1 - jQ_1) &= \frac{11,8406 \angle 37,4505^\circ}{14,375} \\ &= 0,8236 \angle 37,4505^\circ \\ &= 0,6539 - j0,5008 \text{ pu} \end{aligned}$$

Nilai daya dalam per unit digunakan untuk mendapatkan arus keluaran dari generator, sehingga :

$$\begin{aligned} I_t &= \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} \\ &= \frac{0,6539 - j0,5008}{1,00 - j0} \\ &= 0,6539 - j0,5008 \text{ pu} \end{aligned}$$

Maka tegangan dalam peralihan generator :

$$\begin{aligned} E_g' &= V_1 + jX_g' I_t \\ &= 1 + j0,231 \cdot (0,6539 - j0,5008) \\ &= 1,1157 + j0,1510 \\ &= 1,1258 \angle 7,7103^\circ \text{ pu} \end{aligned}$$

Persamaan sudut daya akan dianalisa dengan menggunakan variabel tegangan dalam peralihan generator. Sehingga persamaan-persamaan sudut daya dari ketiga keadaan adalah :

$$\begin{aligned} \text{Sebelum gangguan} &= P_{maks} \sin \delta \\ &= \frac{1,11258}{1,3840} \sin \delta \\ &= 0,8134 \sin \delta \end{aligned} \tag{5.6}$$



$$\begin{aligned}
 \text{Selama gangguan} &= r_1 P_{maks} \sin \delta & (5.7) \\
 &= \frac{1.1,1258}{4,2321} \sin \delta \\
 &= 0,2660 \sin \delta
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Setelah gangguan} &= r_2 P_{maks} \sin \delta & (5.8) \\
 &= \frac{1.1,1258}{1,6354} \sin \delta \\
 &= 0,6884 \sin \delta
 \end{aligned}$$

Untuk memperoleh nilai  $\delta_0$  dan  $\delta_{maks}$  maka menggunakan persamaan :

$$P_e = P_{maks} \sin \delta_0 \quad (5.9)$$

dan

$$P_e = r_2 P_{maks} \sin \delta_{maks} \quad (5.10)$$

sehingga

$$\begin{aligned}
 \delta_0 &= \sin^{-1} \frac{0,6539}{0,8134} \\
 &= 53,4986^\circ \\
 &= 0,9337 \text{ radian} \\
 \delta_{maks} &= \pi - \sin^{-1} \frac{0,6539}{0,6884} \\
 &= 108,2131^\circ \\
 &= 1,8886 \text{ radian}
 \end{aligned}$$



Variabel-variabel persamaan sudut daya tersebut akan digunakan untuk mengetahui perubahan sudut rotor dan waktu pemutusan kritis.

### 1.10 Perhitungan Perubahan Sudut Rotor

Perhitungan perubahan sudut rotor pada saat terjadi gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah pada nama bus dianalisis menggunakan metode *Runge-Kutte*. Perbedaan variabel seperti reaktansi, konstanta inersia, sudut minimum dan daya masukan mekanis membuat perubahan sudut rotor antara generator satu dengan yang lain menjadi berbeda. Perhitungan perubahan sudut rotor pada generator TG-65 dan TG-66 akan ditunjukkan pada bagian selanjutnya.



### 5.4.1. Perubahan Sudut Rotor Generator TG-65

Adapun variabel-variabel yang digunakan adalah :

$$\Delta t = 0,05 \text{ detik}$$

$$\omega_s = 314,15927 \text{ radian/detik}$$

$$\omega_0 = 314,15927 \text{ radian/detik}$$

$$H = 1,81 \text{ MJ/MVA}$$

Karena digunakan dasar generator TG-66 maka konstanta inersia yang baru adalah :

$$H_{baru} = 1,81 \cdot \frac{10,625}{14,375} = 1,3378 \text{ MJ/MVA}$$

$$\delta_0 = 41,4677^\circ = 0,6758 \text{ radian}$$

$$P_e = 0,2679 \sin \delta$$

$$P_m = 0,5426$$

Dari variabel-variabel di atas akan dianalisis perubahan sudut rotor dengan metode *Runge-Kutte* sebagai berikut :

**Pada  $t = 0.05$  detik**

**Perkiraan pertama**

$$\begin{aligned} K_{(1)} &= (\omega_0 - \omega_s) \Delta t \\ &= (314,15927 - 314,15927) \cdot 0,05 \\ &= 0 \end{aligned} \tag{5.11}$$

$$\begin{aligned} P_e^{(1)} &= 0,2679 \sin \delta_0 \\ &= 0,2679 \sin (0,6758) \\ &= 0,1676 \end{aligned} \tag{5.12}$$

$$\begin{aligned} l_{(1)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(1)}) \Delta t \\ &= \frac{314,15927 \cdot 50}{1,3378} (0,5426 - 0,1676) \cdot 0,05 \\ &= 2,2013 \end{aligned} \tag{5.13}$$

**Perkiraan kedua**



$$\begin{aligned}
 K_{(2)} &= \left( \left( \omega_0 + \frac{l_{(1)}}{2} \right) - \omega_s \right) \Delta t & (5.14) \\
 &= \left( (314,15927 + \frac{2,2013}{2}) - 314,15927 \right) \cdot 0,05 \\
 &= 0,0550
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(2)} &= 0,2679 \sin \left( \delta_0 + \frac{K_{(1)}}{2} \right) & (5.15) \\
 &= 0,2679 \sin \left( 0,6758 + \frac{0}{2} \right) \\
 &= 0,1676
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{(2)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(2)}) \Delta t & (5.16) \\
 &= \frac{314,15927 \cdot 50}{1,3378} (0,5426 - 0,1676) \cdot 0,05 \\
 &= 2,2013
 \end{aligned}$$

### Perkiraan ketiga

$$\begin{aligned}
 K_{(3)} &= \left( \left( \omega_0 + \frac{l_{(2)}}{2} \right) - \omega_s \right) \Delta t & (5.17) \\
 &= \left( (314,15927 + \frac{2,2013}{2}) - 314,15927 \right) \cdot 0,05 \\
 &= 0,0550
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(3)} &= 0,2679 \sin \left( \delta_0 + \frac{K_{(2)}}{2} \right) & (5.18) \\
 &= 0,2679 \sin \left( 0,6758 + \frac{0,0550}{2} \right) \\
 &= 0,1733
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{(3)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(3)}) \Delta t & (5.19) \\
 &= \frac{314,15927 \cdot 50}{1,3378} (0,5426 - 0,1733) \cdot 0,05 \\
 &= 2,1679
 \end{aligned}$$

### Perkiraan keempat



$$\begin{aligned}
 K_{(4)} &= ((\omega_0 + l_{(3)}) - \omega_s) \Delta t & (5.20) \\
 &= ((314,15927 + 2,1679) - 314,15927) \cdot 0,05 \\
 &= 0,1083
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(4)} &= 0,2679 \sin(\delta_0 + K_{(3)}) & (5.21) \\
 &= 0,2679 \sin(0,6758 + 0,0550) \\
 &= 0,1733
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{(4)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(4)}) \Delta t & (5.22) \\
 &= \frac{314,15927 \cdot 50}{1,3378} (0,5426 - 0,1733) \cdot 0,05 \\
 &= 2,1352
 \end{aligned}$$

Pada akhir  $t = 0,05$  detik perubahan sudut rotor adalah :

$$\begin{aligned}
 \delta_1 &= \delta_0 + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) & (5.23) \\
 &= 0,6758 + \frac{1}{6} (0 + 2(0,0550) + 2(0,0550) + 0,1083) \\
 &= 0,7306 \text{ radian}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_1 &= \omega_0 + \frac{1}{6} (I_1 + 2I_2 + 2I_3 + I_4) & (5.24) \\
 &= 314,15927 + \frac{1}{6} (2,2013 + 2(2,2013) + 2(2,1679) + 2,1352) \\
 &= 316,3384 \text{ radian/detik}
 \end{aligned}$$

**Pada  $t = 0,1$  detik**

**Perkiraan pertama**

$$\begin{aligned}
 K_{(1)} &= (\omega_1 - \omega_s) \Delta t \\
 &= (316,3384 - 314,15927) \\
 &= 0,1089
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(1)} &= 0,2679 \sin \delta_1 \\
 &= 0,2679 \sin(0,7306) \\
 &= 0,1788
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{(1)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(1)}) \Delta t \\
 &= \frac{314,15927 \cdot 50}{1,3378} (0,5426 - 0,1788) \cdot 0,05 \\
 &= 2,1356
 \end{aligned}$$

**Perkiraan kedua**

$$\begin{aligned}
 K_{(2)} &= ((\omega_I + \frac{l_{(1)}}{2}) - \omega_s) \Delta t \\
 &= ((316,3384 + \frac{2,1356}{2}) - 314,15927) \cdot 0,05 \\
 &= 0,1623
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(2)} &= 0,2679 \sin (\delta_I + \frac{K_{(1)}}{2}) \\
 &= 0,1894
 \end{aligned}$$

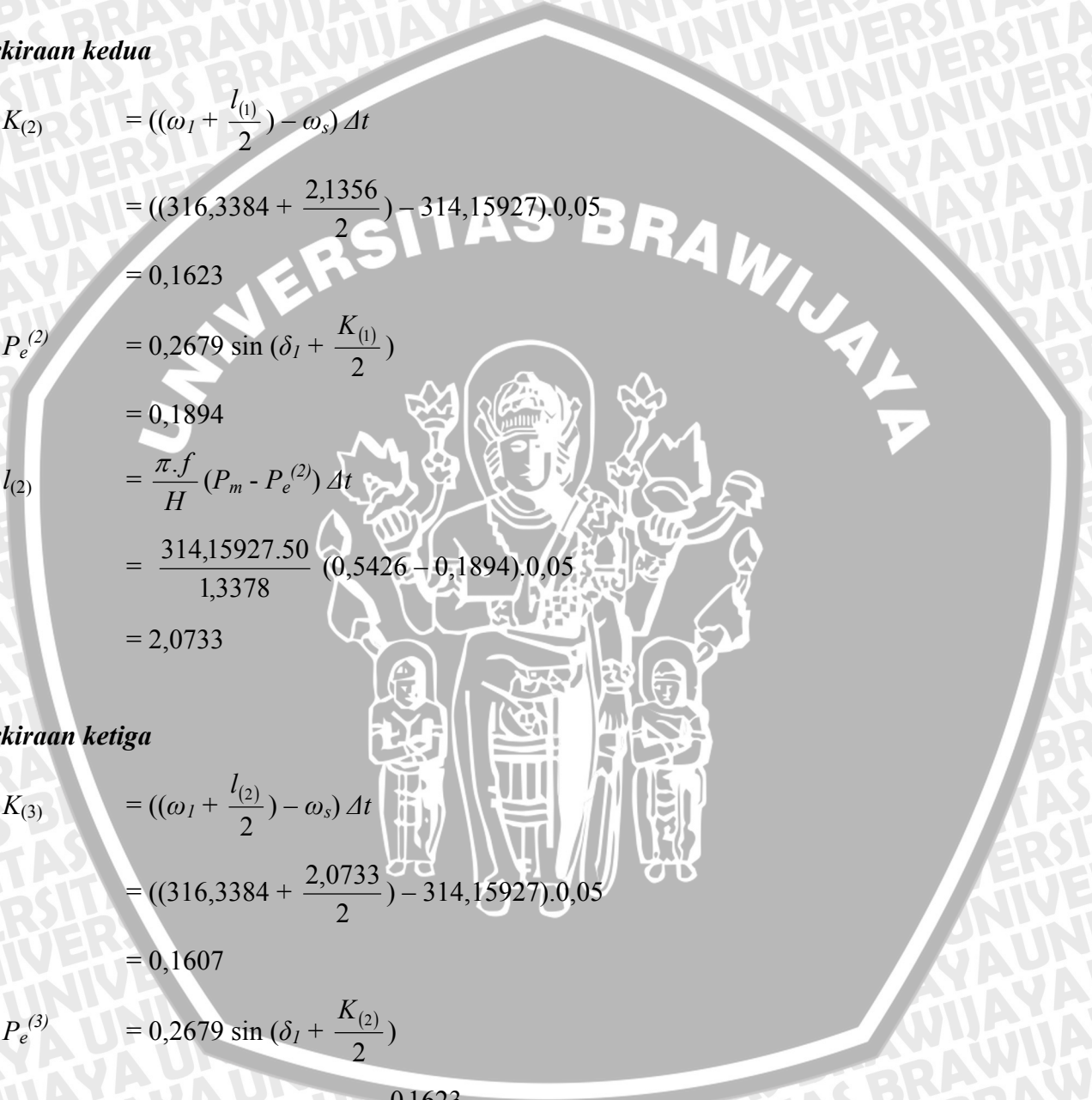
$$\begin{aligned}
 l_{(2)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(2)}) \Delta t \\
 &= \frac{314,15927 \cdot 50}{1,3378} (0,5426 - 0,1894) \cdot 0,05 \\
 &= 2,0733
 \end{aligned}$$

**Perkiraan ketiga**

$$\begin{aligned}
 K_{(3)} &= ((\omega_I + \frac{l_{(2)}}{2}) - \omega_s) \Delta t \\
 &= ((316,3384 + \frac{2,0733}{2}) - 314,15927) \cdot 0,05 \\
 &= 0,1607
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(3)} &= 0,2679 \sin (\delta_I + \frac{K_{(2)}}{2}) \\
 &= 0,2679 \sin (0,7306 + \frac{0,1623}{2}) \\
 &= 0,1644
 \end{aligned}$$

$$l_{(3)} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(3)}) \Delta t$$





$$\begin{aligned}
 &= \frac{314,15927.50}{1,3378} (0,5426 - 0,1644).0,05 \\
 &= 2,0440
 \end{aligned}$$

**Perkiraan keempat**

$$\begin{aligned}
 K_{(4)} &= ((\omega_l + l_{(3)}) - \omega_s) \Delta t \\
 &= ((316,3884 + 2,0440) - 314,15927).0,05 \\
 &= 0,2111
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(4)} &= 0,2679 \sin (\delta_l + K_{(3)}) \\
 &= 0,2679 \sin (0,7306 + 0,1607) \\
 &= 0,2084
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{(4)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(4)}) \Delta t \\
 &= \frac{314,15927.50}{1,3378} (0,5426 - 0,2084).0,05 \\
 &= 1,9615
 \end{aligned}$$

Pada akhir  $t = 0,10$  detik perubahan sudut rotor adalah :

$$\begin{aligned}
 \delta_2 &= \delta_l + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\
 &= 0,7306 + \frac{1}{6} (0,1089 + 2(0,1623) + 2(1607) + 0,2111) \\
 &= 0,8917 \text{ radian}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_2 &= \omega_1 + \frac{1}{6} (+ I_1 2I_2 + 2I_3 + I_4) \\
 &= 316,3884 + \frac{1}{6} (2,1356 + 2(2,0733) + 2(2,0440) + 1,9615) \\
 &= 318,3937 \text{ radian/detik}
 \end{aligned}$$

Untuk  $\Delta t$  selanjutnya dapat dikerjakan dengan cara yang sama, sehingga didapat nilai-nilai seperti pada tabel 5.4.

