

## LAPORAN PENELITIAN

# ANALISIS GENERATOR INDUKSI PENGUATAN SENDIRI DENGAN KOMPENSASI TEGANGAN MENGUNAKAN KAPASITOR



MILIK PERPUSTAKAAN UNIV. NEGERI PADANG

DIYERINA TEL. : 28-8-2001

SUMBER/HARGA. Hd /

KOLEKSI : KI

NO. INVENTARIS : 1971E/2001-00 (ca)

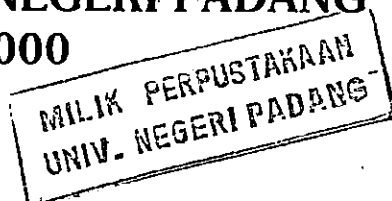
Oleh : KLASIFIKASI : G21.31 AH7 - a (17)

Oleh :

**Drs. Ahyanuardi, M.T**

Penelitian ini dibiayai oleh :  
Dana Rutin Universitas Negeri Padang  
Tahun Anggaran 2000  
Surat Perjanjian Kerja Nomor : 1498/K12/KU/Rutin/2000  
Tanggal 1 Mei 2000

**UNIVERSITAS NEGERI PADANG  
2000**





## ABSTRAK

Dalam penelitian ini, dipresentasikan konfigurasi rangkaian generator induksi tiga fasa penguatan sendiri dengan kompensasi tegangan menggunakan kapasitor. Sistem terdiri dari dua kapasitor, yaitu kapasitor shunt dan kapasitor seri. Kapasitor shunt berfungsi untuk eksitasi dan kapasitor yang diserikan di sisi beban berfungsi untuk kompensasi tegangan keluaran.

Analisis generator induksi dilakukan saat kondisi steady-state. Suatu metodologi untuk memilih nilai kapasitor seri dijelaskan secara rinci. Performance generator induksi hubungan short shunt dibandingkan dengan performance generator induksi hubungan long shunt, yang memperlihatkan keunggulan dari konfigurasi short shunt. Penelitian dilakukan terhadap mesin induksi 3 fasa, 4 kutub, 220/380 volt ( $\Delta/Y$ ), 15.1/9.1 amper ( $\Delta/Y$ ), 4 Kw.

Untuk membuktikan validitas metode yang diusulkan, dilakukan pengujian laboratorium. Antara hasil eksperimen laboratorium dan simulasi komputer terdapat kesesuaian yang sangat baik.

## PENGANTAR

Kegiatan penelitian merupakan bagian dari darma perguruan tinggi, di samping pendidikan dan pengabdian kepada masyarakat. Kegiatan penelitian ini harus dilaksanakan oleh Universitas Negeri Padang yang dikerjakan oleh staf akademiknya ataupun tenaga fungsional lainnya dalam rangka meningkatkan mutu pendidikan, melalui peningkatan mutu staf akademik, baik sebagai dosen maupun peneliti.

Kegiatan penelitian mendukung pengembangan ilmu serta terapannya. Dalam hal ini, Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang berusaha mendorong dosen untuk melakukan penelitian sebagai bagian yang tidak terpisahkan dari kegiatan mengajarnya, baik yang secara langsung dibiayai oleh dana Universitas Negeri Padang maupun dana dari sumber lain yang relevan atau bekerja sama dengan instansi terkait. Oleh karena itu, peningkatan mutu tenaga akademik peneliti dan hasil penelitiannya dilakukan sesuai dengan tingkatan serta kewenangan akademik peneliti.

Kami menyambut gembira usaha yang dilakukan peneliti untuk menjawab berbagai permasalahan pendidikan, baik yang bersifat interaksi berbagai faktor yang mempengaruhi praktek kependidikan, penguasaan materi bidang studi, ataupun proses pengajaran dalam kelas yang salah satunya muncul dalam kajian ini. Hasil penelitian seperti ini jelas menambah wawasan dan pemahaman kita tentang proses pendidikan. Walaupun hasil penelitian ini mungkin masih menunjukkan beberapa kelemahan, namun kami yakin hasilnya dapat dipakai sebagai bagian dari upaya peningkatan mutu pendidikan pada umumnya. Kami mengharapkan di masa yang akan datang semakin banyak penelitian yang hasilnya dapat langsung diterapkan dalam peningkatan dan pengembangan teori dan praktek kependidikan.