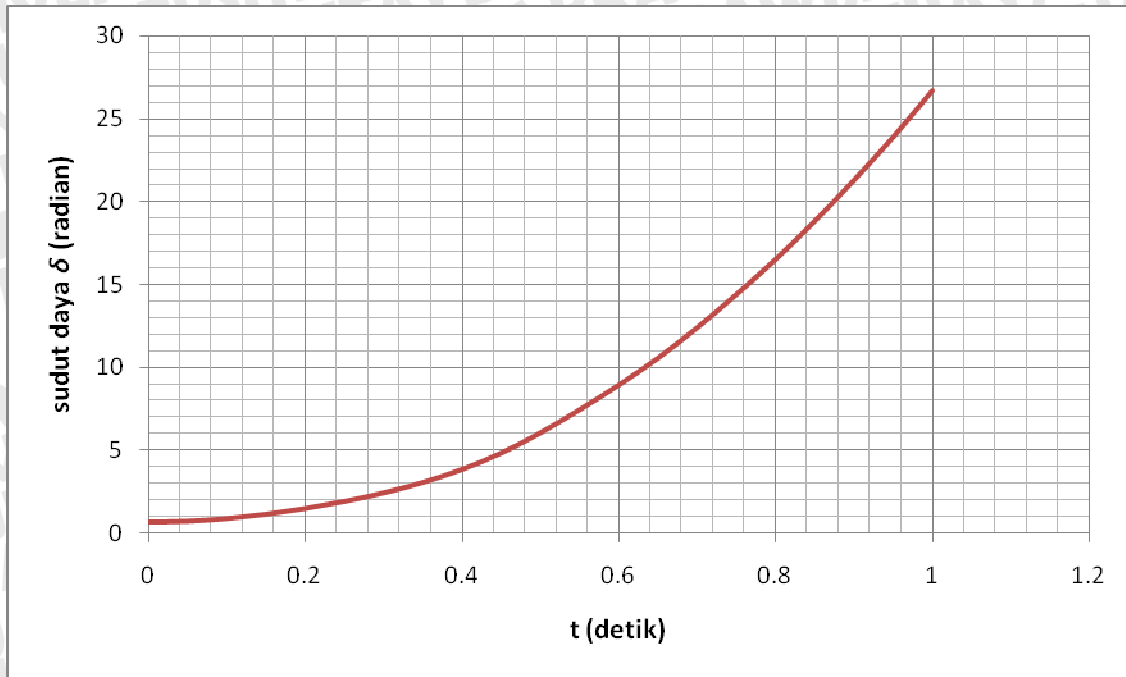
Tabel 5.4

Hasil perhitungan sudut daya, kecepatan sudut dan frekuensi fungsi waktu generator TG-65

t(detik)	del (radian)	omega (radian/detik)	frekuensi (Hz)
0	0,675882884	314,15927	50,00000074
0,05	0,73063714	316,3384367	50,3468259
0,1	0,891704075	318,3937738	50,67394295
0,15	1,15066469	320,24789	50,96903471
0,2	1,497404955	321,9181753	51,23486887
0,25	1,925916976	323,5565025	51,49561674
0,3	2,441495194	325,4623232	51,79893753
0,35	3,067533332	328,0480114	52,21046259
0,4	3,848192969	331,6873539	52,78968193
0,45	4,83689185	336,2689758	53,5188697
0,5	6,054951905	340,5717003	54,20366958
0,55	7,446675545	343,1165364	54,60869282
0,6	8,937313113	344,9453287	54,89975415
0,65	10,55779765	348,5539206	55,4740794
0,7	12,3926316	352,9657178	56,17623873
0,75	14,39572637	355,1770587	56,52818457
0,8	16,50642395	358,0122726	56,97942287
0,85	18,81271558	362,3789172	57,67439594
0,9	21,27949136	364,4273141	58,00040843
0,95	23,87786286	368,2453039	58,60806038
1	26,67095603	371,2858002	59,09197041

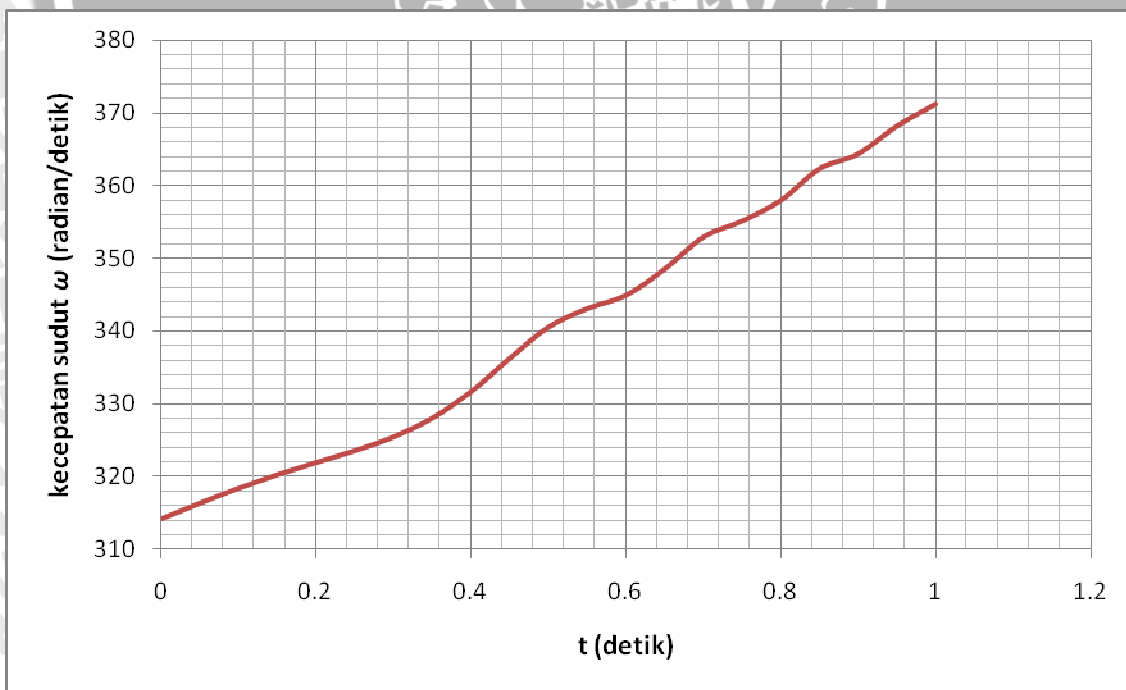
Gangguan pada unit AS menyebabkan berbagai pengaruh antara lain sudut daya, kecepatan sudut dan frekuensi terhadap satuan waktu. Gambar 5.13 dibawah ini akan memperlihatkan pengaruh berupa kenaikan sudut daya terhadap waktu saat etrjadi gangguan pada unit AS pada generator TG-65.





Gambar 5.13 Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-65 saat gangguan unit AS  
 Sumber : hasil perhitungan

Sedangkan gambar 5.14 menunjukkan perubahan kecepatan sudut generator TG-65 saat terjadi gangguan.



Gambar 5.14 Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-65 saat gangguan unit AS  
 Sumber : hasil perhitungan

Hasil perhitungan di atas serta hasil penggambaran pada grafik menunjukkan bahwa gangguan pada unit AS akan menyebabkan sudut daya generator TG-65 terus-menerus meningkat secara eksponensial. Perubahan kecepatan sudut dan frekuensi juga terus-menerus meningkat namun secara linier. Perhitungan perubahan sudut rotor generator TG-66 akan diperlihatkan pada bagian selanjutnya.

#### 5.4.2. Perubahan Sudut Rotor Generator TG-66

Adapun variabel-variabel yang digunakan adalah :

$$\Delta t = 0,05 \text{ detik}$$

$$\omega_s = 314,15927 \text{ radian/detik}$$

$$\omega_0 = 314,15927 \text{ radian/detik}$$

$$H = 2,80 \text{ MJ/MVA}$$

Karena digunakan dasar generator TG-66 maka konstanta inersia yang baru adalah :

$$H_{baru} = 2,80 \cdot \frac{14,375}{14,375} = 2,80 \text{ MJ/MVA}$$

$$\delta_0 = 53,4986^\circ = 0,9337 \text{ radian}$$

$$P_e = 0,2660 \sin \delta$$

$$P_m = 0,6539$$

Dari variabel-variabel di atas akan dianalisis perubahan sudut rotor dengan metode Runge-Kutte sebagai berikut :

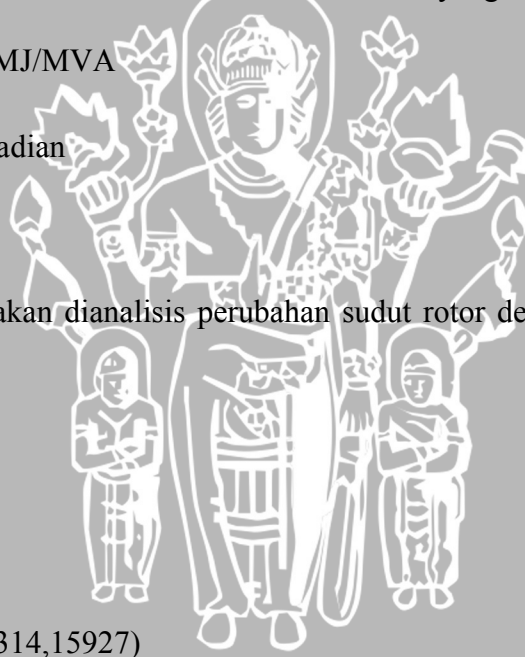
Pada  $t = 0.05$  detik

*Perkiraan pertama*

$$\begin{aligned} K_{(1)} &= (\omega_0 - \omega_s) \Delta t \\ &= (314,15927 - 314,15927) \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_e^{(1)} &= 0,2660 \sin \delta_0 \\ &= 0,2679 \sin (0,9337) \\ &= 0,2138 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} l_{(1)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(1)}) \Delta t \\ &= \frac{314,15927 \cdot 50}{2,80} (0,6539 - 0,2138) \cdot 0,05 \\ &= 1,2343 \end{aligned}$$





**Perkiraan kedua**

$$\begin{aligned}
 K_{(2)} &= \left( \left( \omega_0 + \frac{l_{(1)}}{2} \right) - \omega_s \right) \Delta t \\
 &= \left( \left( 314,15927 + \frac{1,2343}{2} \right) - 314,15927 \right) \cdot 0,05 \\
 &= 0,0308
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(2)} &= 0,2660 \sin \left( \delta_0 + \frac{K_{(1)}}{2} \right) \\
 &= 0,2660 \sin \left( 0,9337 + \frac{0}{2} \right) \\
 &= 0,2138
 \end{aligned}$$

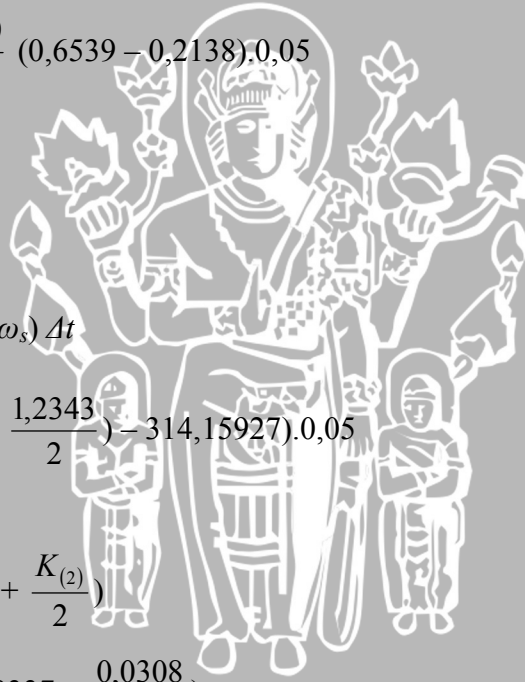
$$\begin{aligned}
 l_{(2)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(2)}) \Delta t \\
 &= \frac{314,15927 \cdot 50}{1,3378} (0,6539 - 0,2138) \cdot 0,05 \\
 &= 1,2343
 \end{aligned}$$

**Perkiraan ketiga**

$$\begin{aligned}
 K_{(3)} &= \left( \left( \omega_0 + \frac{l_{(2)}}{2} \right) - \omega_s \right) \Delta t \\
 &= \left( \left( 314,15927 + \frac{1,2343}{2} \right) - 314,15927 \right) \cdot 0,05 \\
 &= 0,0308
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(3)} &= 0,2679 \sin \left( \delta_0 + \frac{K_{(2)}}{2} \right) \\
 &= 0,2660 \sin \left( 0,9337 + \frac{0,0308}{2} \right) \\
 &= 0,2162
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{(3)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(3)}) \Delta t \\
 &= \frac{314,15927 \cdot 50}{1,3378} (0,6539 - 0,2162) \cdot 0,05 \\
 &= 1,2276
 \end{aligned}$$



**Perkiraan keempat**

$$\begin{aligned}
 K_{(4)} &= ((\omega_0 + l_{(3)}) - \omega_s) \Delta t \\
 &= ((314,15927 + 1,2276) - 314,15927) \cdot 0,05 \\
 &= 0,0163
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(4)} &= 0,2660 \sin(\delta_0 + K_{(3)}) \\
 &= 0,2679 \sin(0,9337 + 0,0308) \\
 &= 0,2186
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{(4)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(4)}) \Delta t \\
 &= \frac{314,15927 \cdot 50}{1,3378} (0,6539 - 0,2186) \cdot 0,05 \\
 &= 1,2209
 \end{aligned}$$

Pada akhir  $t = 0,05$  detik perubahan sudut rotor adalah :

$$\begin{aligned}
 \delta_l &= \delta_0 + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\
 &= 0,9337 + \frac{1}{6} (0 + 2(0,0308) + 2(0,00308) + 0,0163) \\
 &= 0,9645 \text{ radian}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_l &= \omega_0 + \frac{1}{6} (l_1 + 2l_2 + 2l_3 + l_4) \\
 &= 314,15927 + \frac{1}{6} (1,2343 + 2(1,2343) + 2(1,2276) + 1,2209) \\
 &= 315,3891 \text{ radian/detik}
 \end{aligned}$$

**Pada  $t = 0,1$  detik**

**Perkiraan pertama**

$$\begin{aligned}
 K_{(1)} &= (\omega_l - \omega_s) \Delta t \\
 &= (315,3891 - 314,15927) \\
 &= 0,0614
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(1)} &= 0,2660 \sin \delta_l \\
 &= 0,2660 \sin(0,9645) \\
 &= 0,2186
 \end{aligned}$$

$$l_{(1)} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(1)}) \Delta t$$



$$= \frac{314,15927.50}{1,3378} (0,6539 - 0,2186).0,05$$

$$= 1,2209$$

**Perkiraan kedua**

$$K_{(2)} = \left( \left( \omega_I + \frac{l_{(1)}}{2} \right) - \omega_s \right) \Delta t$$

$$= \left( (315,3891 + \frac{1,2209}{2}) - 314,15927 \right) . 0,05$$

$$= 0,0920$$

$$P_e^{(2)} = 0,2660 \sin \left( \delta_I + \frac{K_{(1)}}{2} \right)$$

$$= 0,2660 \sin \left( 0,9645 + \frac{0,0614}{2} \right)$$

$$= 0,2231$$

$$l_{(2)} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(2)}) \Delta t$$

$$= \frac{314,15927.50}{2,80} (0,6539 - 0,2231) . 0,05$$

$$= 1,2082$$

**Perkiraan ketiga**

$$K_{(3)} = \left( \left( \omega_I + \frac{l_{(2)}}{2} \right) - \omega_s \right) \Delta t$$

$$= \left( (315,3891 + \frac{1,2082}{2}) - 314,15927 \right) . 0,05$$

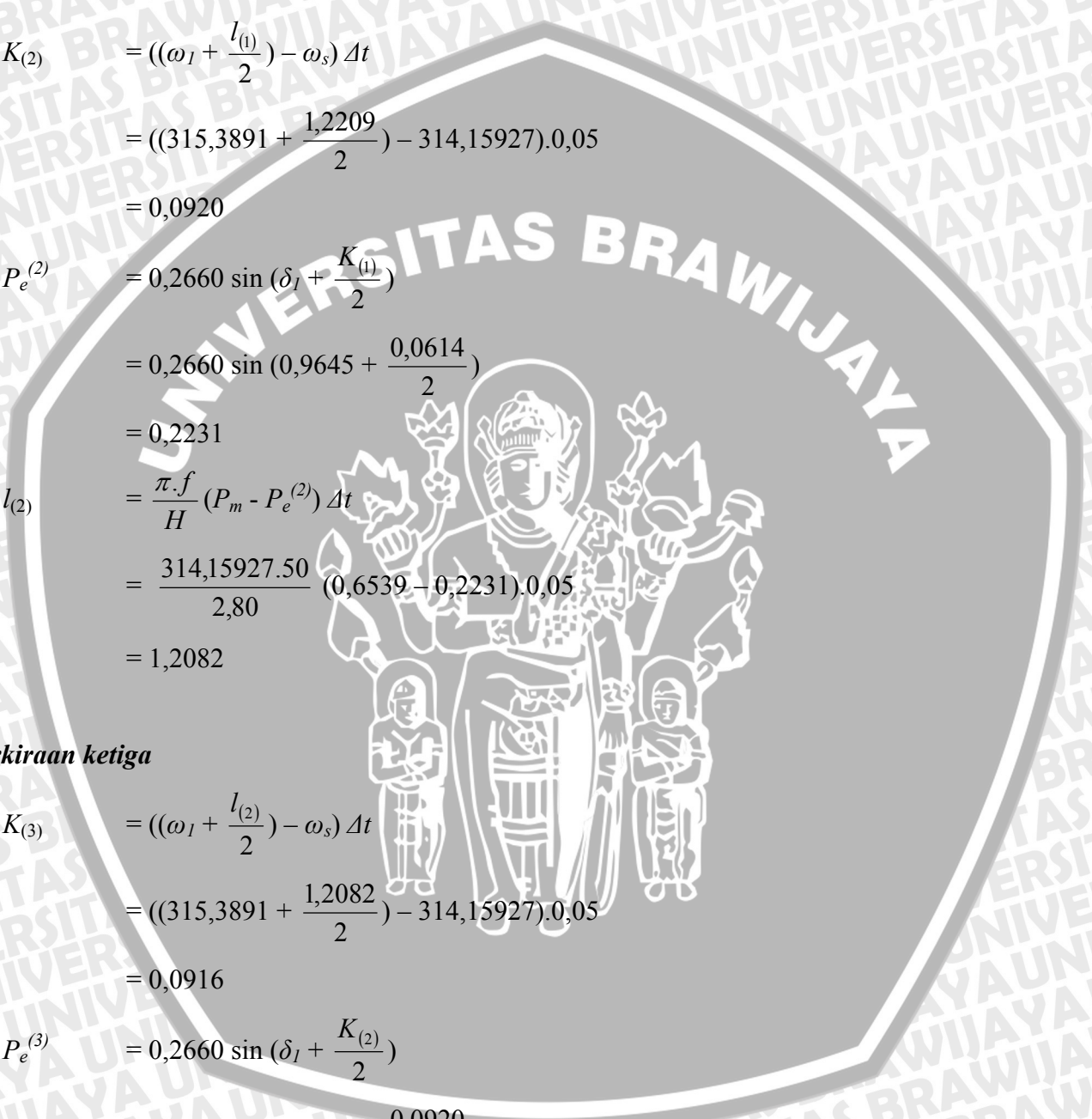
$$= 0,0916$$

$$P_e^{(3)} = 0,2660 \sin \left( \delta_I + \frac{K_{(2)}}{2} \right)$$

$$= 0,2660 \sin \left( 0,9645 + \frac{0,0920}{2} \right)$$

$$= 0,2253$$

$$l_{(3)} = \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(3)}) \Delta t$$



$$\begin{aligned}
 &= \frac{314,15927.50}{1,3378} (0,6539 - 0,2253).0,05 \\
 &= 1,2020
 \end{aligned}$$

**Perkiraan keempat**

$$\begin{aligned}
 K_{(4)} &= ((\omega_l + l_{(3)}) - \omega_s) \Delta t \\
 &= ((315,3891 + 1,2020) - 314,15927).0,05 \\
 &= 0,1215
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_e^{(4)} &= 0,2660 \sin (\delta_l + K_{(3)}) \\
 &= 0,2660 \sin (0,9645 + 0,0916) \\
 &= 0,2315
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 l_{(4)} &= \frac{\pi \cdot f}{H} (P_m - P_e^{(4)}) \Delta t \\
 &= \frac{314,15927.50}{1,3378} (0,6539 - 0,2315).0,05 \\
 &= 1,1846
 \end{aligned}$$

Pada akhir  $t = 0,10$  detik perubahan sudut rotor adalah :

$$\begin{aligned}
 \delta_2 &= \delta_l + \frac{1}{6} (K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\
 &= 0,9645 + \frac{1}{6} (0,0614 + 2(0,0920) + 2(0,0916) + 0,1215) \\
 &= 1,0562 \text{ radian}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_2 &= \omega_l + \frac{1}{6} (I_1 + 2I_2 + 2I_3 + I_4) \\
 &= 315,3891 + \frac{1}{6} (1,2209 + 2(1,2082) + 2(1,2020) + 1,1846) \\
 &= 316,5935 \text{ radian/detik}
 \end{aligned}$$

Untuk  $\Delta t$  selanjutnya dapat dikerjakan dengan cara yang sama, sehingga didapat nilai-nilai seperti pada tabel 5.5.

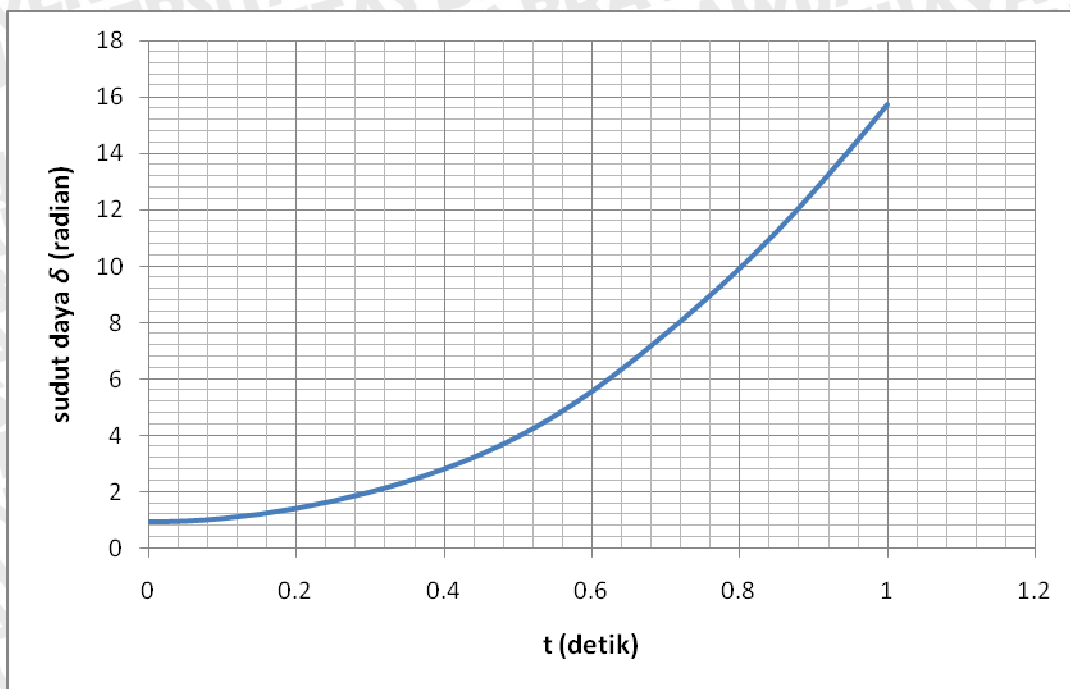


Tabel 5.5

Hasil perhitungan sudut daya, kecepatan sudut dan frekuensi fungsi waktu generator TG-66

t(detik)	del (radian)	omega (radian/detik)	frekuensi (Hz)
0	0.933727288	314.15927	50.00000074
0.05	0.964530331	315.3891567	50.3468259
0.1	1.056285457	316.5935285	50.96923931
0.15	1.207221824	317.7545004	51.80003317
0.2	1.415029595	318.8697293	54.12062973
0.25	1.677834295	319.9602038	56.80484059
0.3	1.995531436	321.0765677	59.66094053
0.35	2.37135593	322.3017143	63.90258336
0.4	2.813413867	323.7457621	68.35710405
0.45	3.33561374	325.5250011	73.29816238
0.5	3.95681329	327.7081975	77.23559646
0.55	4.696085736	330.2150698	82.64631384
0.6	5.562396706	332.7136722	90.31352752
0.65	6.543061217	334.7176914	95.64844948
0.7	7.606457551	336.0481624	104.5577244
0.75	8.728872252	337.2078196	111.4800121
0.8	9.921788418	338.9667402	119.8635845
0.85	11.22223421	341.4314486	126.7758348
0.9	12.64524736	343.676887	135.4691569
0.95	14.15733425	345.0105753	146.6882721
1	15.73085756	346.3763102	157.3823163

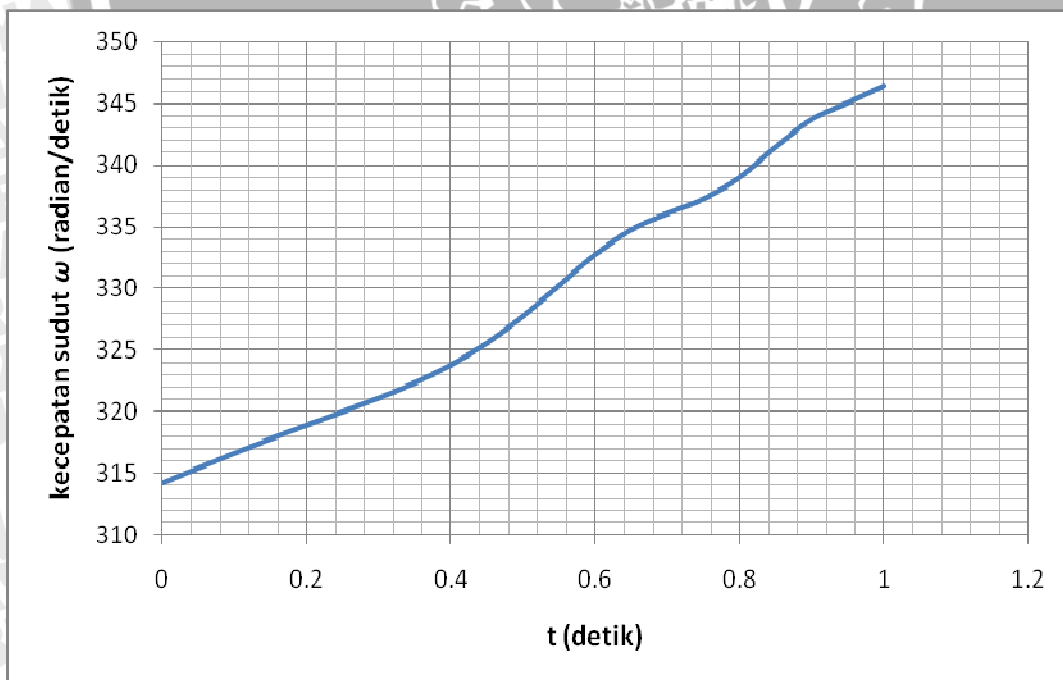
Gangguan pada unit AS menyebabkan berbagai pengaruh antara lain sudut daya, kecepatan sudut dan frekuensi terhadap satuan waktu. Gambar 5.15 dibawah ini akan memperlihatkan pengaruh gangguan pada unit AS pada generator TG-66.



Gambar 5.15 Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-66 saat gangguan unit AS

Sumber : hasil perhitungan

Sedangkan gambar 5.16 menunjukkan perubahan kecepatan sudut generator TG-66 saat terjadi gangguan.



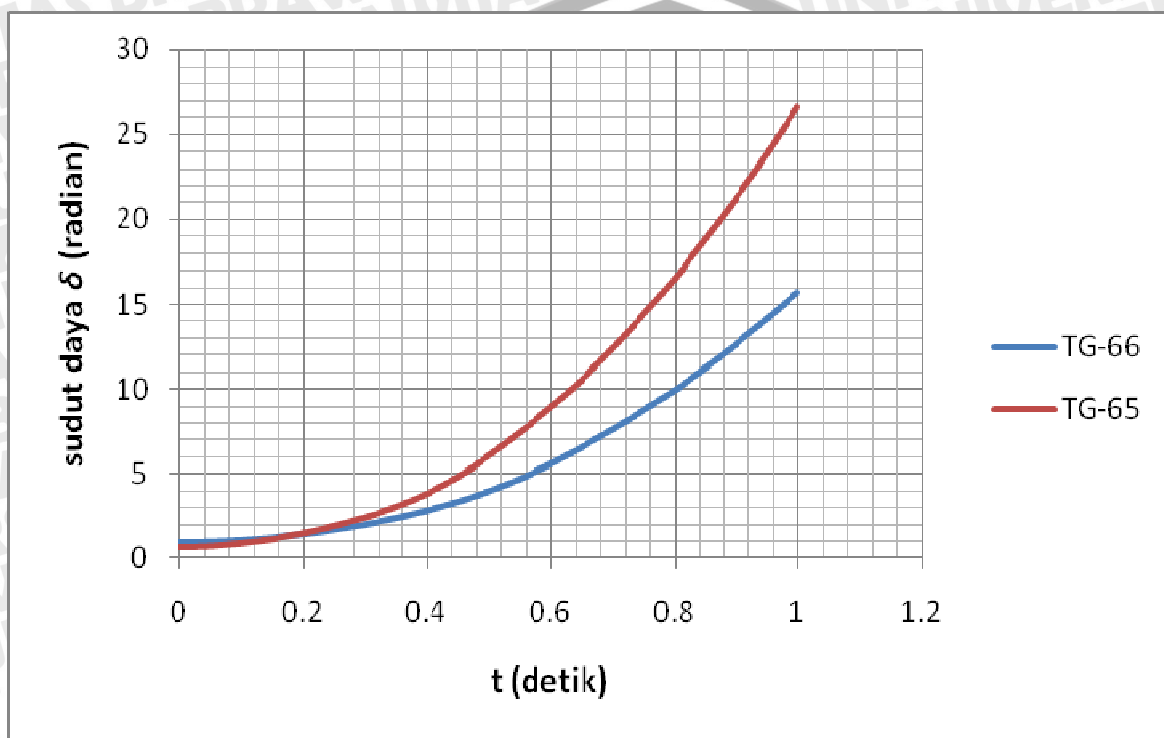
Gambar 5.16 Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-66 saat gangguan unit AS

Sumber : hasil perhitungan



Hasil perhitungan di atas serta hasil penggambaran pada grafik menunjukkan bahwa gangguan pada unit AS akan menyebabkan sudut daya generator TG-66 terus-menerus meningkat secara eksponensial.

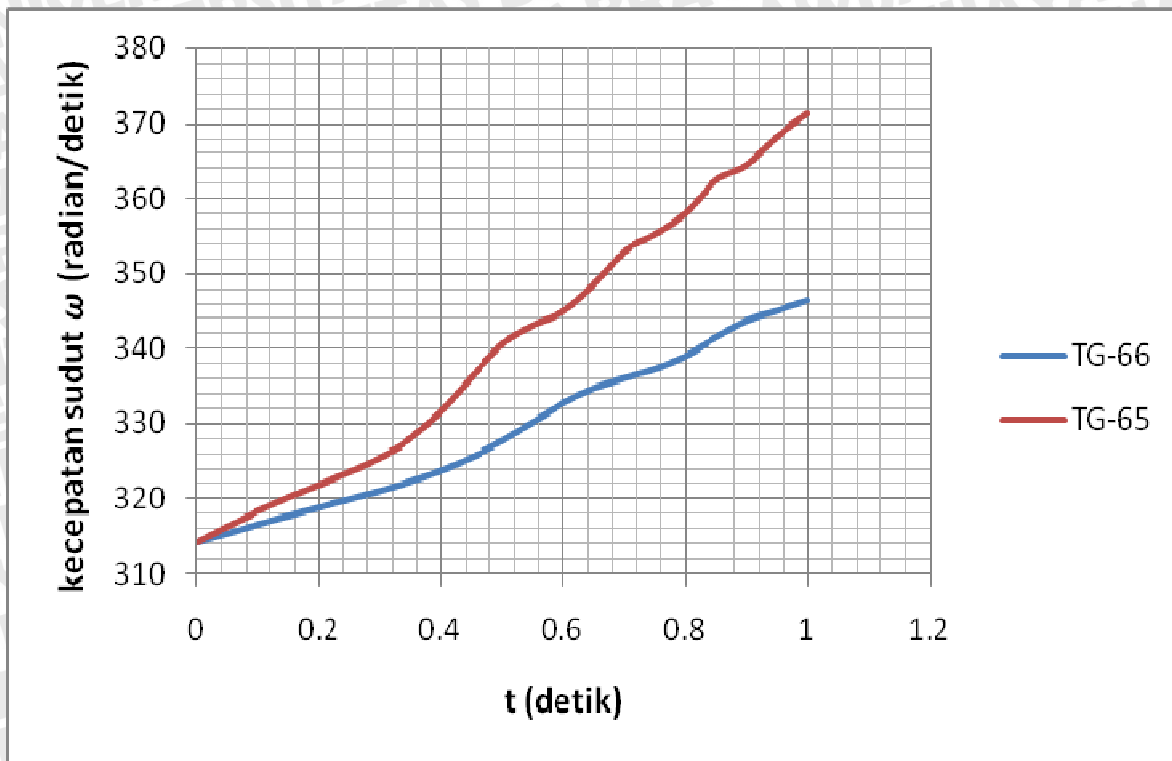
Pada bagian selanjutnya akan diperlihatkan grafik sudut daya terhadap waktu antara TG-65 dan TG-66 pada gambar 5.17.



Gambar 5.17 Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 saat gangguan unit AS

Sumber : hasil perhitungan

Sedangkan gambar 5.17 menunjukkan perubahan kecepatan sudut generator TG-66 saat terjadi gangguan.



Gambar 5.18 Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 saat gangguan unit AS

Sumber : hasil perhitungan

Gambar 5.17 dan 5.16 memperlihatkan perbedaan kenaikan sudut daya dan kecepatan sudut antara generator TG-65 dan TG-66. Yaitu generator TG-65 lebih tinggi daripada TG-66. Perbedaan ini disebabkan kapasitas daya, konstanta inersia dan reaktansi peralihan generator TG-66 lebih besar sehingga lebih stabil daripada generator TG-65.

### 1.11 Perhitungan Waktu Pemutusan Kritis

Waktu pemutusan kritis dari gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah pada bus bar HVS 51 (*Substation* 51). dapat ditentukan dengan persamaan 4.32 sebagai berikut (Stevenson, 1996:373):

$$\cos \delta_c = \frac{(P_m / P_{maks})(\delta_{maks} - \delta_0) + r_2 \cos \delta_{maks} - r_1 \cos \delta_0}{r_2 - r_1} \quad (4.24)$$

dimana

$$r_1 = \frac{X_{sebelumgangguan}}{X_{sesudahgangguan}} \quad (4.25)$$

$$= \frac{j1,3840}{j4,231}$$



$$= 0,3270$$

$$r_2 = \frac{X_{\text{sebelumgangguan}}}{X_{\text{setelahgangguan}}} \quad (4.26)$$

$$= \frac{j1,3840}{j1,6354}$$

$$= 0,8462$$

Perhitungan sudut pemutusan untuk masing-masing generator akan dihitung pada bagian dibawah ini.

### 5.5.1. Waktu Pemutusan Kritis Generator TG-65

Dengan diketahuinya  $r_1$  dan  $r_2$  maka  $\delta_c$  dapat dicari sebagai berikut :

$$\delta_c = \cos^{-1} \frac{(0,5426/0,8194)(2,2428 - 0,6758) + 0,8465 \cdot \cos(128,5081^\circ) - 0,3270 \cdot \cos(41,4677^\circ)}{(0,8462 - 0,3270)}$$

$$= \cos^{-1} \frac{0,2656}{0,5191}$$

$$= 59,2187^\circ$$

$$= 1,0335 \text{ radian}$$

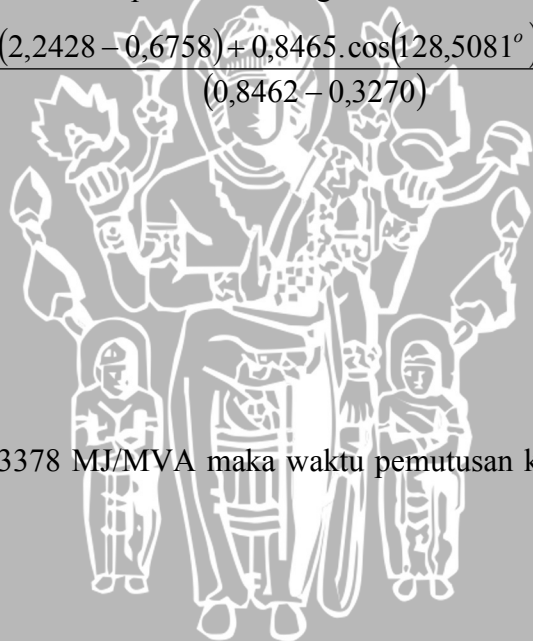
dengan nilai konstanta  $H = 1,3378$  MJ/MVA maka waktu pemutusan kritis dapat diperoleh dengan persamaan 5.25.

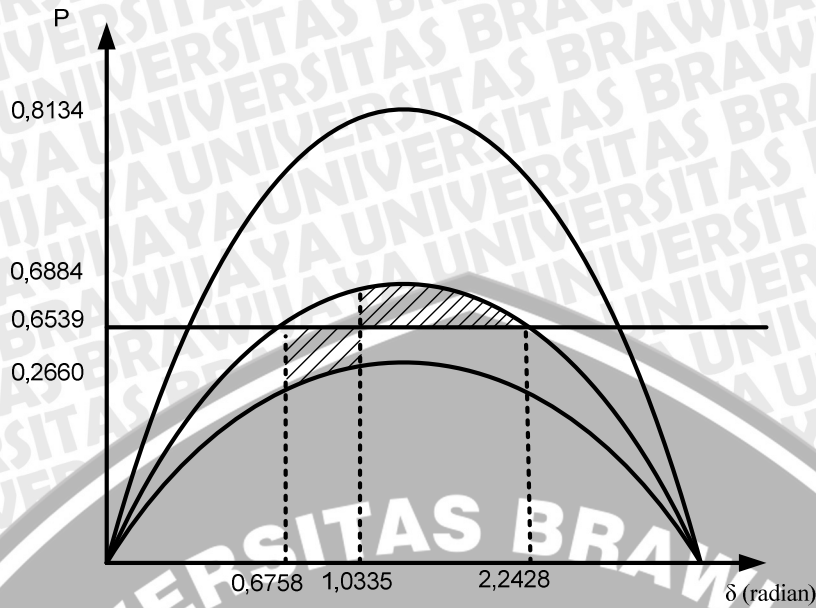
$$t_c = \sqrt{\frac{4H(\delta_c - \delta_0)}{\omega_s P}} \quad (5.25)$$

$$= \sqrt{\frac{4 \cdot 1,3378(1,0335 - 0,6758)}{314,15927 \cdot 0,5426}}$$

$$= 0,1059 \text{ detik}$$

Berikut adalah gambar 5.19 yang menunjukkan sudut daya sebelum, saat dan sesudah gangguan pada generator TG-65.





Gambar 5.19 Sudut daya TG-65 yang menunjukkan sudut pemutusan kritis

Sumber : hasil perhitungan

### 5.5.2. Waktu Pemutusan Kritis Generator TG-66

Dengan diketahuinya  $r_1$  dan  $r_2$  maka  $\delta_c$  dapat dicari sebagai berikut :

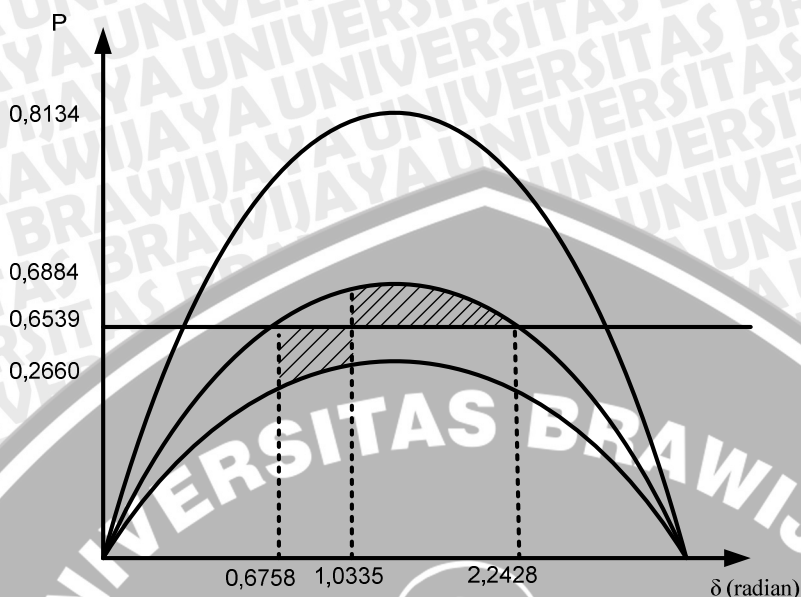
$$\begin{aligned} \delta_c &= \cos^{-1} \frac{(0,6539/0,8194)(1,8886 - 0,9337) + 0,8462 \cdot \cos(108,2131^\circ) - 0,3270 \cdot \cos(53,4986^\circ)}{(0,8462 - 0,3270)} \\ &= \cos^{-1} \frac{0,3085}{0,5191} \\ &= 53,5321^\circ \\ &= 0,9343 \text{ radian} \end{aligned}$$

dengan nilai konstanta  $H = 2,8 \text{ MJ/MVA}$  maka waktu pemutusan kritis dapat diperoleh sebagai berikut.

$$\begin{aligned} t_c &= \sqrt{\frac{4H(\delta_c - \delta_0)}{\omega_s P}} \\ &= \sqrt{\frac{4 \cdot 2,8(0,9343 - 0,9337)}{314,15927 \cdot 0,6539}} \\ &= 0,0056 \text{ detik} \end{aligned}$$



Berikut adalah gambar 5.20 yang menunjukkan sudut daya sebelum, saat dan sesudah gangguan pada generator TG-65.

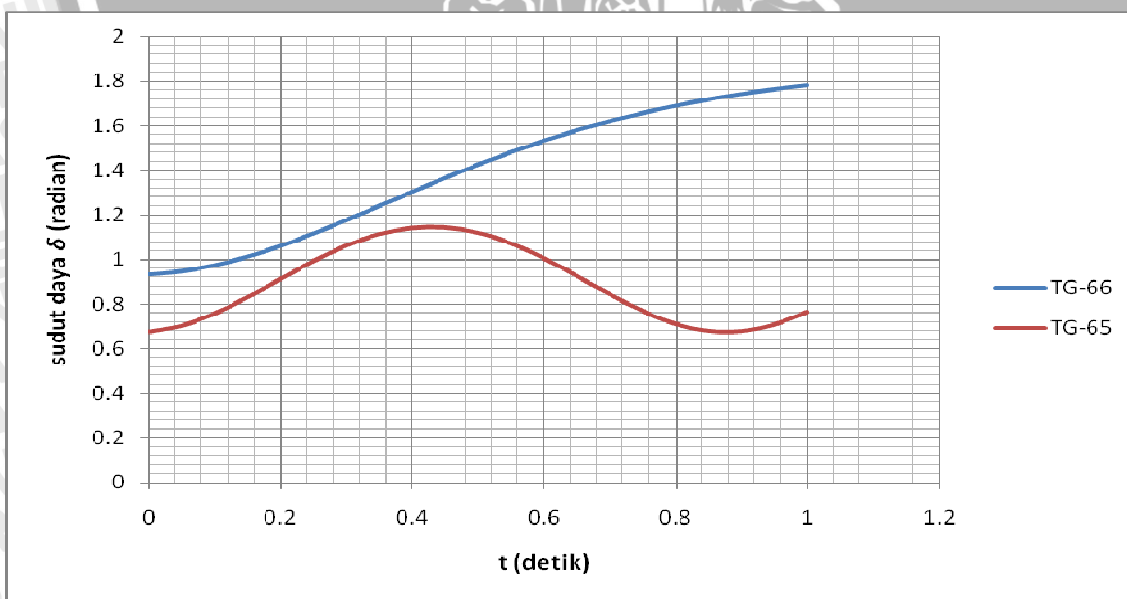


Gambar 5.20 Sudut daya TG-66 yang menunjukkan sudut pemutusan kritis

Sumber : hasil perhitungan

### 5.6 Kestabilan Sistem Kelistrikan Pabrik III PT.Petrokimia Gresik

Jika gangguan dihilangkan saat 0,005 detik untuk kedua generator, maka akan diperlihatkan pada gambar 5.21 untuk sudut daya fungsi waktu selama 1 detik.

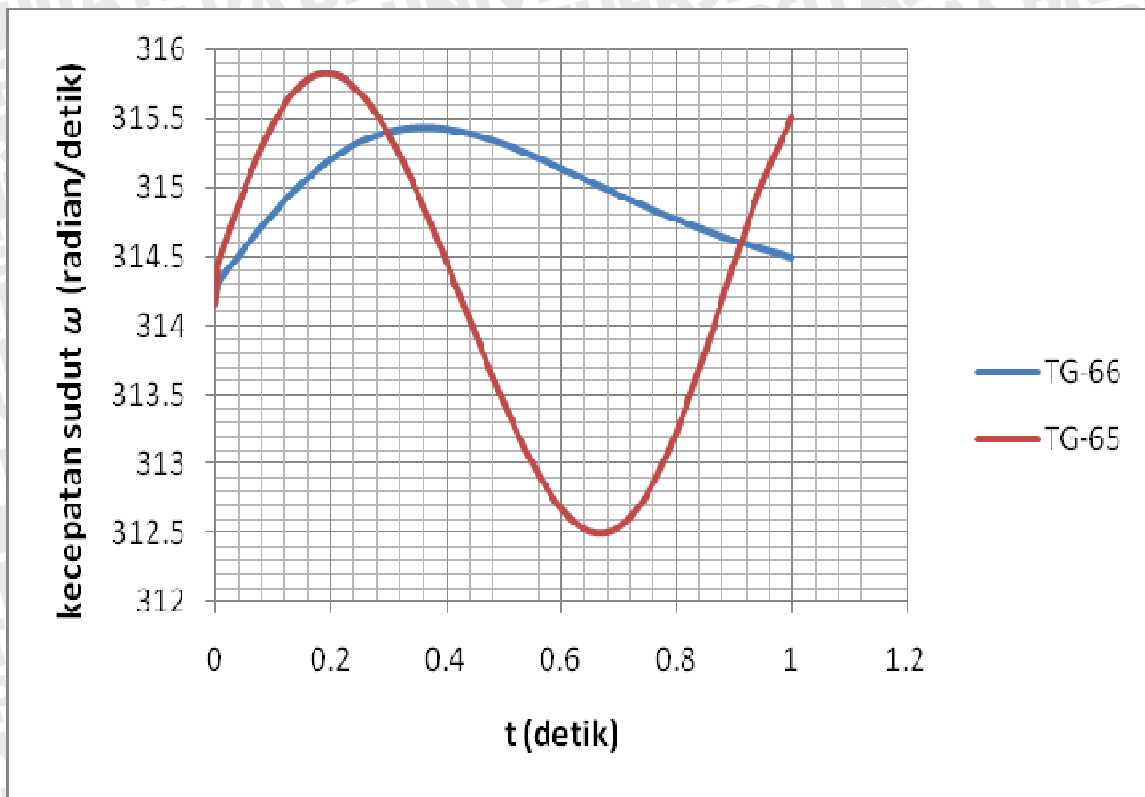


Gambar 5.21 Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 setelah pemutusan gangguan unit AS pada 0,005 detik selama 1 detik

Sumber : hasil perhitungan



Sedangkan gambar 5.22 menunjukkan kecepatan sudut fungsi waktu pada kedua generator selama selang waktu 1 detik.



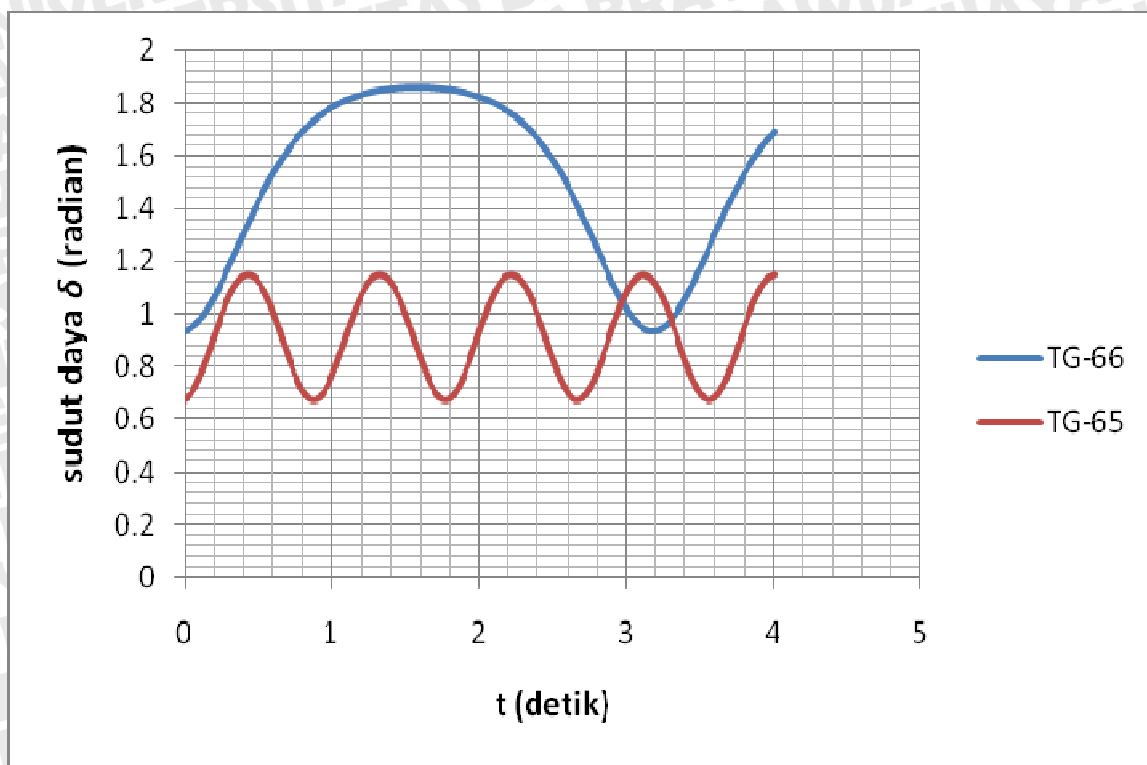
Gambar 5.22 Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 setelah pemutusan gangguan unit AS pada 0,005 detik selama 1 detik

Sumber : hasil perhitungan

Dari grafik pada gambar 5.21 dan 5.22 dapat dijelaskan bahwa sudut daya dan kecepatan sudut masih berayun atau belum kembali ke titik keseimbangan awal sebelum detik pertama berakhir. Ayunan sudut daya generator TG-65 memiliki frekuensi lebih tinggi daripada TG-66. Ayunan kecepatan sudut generator TG-65 juga memiliki frekuensi lebih tinggi. Hal ini diperkuat dengan pernyataan sebelumnya bahwa generator TG-66 lebih stabil terhadap gangguan yang terlihat memiliki ayunan sudut daya dan kecepatan sudut lebih kecil daripada TG-65. Namun tidak diketahui sampai kapan akan kembali ke titik keseimbangan awalnya.

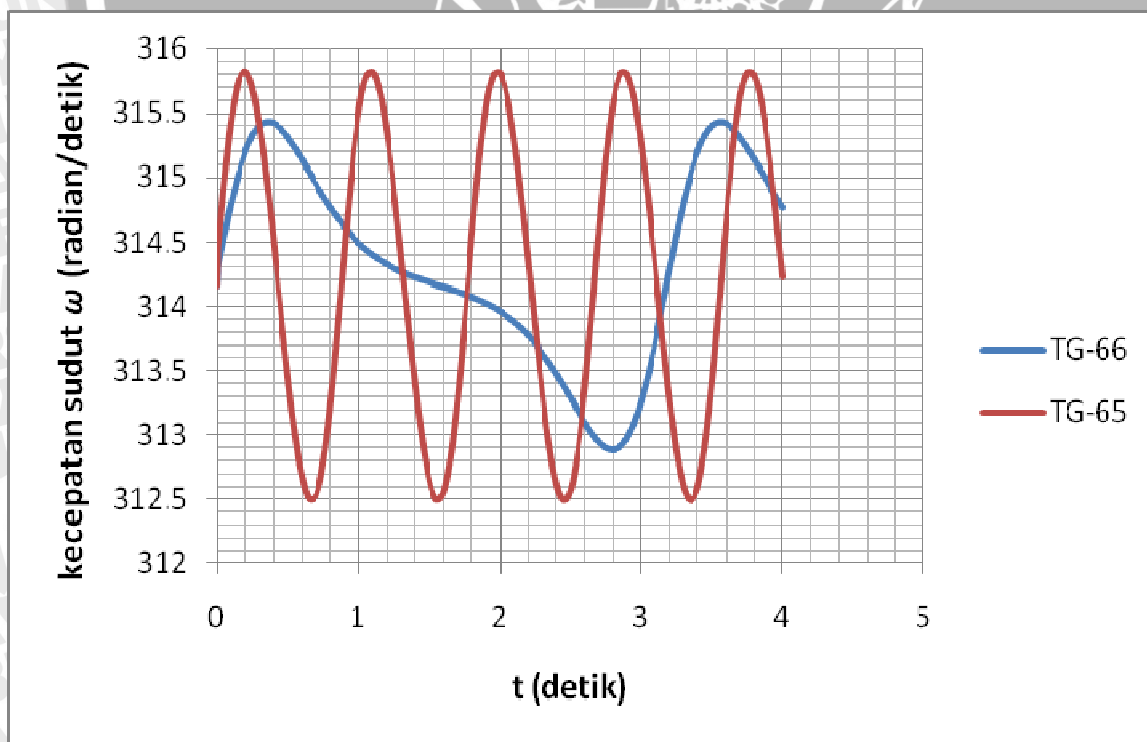
Untuk selanjutnya akan diperlihatkan gambar 5.23 dan 5.24 untuk sudut daya fungsi waktu dan kecepatan sudut fungsi waktu selama 4 detik.





Gambar 5.23 Grafik perubahan sudut daya terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 setelah pemutusan gangguan unit AS pada 0,005 detik selama 4 detik

Sumber : hasil perhitungan



Gambar 5.24 Grafik perubahan kecepatan sudut terhadap waktu generator TG-65 dan TG-66 setelah pemutusan gangguan unit AS pada 0,005 detik selama 4 detik

Sumber : hasil perhitungan

Pada gambar 5.23 dan 5.24 menunjukkan bahwa sudut daya dan kecepatan sudut generator TG-65 dan TG-66 belum mencapai titik keseimbangan atau kerja normalnya sampai detik ke-4. Pada gambar 5.23 ditunjukkan osilasi dengan frekuensi yang tinggi yang ditunjukkan generator TG-65. Sedangkan osilasi frekuensi rendah terjadi pada generator TG-66 namun dengan amplitudo yang lebih besar. Gambar 5.24 osilasi tak teratur ditunjukkan pada generator TG-66, sekali lagi pada detik ke-4 sistem belum mencapai titik keseimbangannya.

Sesuai dengan definisi yang dipaparkan sebelumnya, bahwa kestabilan peralihan adalah kembalinya kerja normal suatu sistem daya listrik setelah terjadi gangguan sebelum detik pertama berakhir. Kestabilan sistem yang direpresentasikan dengan sudut daya dan kecepatan sudut pada pabrik III PT. Petrokimia Gresik pada gambar 5.21 hingga 5.24 setelah terjadi gangguan belum tercapai. Jadi tidak memenuhi definisi kestabilan itu sendiri. Dengan kata lain, sistem kelistrikan pada pabrik III PT. Petrokimia Gresik secara keseluruhan bukan sistem yang stabil.





## BAB VI PENUTUP

### 6.1 Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan dan analisis yang dilakukan dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Sebagai akibat gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah di *bus bar* HVS-51 pada pabrik III PT. Petrokimia Gresik menyebabkan kedua generator TG-65 dan TG-66 lepas dari keadaan sinkron. Dari grafik dapat dilihat generator TG-65 memiliki daya tahan paling kecil dengan melihat waktu keluar sinkronnya lebih cepat dari generator TG-66.
2. Berdasarkan analisis yang dilakukan, maka sudut pemutusan yang sesuai dengan gangguan hubung singkat tiga fasa seimbang di *bus bar* HVS-51 pabrik II PT. Petrokimia Gresik adalah 1,0335 radian untuk generator TG-65 dan 0,9343 radian untuk generator TG-66. Waktu pemutusan kritis generator TG-65 adalah 0,1059 detik dan generator TG-66 adalah 5,6 milidetik.
3. Rentang waktu antara 5 milidetik sampai dengan 1 detik, sistem masih belum kembali pada titik keseimbangannya, bahkan sampai sebelum 4 detik berakhir sistem masih belum konstan seimbang pada kerja normalnya. Hal ini terlihat dari grafik sudut daya dan kecepatan sudut masing-masing generator.

### 6.2 Saran

Banyaknya kekurangan yang ada sehingga saran untuk penelitian dan pabrik III PT. Petrokimia Gresik adalah sebagai berikut :

1. Perlu adanya kajian lebih lanjut tentang kehandalan sistem kelistrikan di pabrik III PT. Petrokimia Gresik mengingat usia menjadi pertimbangan.
2. Alat ukur elektrik sebaiknya ditambahkan guna mengetahui parameter kelistrikan di pabrik III PT. Petrokimia Gresik dengan baik.
3. Memperkecil reaktansi peralihan pada sistem dengan menambahkan kapasitansi shunt pada sistem.
4. Memakai alat pemutus daya yang cepat.

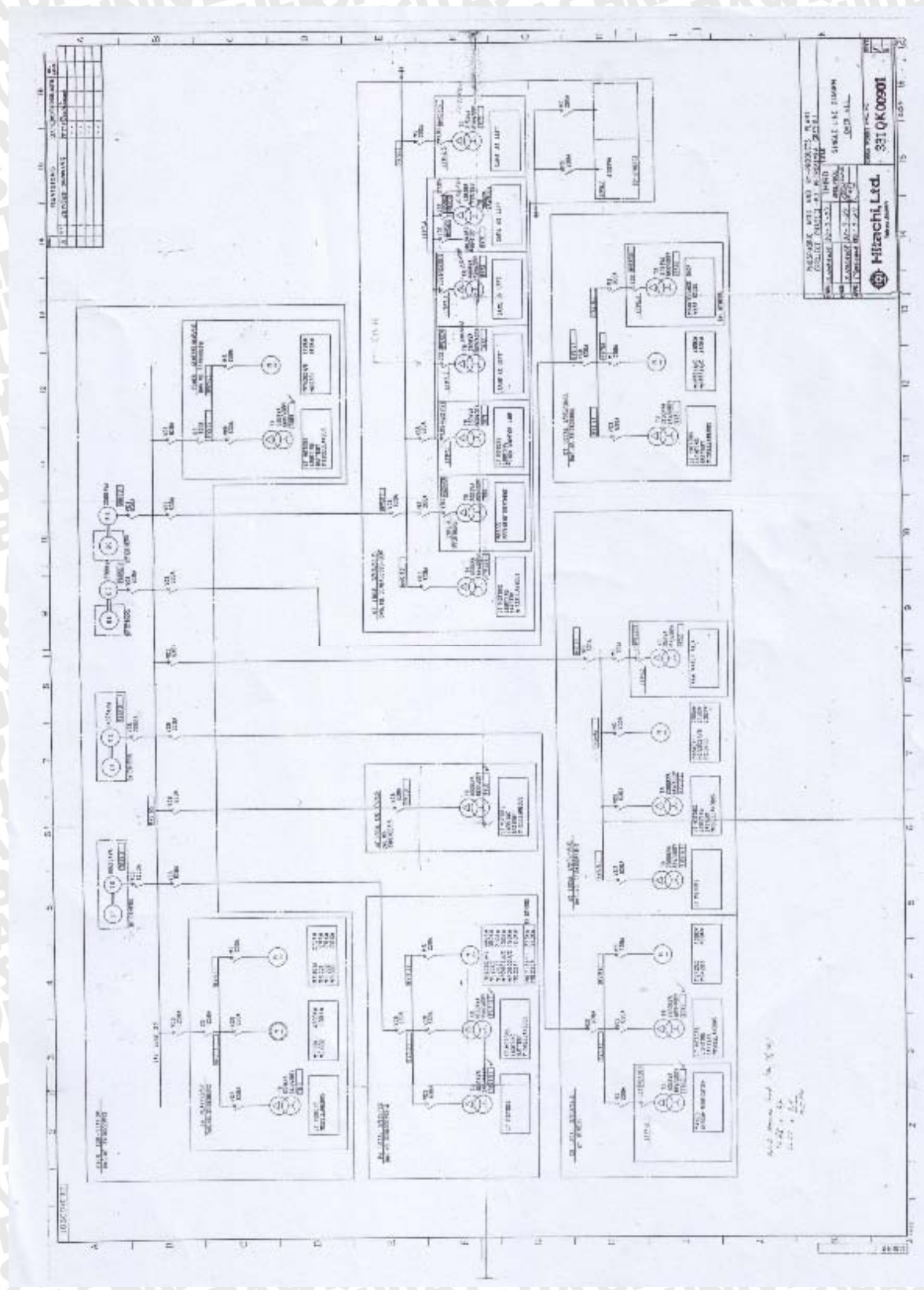
## DAFTAR PUSTAKA

- Stevenson, William D. 1996. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Fitzgerald, AE, dkk. 1994. *Mesin-mesin Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Sulasno. 1993. *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Semarang: Satya Wacana.
- Gross, C.A. 1979. *Power System Analysis*. John Wiley and Sons: New York.
- Hutahuruk, T.S. 1984. *Analisa Sistem Tenaga Listrik*. FTI ITB: 1984.
- Hutahuruk T.S. 1987. *Analisa Peralihan Mesin Sinkron*.
- Chapra, S. Canale, R. 1985. *Metode Numerik Untuk Teknik*. Jakarta : UI Press.
- Purnomo, Hery. 2000. *Diktat Mata Kuliah Mesin Arus Bolak-Balik*. Malang.
- Pai, M.A. 1979. *Computer Techniques in Power System Analysis*. New Delhi : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.





### Lampiran 1. Single-line diagram pabrik III

















Lampiran 5. Data generator TG-65

ESTIMATED GENERATOR DATA

GENERATOR NO. 316X509

NAMEPLATE DATA

2 Poles, 3 Phase, Wye Connected, 50 Hertz  
 Total temperature at rating guaranteed not to exceed:  
 120 C on armature by detector, 150 C on field by resistance  
 Maximum cold gas temperature: 40 C  
 Inlet water: 30 C

Rating: 10,625 KVA, 1022 Armature Amps, 6000 Armature Volts, 262 Field Amps  
 125 Excitation Volts, 0.80 Power Factor

DESIGN DATA

Maximum KVA One Cooler Out of Service ..... 8500  
 No-Load Field Current ..... 33.6 Amperes  
 Three Phase Armature Winding Capacitance ..... 0.191 Microfarads  
 Armature Winding DC Resistance (per phase) ..... 0.01283 Ohms at 100 C  
 Field Winding DC Resistance ..... 0.429 Ohms at 125 C

COLLECTOR AND BRUSH DATA

Collector brushes: ~~12 per set~~ BRUSHLESS      Recommended Grade: National Carbon 634  
 Collector minimum safe operating diameter: ~~50.5mm~~  
 Shaft grounding brushes: 2 per set      Recommended Grade: National Carbon 634  
 If brushes spark or chatter, refer to: GEK-35474

GAS COOLER DATA

Inlet water temperature: 30C  
 Head loss through cooler: 2.65m  
 Gas space in generator: 13.4 m<sup>3</sup>  
 Water flow at rated load: 1.27 m<sup>3</sup>/min  
 Gas flow through generator: 382 m<sup>3</sup>/min

AIR FILTER

Type of Air Filter ..... Far Type 44  
 Size of Air Filter ..... 254 x 508 x 50mm  
 Number of Air Filters ..... 1

639



**REACTANCE DATA (PER UNIT)**

Saturated Synchronous
Unsaturated Synchronous
Saturated Transient
Unsaturated Transient
Saturated Subtransient
Unsaturated Subtransient
Saturated Negative Sequence
Unsaturated Negative Sequence
Saturated Zero Sequence
Unsaturated Zero Sequence
Leakage Reactance

**DIRECT AXIS**

(Xdv)	2.524
(Xdi)	2.524
(X'dv)	0.241
(X'di)	0.308
(X''dv)	0.171
(X''di)	0.222
(X2v)	0.157
(X2i)	0.205
(X0v)	0.099
(X0i)	0.112
(XLM.OEX)	0.176
(XLM.UEX)	0.176

**QUADRATURE AXIS**

(Xqv)	2.331
(Xqi)	2.331
(X'q)	0.613
(X''qv)	0.163
(X''qi)	0.215

**Field Time Constant Data (Sec at 125 C)**

Open Circuit	(T'do)	4.371	(T'qo)	0.364
Three Phase Short Circuit Transient	(T'd3)	0.417	(T'q)	0.384
Line to Line Short Circuit Transient	(T'd2)	0.649		
Line to Neutral Short Circuit Transient	(T'd1)	0.781		
Short Circuit Subtransient	(T'di)	0.015	(T''di)	0.015
Open Circuit Subtransient	(T'do)	0.021	(T''qo)	0.057

**Armature DC Component Time Constant Data (Sec at 100 C)**

Three Phase Short Circuit	(Ta3)	0.132
Line to Line Short Circuit	(Ta2)	0.132
Line to Neutral Short Circuit	(Ta1)	0.116

**Per Unit Armature Winding Sequence Resistance Data**

Positive	(R1)	0.007
Negative	(R2)	0.026
Zero	(R0)	0.015

Rotor Short-Time Thermal Capacity (I <sub>r</sub> <sup>2</sup> t)	30
Turbine and Generator Combined Inertia Constant (H)	1.81 KW Sec/KVA
Three Phase Armature Winding Capacitance	0.191 Microfarads
Armature Winding DC Resistance (per phase)	0.01283 Ohms (100 C)
Field Winding DC Resistance	0.439 Ohms (125 C)
Field Current at Rated KVA, Rated Armature Voltage, Rated PF	261.9 Amps
Field Current at Rated KVA, Rated Armature Voltage, 0 PF Lagging	289.4 Amps*

\*This is not an allowable operating point for the generator. Value is supplied for systems study only.







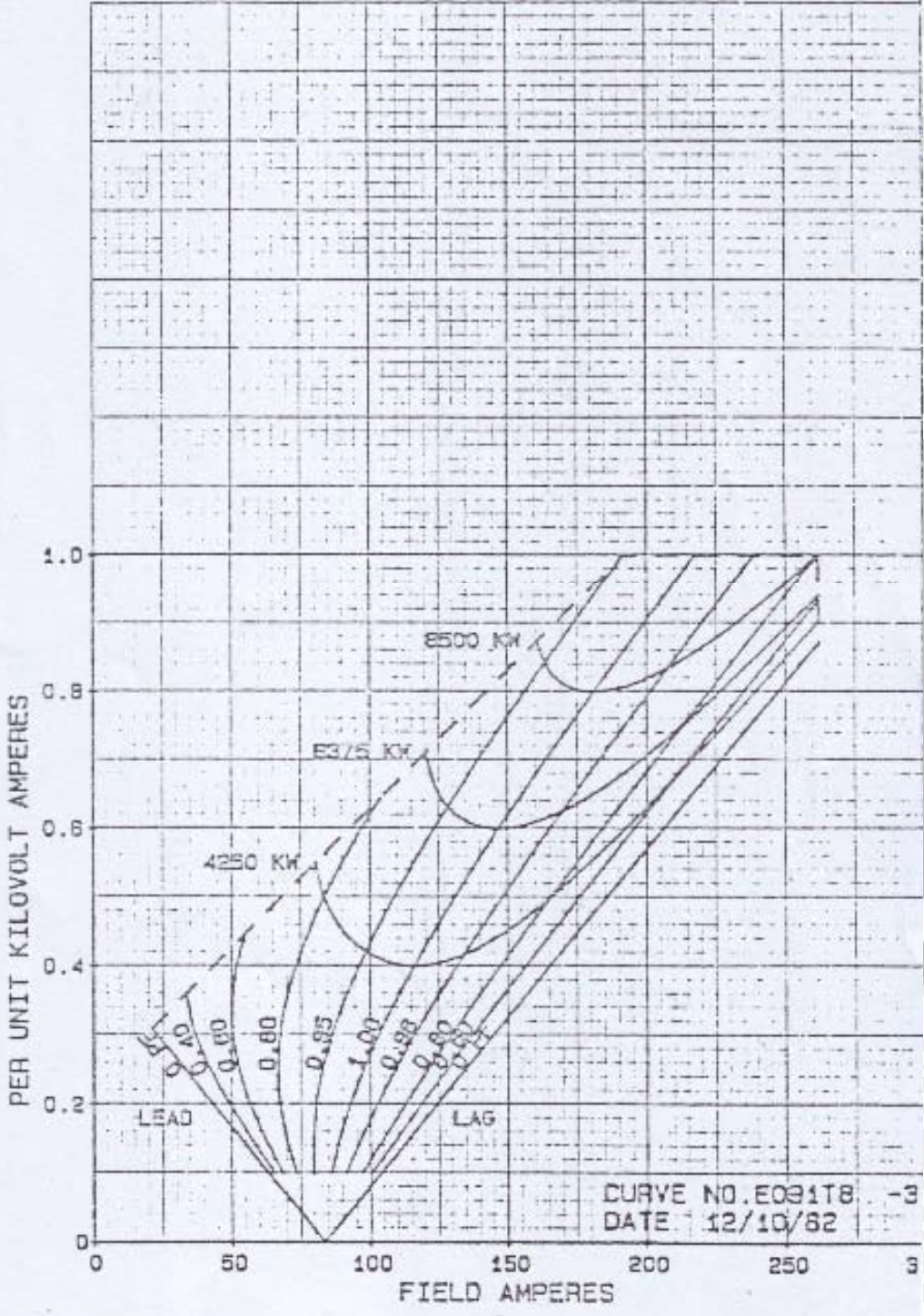
### ESTIMATED EXCITATION V CURVES

10625 KVA - 3000 RPM - 6000 VOLTS - 0.80 PF  
0.41 SCR - 0 FT ALT - 125 FLD VOLTS

50 X 90 DIV. - 6 X 9 IN.

GENERAL ELECTRIC COMPANY

MSTG (8-70)



CURVE NO. E031TB -3  
DATE 12/10/62



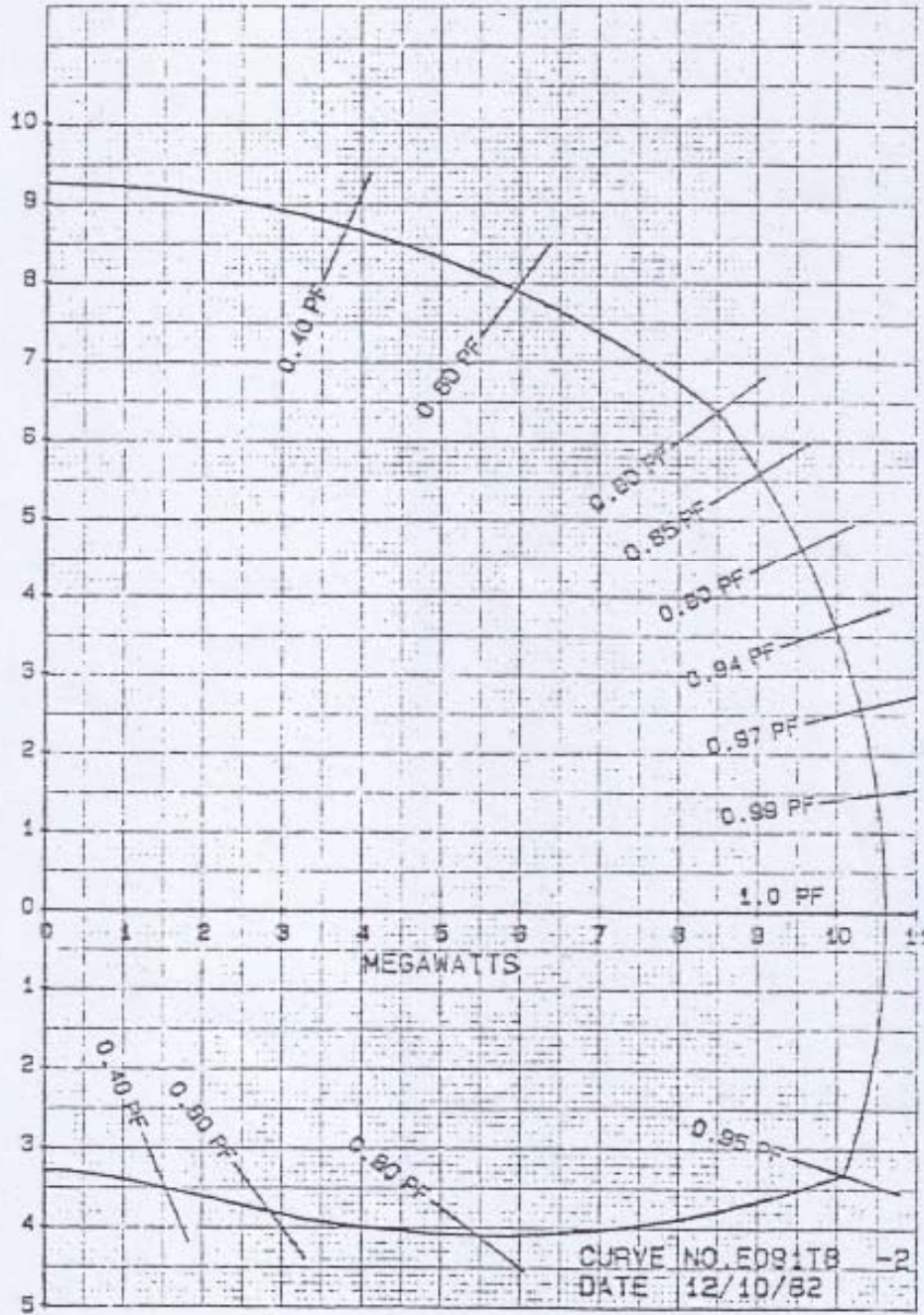
### ESTIMATED REACTIVE CAPABILITY CURVES 10625 KVA - 3000 RPM - 6000 VOLTS - 0.80 PF 0.41 SCR - 0 FT ALT - 125 FLD VOLTS

1 X 165 DIV. - 6 X IN.

GENERAL ELECTRIC COMPANY

MSTG (8-70)

LEAD ← MEGAVARS → LAG



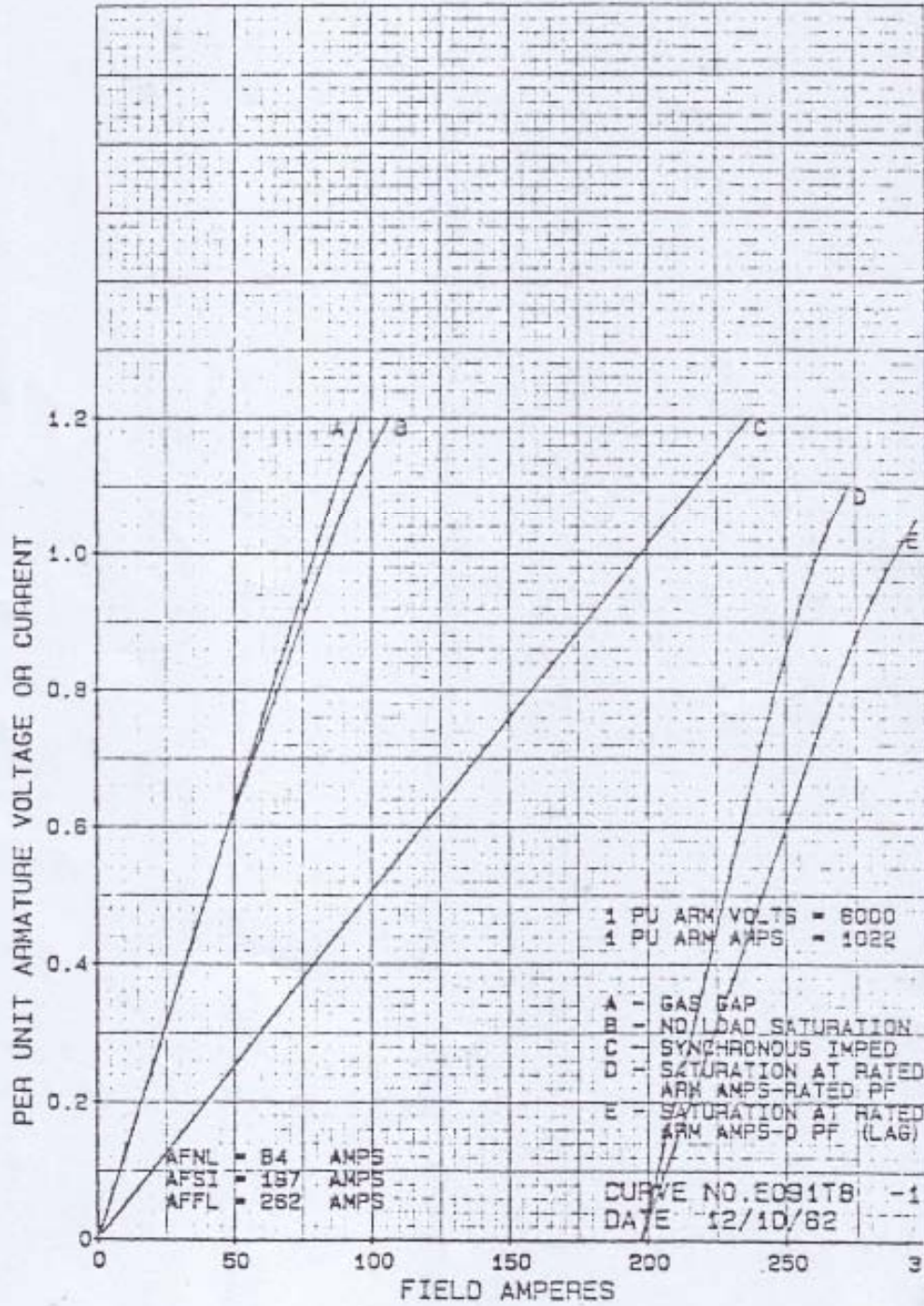


ESTIMATED SATURATION AND SYNCHRONOUS IMPEDANCE CURVES  
10625 KVA - 3000 RPM - 6000 VOLTS - 0.80 PF  
0.41 SCR - 0 FT ALT - 125 FLD VOLTS

X 90 DIV. - 6 X 6

GENERAL ELECTRIC COMPANY

M S T G (8-70)



Lampiran 6. Data generator TG-66

ESTIMATED GENERATOR DATA

GENERATOR NO. 316X510

NAMEPLATE DATA

2 Poles, 3 Phase, Wye Connected, 50 Hertz  
 Total temperature at rating guaranteed not to exceed:  
 140 C on armature by detector, 150 C on field by resistance  
 Maximum cold gas temperature: 40 C  
 Inlet water: 30 C

Rating: 14.375 KVA, 1383 Armature Amps, 6000 Armature Volts, 292 Field Amps  
 140 Excitation Volts, 0.80 Power Factor

DESIGN DATA

Maximum KVA One Cooler Out of Service ..... 11,500  
 No-Load Field Current ..... 85.6 Amperes  
 Three Phase Armature Winding Capacitance ..... 0.296 Microfarads  
 Armature Winding DC Resistance (per phase) ..... 0.01365 Ohms at 100 C  
 Field Winding DC Resistance ..... 0.438 Ohms at 125 C

~~COLLECTOR AND BRUSH DATA~~

~~Collector brushes: 12 per set BRUSHLESS~~      ~~Recommended Grade: National Carbon 634~~  
~~Collector minimum safe operating diameter: 305mm~~  
 Shaft grounding brushes: 2 per set      Recommended Grade: National Carbon 634  
 If brushes spark or chatter, refer to: GEK-35474

GAS COOLER DATA

Inlet water temperature: 30C      Water flow at rated load: 1.42m<sup>3</sup>/min  
 Head loss through cooler: 2.53m      Gas flow through generator: 392m<sup>3</sup>/min  
 Gas space in generator: 14.9m<sup>3</sup>

AIR FILTER

Type of Air Filter ..... Far Type 44  
 Size of Air Filter ..... 254 x 508 x 50mm  
 Number of Air Filters ..... 1





**REACTANCE DATA (PER UNIT)**

	DIRECT AXIS	QUADRATURE AXIS
Saturated Synchronous	(Xdv) 2.463	(Xqv) 2.274
Unsaturated Synchronous	(Xdi) 2.463	(Xqi) 2.274
Saturated Transient	(X'dv) 0.231	(X'q) 0.566
Unsaturated Transient	(X'di) 0.300	
Saturated Subtransient	(X''dv) 0.163	(X''qv) 0.155
Unsaturated Subtransient	(X''di) 0.216	(X''qi) 0.209
Saturated Negative Sequence	(X2v) 0.150	
Unsaturated Negative Sequence	(X2i) 0.200	
Saturated Zero Sequence	(X0v) 0.113	
Unsaturated Zero Sequence	(X0i) 0.129	
Leakage Reactance	(XLM,OEX) 0.172	
	(XLM,UEX) 0.172	

**Field Time Constant Data (Sec at 125 C)**

Open Circuit	(T'do)	4.849	(T''qo) 0.391
Three Phase Short Circuit Transient	(T'd3)	0.454	(T'q) 0.391
Line to Line Short Circuit Transient	(T'd2)	0.707	
Line to Neutral Short Circuit Transient	(T'd1)	0.678	
Short Circuit Subtransient	(T''d)	0.015	(T''q) 0.015
Open Circuit Subtransient	(T''do)	0.021	(T''qo) 0.057

**Armature DC Component Time Constant Data (Sec at 100 C)**

Three Phase Short Circuit	(Ta3)	0.088
Line to Line Short Circuit	(Ta2)	0.088
Line to Neutral Short Circuit	(Ta1)	0.080

**Per Unit Armature Winding Sequence Resistance Data**

Positive	(R1)	0.009
Negative	(R2)	0.027
Zero	(Ro)	0.017

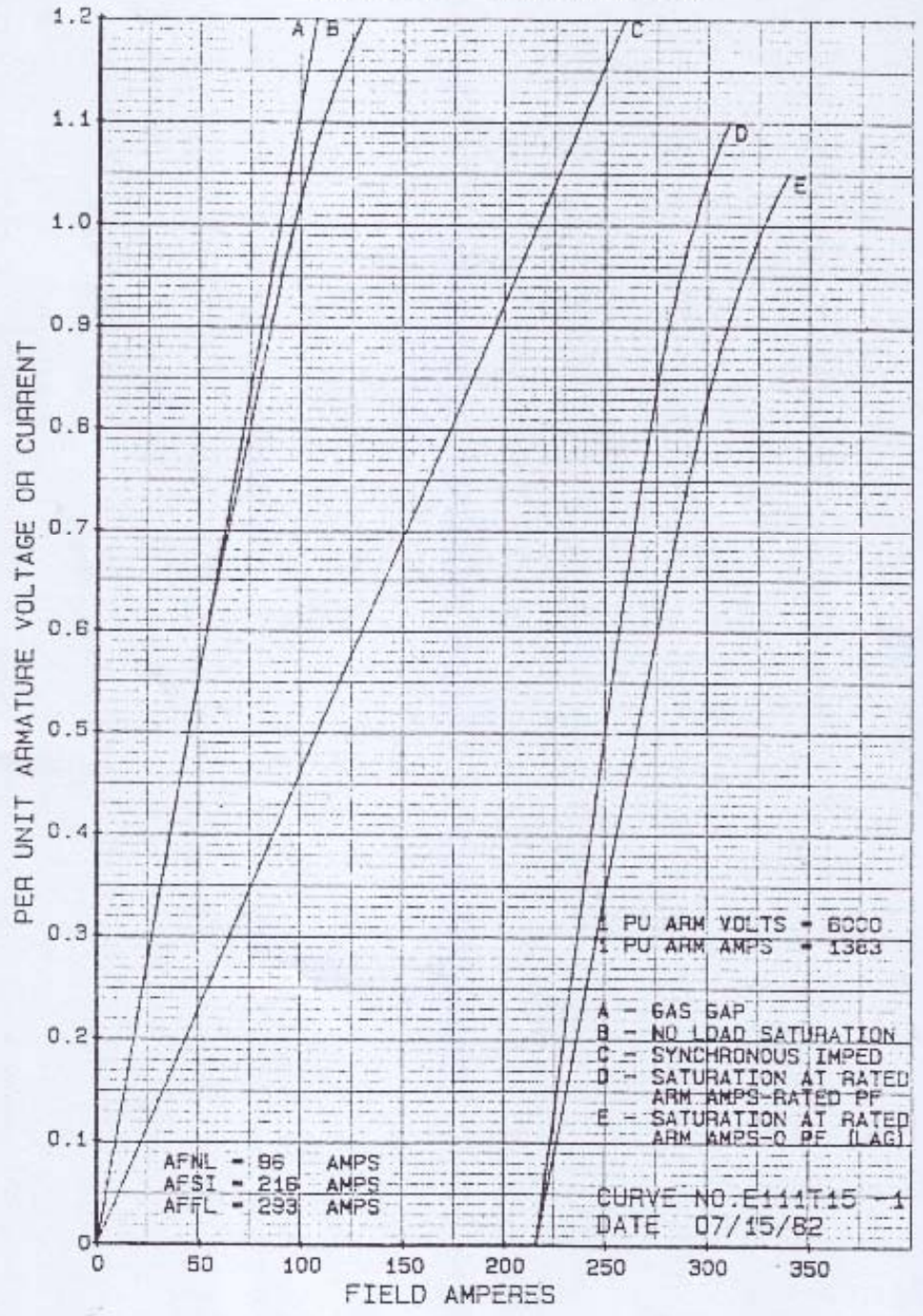
Rotor Short-Time Thermal Capacity ( $I_s$ ) <sup>2</sup> t	30
Turbine and Generator Combined Inertia Constant (H)	2.80 KW Sec/KVA
Three Phase Armature Winding Capacitance	0.296 Microfarads
Armature Winding DC Resistance (per phase)	0.01365 Ohms (100 C)
Field Winding DC Resistance	0.438 Ohms (125 C)
Field Current at Rated KVA, Rated Armature Voltage, Rated PF	292.5 Amps
Field Current at Rated KVA, Rated Armature Voltage, 0 PF Lagging	326.9 Amps*

\*This is not an allowable operating point for the generator. Value is supplied for systems study only.

ESTIMATED SATURATION AND SYNCHRONOUS IMPEDANCE CURVES  
 14375 KVA - 3000 RPM - 6000 VOLTS - 0.80 PF  
 0.43 SCR - 140 FLD VOLTS

GENERAL ELECTRIC COMPANY

M. S. T. G. (S-70)



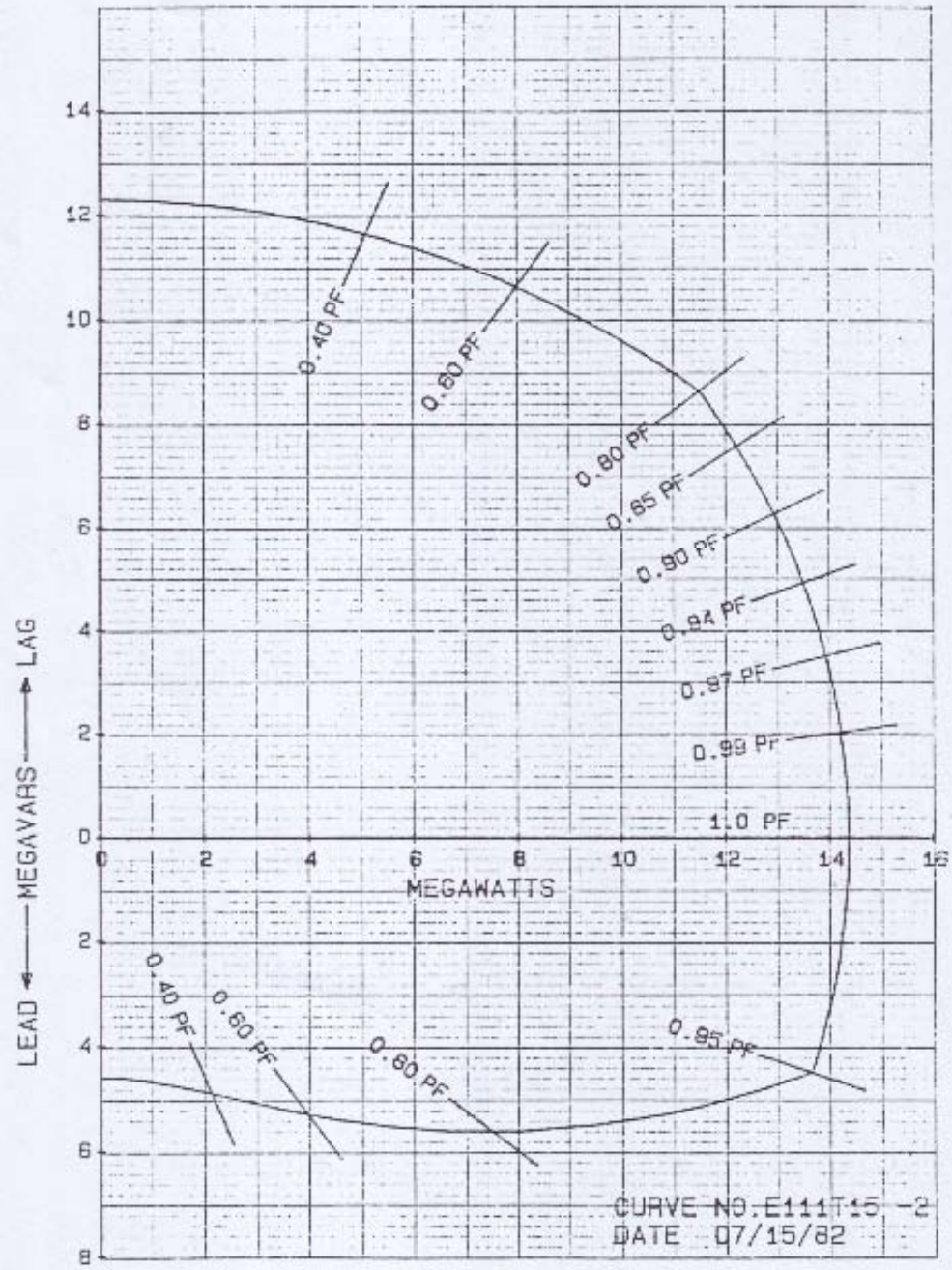




ESTIMATED REACTIVE CAPABILITY CURVES  
 14375 KVA - 3000 RPM - 6000 VOLTS - 0.80 PF  
 0.43 SCR - 140 FLD VOLTS

GENERAL ELECTRIC COMPANY

M S T G (8-70)



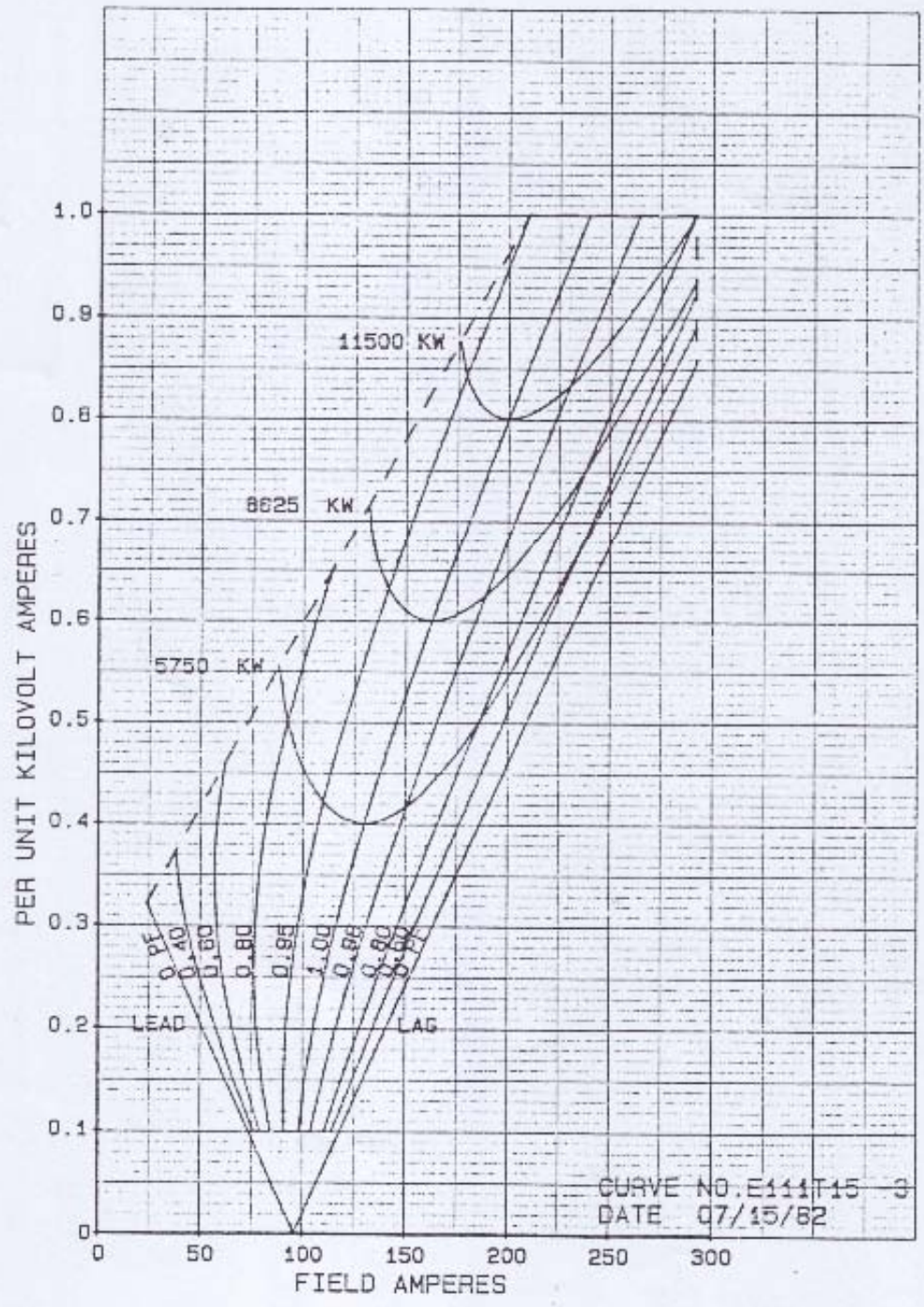
CURVE NO. E111T15 -2  
 DATE 07/15/82





ESTIMATED EXCITATION V CURVES  
14375 KVA - 3000 RPM - 6000 VOLTS - 0.80 PF  
0.43 SCR - 140 FLD VOLTS

GENERAL ELECTRIC COMPANY  
80" X 120" DIV. - 6 X 9 IN  
W 5 1 5 (8-7-0)





Lampiran 7. Spesifikasi transformator

SHEET NO. TS-TR-01

SPECIFICATION FOR TRANSFORMERS

R2

SPECIFICATION	ITEM	TR 51	TR 21	TR 61
	kVA	2000	1600	1250
1. Quantity		2	2	1
2. Type		oil immersed self cooled out door use. (conservator type)		
Manufacturer's type form		SOCU-DYC	SOCU-DYC	SOCU-DYC
3. Rating		continuous		
a. out put	(kVA)	2000	1600	1250
b. No. of phase		3		
c. frequency	(Hz)	50		
d. <sup>high</sup> primary voltage	(V)	F6300-F6150-F6000-F5850-F5700		
e. <sup>low</sup> secondary voltage	(V)	400		
f. connection		Δ / Y (DYN11) ✓		
g. polarity		subtractive		
h. rated power factor	(%)	100		
4. Applied Standard		IEC-76-----for performance JIS-----for materials(including bolts & nuts)		
5. Temperature Rise		at ambient temperature 40 °C		
	winding	65 °C (by the resistance method)		
	oil	60 °C (by the thermometer method)		
6. Dielectric Strength				
a. dielectric tests				
applied voltage		to other windings and ground		
	H. V. winding (KV)	20 Δ 20 Δ		
	L. V. winding (KV)	3 Δ 3 Δ		
induced voltage		2 times of normal voltage at 400 Hz 15 sec.		
b. impulse tests				
full wave	H. V. winding (KV)	60		
	L. V. winding (KV)	---		
chopped wave	H. V. winding (KV)	---		
	L. V. winding (KV)	---		

1/2

SPECIFICATION	ITEM	TR 51	TR 21	TR 61
7. Guaranteed Data			tolerance	
a. efficiency at full load & 100% P.F. (%)		98.79	98.61	98.46
b. total losses (W)		24400	22500	19550
iron losses (W)		2400	2000	1750
copper losses (W)		22000	20500	17800
c. voltage regulation at 100% P.F. (%)		1.69	1.68	1.71
d. no load current (%)		1.5	1.8	2.0
e. impedance (%)		10.0	8.5	7.5
R resistance (%)		1.03	1.13	1.27
X reactance (%)		3.97	2.40	2.43
8. Dimension				
a. over-all width (mm)		1655	1575	1575
b. over-all depth (mm)		2370	2170	2020
c. over-all height (mm)		2075	2075	1925
d. total weight with oil (kg)		6000	4800	4100
e. quantity of oil (l)		1400	1100	900
f. drawing No.		325-33/34303	325-33/34304	325-33/34305
9. Accessories				
.H.V. & L.V. bushing	.no-voltage tapchanger	.hand hole		
.name plate	.dehydrating breather	.earthing terminal		
.thermometer ( dial type)	.oil level gauge (flat type)	.valve (drain & filter)		
.foundation bolts	.lifting lugs	.pressure relief device		
.base (flat type)	.cable gland $\Delta$	.terminal box		
.H.V. cable box	.L.V. bus duct flange			
.conservator	.buchholz relay			
10. Remarks				
painting schedule - - - - refer to 325-43/37434				
REVISIONS		DATE REVISION CHECKED		
1	CHANGED APPLIED VOLTAGE & CABLE GLAND SPELL	07-01-23 K. J. ...		
2	CHANGED APPLIED VOLTAGE AGAIN AND ADDED VALUE OF RESISTANCE AND REACTANCE	07-01-23 K. J. ...		





SHEET NO. TS-TR-02

SPECIFICATION FOR TRANSFORMERS

R2

SPECIFICATION	ITEM	TR31	TR62
	kVA	1000	800
1. Quantity			
2. Type		oil immersed self cooled out door use. (conservator type)	
Manufacturer's type form		S0C11-DYC S0C11-DYC	
3. Rating		continuous	
a. out put (kVA)		1000	800
b. No. of phase		3	
c. frequency (Hz)		50	
d. <sup>high</sup> voltage (V)		F6300-F6150-F6000-F5850-F5700	
e. <sup>low</sup> voltage (V)		400	
f. connection		Δ/Y (Dy11)	
g. polarity		subtractive	
h. rated power factor (%)		100	
4. Applied Standard		IEC-76-----for performance JIS-----for materials(including bolts & nuts)	
5. Temperature Rise		at ambient temperature 40 °C	
winding		65 °C (by the resistance method)	
oil		60 °C (by the thermometer method)	
6. Dielectric Strength			
a. dielectric tests			
applied voltage		to other windings and ground	
H. V. winding (KV)		<del>20</del> <del>20</del> Δ 20 Δ	
L. V. winding (KV)		<del>3</del> <del>3</del> Δ 3 Δ	
induced voltage		2 times of normal voltage at 400 Hz 15 sec.	
b. impulse tests			
full wave	H. V. winding (KV)	60	
	L. V. winding (KV)	---	
chopped wave	H. V. winding (KV)	---	
	L. V. winding (KV)	---	

1/2



SPECIFICATION	ITEM	TR31	TR62
7. Guaranteed Data		tolerance	
a.	efficiency at full load & 100% P.F. (%)	98.40	98.36
b.	total losses (W)	16250	13300
	iron losses (W)	1650	1500
	copper losses (W)	14600	11800
c.	voltage regulation at 100% P.F. (%)	1.71	1.63
d.	no load current (%)	2.2	2.5
e.	impedance (%)	6.5	5.0
Δ	R resistance (%)	1.39	1.25
Δ	X resistance (%)	4.39	4.90
8. Dimension			
a.	overall width (mm)	1405	1365
b.	overall depth (mm)	1903	1843
c.	overall height (mm)	1825	1760
d.	total weight with oil (Kg)	3400	3000
e.	quantity of oil (l)	750	550
f.	drawing No.	325-3313/308	325-3313/307
9. Accessories			
.H.V. & L.V. bushing	.no-voltage tapchanger	.hand hole	
.name plate	.dehydrating breather	.searching terminal	
.thermometer (dial) type	.oil level gauge (T/AT type)		
.foundation bolts	.lifting lugs	.valve (drain & filter)	
.base (flat type)	.cable gland Δ		
.H.V. cable box	.L.V. bus duct flange	.pressure relief device	
.conservator	.buchholz relay	.terminal box	
10. Remarks			
painting schedule - - - - refer to 325-43187434 -- TR62			
refer to 325-43152506 -- TR31			
SVI	REVISIONS		DATE REVISIONS
Δ	CHANGED APPLIED VOLTAGE, CABLE HANDS SEE		7 JULY 2012 E. J. ...
Δ	CHANGED APPLIED VOLTAGE AGAIN AND ADDED VALUES OF RESISTANCE AND REACTANCE		28 OCT 2013 K. ...





SHEET NO. TS-TR-05

SPECIFICATION FOR TRANSFORMERS

R2

SPECIFICATION	ITEM	Tr 52,75	Tr 71,72	Tr 73
	kVA	315	250	400
1. Quantity		1 + 1	1 + 1	1
2. Type		oil immersed self cooled out door use. (Breathing type)		
Manufacturer's type form		SOU-DYC	SOU-DYC	SOU-DYC
3. Rating		continuous		
a. out put	(kVA)	315	250	400
b. No. of phase		3		
c. frequency	(Hz)	50		
d. <sup>HIGH</sup> primary voltage	(V)	F6300 - F6150 - R6000 - F5850 - F5700		
e. <sup>LOW</sup> secondary voltage	(V)	400		
f. connection		Δ / k (DY211)		
g. polarity		subtractive		
h. rated power factor	(%)	100		
4. Applied Standard		IEC - 76 ----- for performance JIS ----- for materials (including bolts & nuts)		
5. Temperature Rise		at ambient temperature 40 °C		
	winding	65 °C (by the resistance method)		
	oil	55 °C (by the thermometer method)		
6. Dielectric Strength				
a. dielectric tests				
applied voltage		to other windings and ground		
	H. V. winding (KV)	20 Δ		
	L. V. winding (KV)	3 Δ		
induced voltage		2 times of normal voltage at 400 Hz 15 sec.		
b. impulse tests				
full wave	H. V. winding (KV)	60		
	L. V. winding (KV)	---		
chopped wave	H. V. winding (KV)	---		
	L. V. winding (KV)	---		

1/2



SPECIFICATION	ITEM	TR 52.75	TR 71.72	TR 73
7. Guaranteed Data		tolerance		
a.	efficiency at full load & 100% P.F. (%)	98.06	98.0	98.11
b.	total losses (W)	6200	5100	7700
	iron losses (W)	1600	1400	2100
	copper losses (W)	4600	3700	5600
c.	voltage regulation at 100% P.F. (%)	1.6	1.65	1.55
d.	no load current (%)	5.5	5.5	5.0
e.	impedance (%)	4.0	3.5	4.5
Δ	r resistance (%)	1.37	1.20	1.22
Δ	x reactance (%)	3.74	3.34	4.33
8. Dimension				
a.	over-all width (mm)	860	860	945
b.	over-all depth (mm)	1325	1325	1445
c.	over-all height (mm)	1460	1460	1660
d.	total weight with oil (kg)	1320	1270	1900
e.	quantity of oil (ℓ)	270	280	420
f.	drawing No.	325-43155300-1	325-43155302-3	325-43155304
9. Accessories				
.H.V. & L.V. bushing		.no-voltage tapchanger	.hand hole	
.name plate		.dehydrating breather	.earthing terminal	
.thermometer & oil level gauge			.valve (drain)	
.foundation bolts		.lifting lugs		
.base (flat type)		.cable gland Δ		
.H.V. bus duct flange		.L.V. bus duct flange		
10. Remarks				
painting schedule ----- refer to 325-43137474				
REV	REVISIONS	DATE	REVISED	CHECKED
Δ	CHANGED APPLIED VOLTAGE & CABLE GLAND'S SPELL	10 JULY 1973	W. K. S.	A. G. S.
Δ	CHANGED APPLIED VOLTAGE AGAIN AND ADDED VALUE OF RESISTANCE AND REACTANCES	10 JULY 1973	W. K. S.	A. G. S.





SHEET NO. TS-TR-03

SPECIFICATION FOR TRANSFORMERS

R.2

SPECIFICATION	ITEM	TR11, TR65
	kVA	630
1. Quantity		1 + 1
2. Type		oil immersed self cooled out door use. (breathing type)
Manufacturer's type form		<del>630</del> 504-DYC $\Delta$
3. Rating		continuous
a. out put (kVA)		<del>504-DYC</del> 630 $\Delta$
b. No. of phase		3
c. frequency (Hz)		50
d. <sup>High</sup> primary voltage (V)		<del>76300</del> - <del>6150</del> - <del>6000</del> - <del>5850</del> - <del>5700</del>
e. <sup>LOW</sup> secondary voltage (V)		400
f. connection		$\Delta / Y$ (DY11)
g. polarity		subtractive
h. rated power factor (%)		100
4. Applied Standard		IEC-78.....for performance JIS.....for materials(including bolts & nuts)
5. Temperature Rise		at ambient temperature 40 °C
winding		65 °C (by the resistance method)
oil		55 °C (by the thermometer method)
6. Dielectric Strength		
a. dielectric tests		
applied voltage		to other windings and ground
H. V. winding (KV)		<del>20</del> $\Delta$ 20 $\Delta$
L. V. winding (KV)		<del>3</del> $\Delta$ 3 $\Delta$
induced voltage		2 times of normal voltage at 400 Hz 15 sec.
b. impulse tests		
full wave	H. V. winding (KV)	60
	L. V. winding (KV)	—
chopped wave	H. V. winding (KV)	—
	L. V. winding (KV)	—

1/2



SPECIFICATION	ITEM	TR11. TR65	tolerance
<b>7. Guaranteed Data</b>			
a. efficiency at full load & 100% P.F. (%)		98.11	
b. total losses (W)		12100	
iron losses (W)		2700	
copper losses (W)		9400	
c. voltage regulation at 100% P.F. (%)		1.62	
d. no load current (%)		4.0	
e. impedance (%)		4.5	
Δ r. reactance (%)		1.23	
Δ s. reactance (%)		4.31	
<b>8. Dimension</b>			
a. over-all width (mm)		1820	
b. over-all depth (mm)		1625	
c. over-all height (mm)		1685	
d. total weight with oil (Kg)		2600	
e. quantity of oil (l)		550	
f. drawing No.		325-33/3/303-9	
<b>9. Accessories</b>			
.H.V. & L.V. bushing	.no-voltage tapchanger	.hand hole	
.name plate	.dehydrating breather	.searching terminal	
.thermometer ( dia type)	.oil level gauge ( rod type)	.valve (drain)	
.foundation bolts	.lifting lugs	.terminal box	
.base (flat type)	.cable gland Δ		
.H.V. cable box	.L.V. cable box		
<b>10. Remarks</b>			
painting schedule ----- refer to 325-43/37434			
<b>REVISIONS</b>			
Δ	CHANGED APPLIED VOLTAGE & CABLE GLAND SPELL	07-JUL-82	K. J. ...
Δ	REVISED MANUFACTURER'S TYPE FORM AND OUT PUT (KVA)		
Δ	CHANGED APPLIED VOLTAGE AGAIN AND ADDED VALUE OF RESISTANCE AND REACTANCE	25-SEP-83	K. J. ...





## Lampiran 8. Spesifikasi kabel saluran

### XLPE Insulated, Copper Tape Shielded and PVC Sheathed Cables

#### 6/10 (12) kV XLPE/PVC 3 x (25 - 300)mm<sup>2</sup>

##### CONSTRUCTION DATA

No. of Core	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Nom. Cross-section area	mm <sup>2</sup>	25	36	50	70	96	120	150	185	240	300
No. of Wire	-	7	7	19	19	19	37	37	37	37	61
Diameter of Conductor, approx. *)	mm	5.9	7.1	8.1	9.7	11.6	12.9	14.3	16.0	18.3	20.7
Nom. Thick. of Insulation	mm	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
Nom. Thick. of Copper tape	mm	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Nom. Thick. of Outer sheath	mm	2.2	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.3
Overall Diameter of cable	mm	39.5	42.5	45.0	48.5	53.0	56.0	59.0	63.5	68.5	74.0
Weight of cable, approx.	kg/km	1664	2260	2596	3433	4387	5203	6150	7350	9173	11160

##### ELECTRICAL DATA

AC Voltage test for 5 min.	kV	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Partial Discharge test of max. 10pC	kV	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38	10.38
DC Resistance at 20°C	Ω/km	0.727	0.524	0.387	0.288	0.193	0.153	0.124	0.0961	0.0754	0.0601
AC Resistance at 90°C	Ω/km	0.927	0.669	0.494	0.343	0.247	0.197	0.160	0.1281	0.0984	0.0799
Insulation Resistance at 20°C	M.Ω.km	3000	2500	2600	2000	2000	2000	2000	1600	1600	1500
Capacitance	µF/km	0.202	0.226	0.246	0.278	0.316	0.341	0.368	0.401	0.446	0.492
Inductance	mH/km	0.389	0.367	0.352	0.332	0.315	0.306	0.296	0.287	0.277	0.269
Reactance	Ω/km	0.122	0.115	0.110	0.104	0.099	0.096	0.093	0.090	0.087	0.084
Current Carrying Capacity :											
- Buried direct **)	A	129	153	181	221	262	296	334	377	434	489
- In Air at 20°C											
- In Air at 30°C	A	142	170	204	253	304	351	398	455	531	606
Short circuit current rating at 1 sec. (approx.)	kA	3.5	4.9	7.0	9.8	13.3	16.8	21.1	26.0	33.8	42.3

Note : \*) Diameter compacted shape  
 \*\*) Thermal resistivity of soil : 1.5°K.m / W  
 Depth of laying = 0.8 m

(B-2)