Hasil penelitian ini telah ditelaah oleh tim pereviu usul dan laporan penelitian Lembaga Penelitian Universitas Negeri Padang, yang dilakukan secara "blind reviewing". Kemudian untuk tujuan diseminasi, hasil penelitian ini telah diseminarkan yang melibatkan dosen/tenaga peneliti Universitas Negeri Padang sesuai dengan fakultas peneliti. Mudah-mudahan penelitian ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pada umumnya, dan peningkatan mutu staf akademik Universitas Negeri Padang.

Pada kesempatan ini kami ingin mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang membantu terlaksananya penelitian ini, terutama kepada pimpinan lembaga terkait yang menjadi objek penelitian, responden yang menjadi sampel penelitian, tim pereviu Lembaga Penelitian dan dosen senior pada setiap fakultas di lingkungan Universitas Negeri Padang yang menjadi pembahas utama dalam seminar penelitian. Secara khusus kami menyampaikan terima kasih kepada Rektor Universitas Negeri Padang yang telah berkenan memberi bantuan pendanaan bagi penelitian ini. Kami yakin tanpa dedikasi dan kerjasama yang terjalin selama ini, penelitian ini tidak akan dapat diselesaikan sebagaimana yang diharapkan dan semoga kerjasama yang baik ini akan menjadi lebih baik lagi di masa yang akan datang.

Terima kasih.



Padang, Desember 2000  
Ketua Lembaga Penelitian  
Universitas Negeri Padang,

*Kumaidi*  
Prof. Drs. Kumaidi, MA., Ph.D.  
NIP 130605231

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK</b>	<b>i</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>iii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>vii</b>
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan	3
1.3. Tujuan Penelitian	3
1.4. Pembatasan Masalah	3
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>4</b>
2.1. Umum	4
2.2. Prinsip Kerja dan Proses Pembangkitan Tegangan	4
2.3. Diagram Lingkaran Generator Induksi	8
2.4. Diagram Aliran Daya Nyata	9
2.5. Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi	10
2.5.1. Pembebanan Dengan Faktor Kerja Satu	11
2.5.2. Pembebanan Dengan Faktor Kerja Terbelakang (leading)	12
2.5.3. Pembebanan Dengan Faktor Kerja Terdahulu (lagging)	13
<b>BAB III. METODE PENELITIAN</b>	<b>14</b>
3.1. Umum	14
3.2. Generator Induksi Dengan Hubungan Short-Shunt	16
3.2.1. Perhitungan Frekuensi Keluaran dan Reaktansi Magnetisasi Generator Induksi Dengan Hubungan Short-Shunt	18
3.2.2. Kapasitor Eksitasi dan Kompensasi	21
3.2.3. Persamaan Tegangan, Arus dan Daya	23

3.3.	Generator Induksi Dengan Hubungan Long-Shunt	23
3.3.1.	Perhitungan Frekuensi Keluaran dan Reaktansi Magnetisasi Generator Induksi Hubungan Long-Shunt	24
3.3.2.	Kapasitor Eksitasi dan Kompensasi	27
3.3.3.	Persamaan Tegangan, Arus dan Daya	27
3.4.	Kurva Karakteristik Magnetisasi	28
<b>BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		<b>30</b>
4.1.	Pengukuran Parameter Mesin	30
4.1.1.	Percobaan Sumber Arus Searah	30
4.1.2.	Percobaan Beban Nol	31
4.1.3.	Percobaan Hubung Singkat	33
4.2.	Perhitungan Parameter Dalam Per Umit	34
4.3.	Kurva Magnetisasi	35
4.4.	Hasil Simulasi dan Percobaan	37
4.4.1.	Generator Induksi Tanpa Kompensasi	38
4.4.2.	Generator Induksi Dengan Hubungan Short-Shunt	40
4.4.3.	Generator Induksi Dengan Hubungan Long-Shunt	42
4.5.	Pembahasan	44
4.5.1.	Pengaruh Kapasitor Seri Terhadap Tegangan Beban	44
4.5.2.	Pengaruh Kapasitor Seri Terhadap Arus Stator	45
4.5.3.	Pengaruh Kapasitor Seri Terhadap Frekuensi	45
<b>BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN</b>		<b>46</b>
5.1.	Kesimpulan	46
5.2.	Saran	47
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		<b>48</b>

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Skema prinsip kerja generator induksi	5
Gambar 2.2. Rangkaian proses pembangkitan tegangan	6
Gambar 2.3. Rangkaian pengganti per fasa generator induksi	6
Gambar 2.4. Proses pembangkitan tegangan	7
Gambar 2.5. Tegangan fungsi kapasitor eksitasi	8
Gambar 2.6. Diagram lingkaran generator induksi	8
Gambar 2.7. Diagram aliran daya nyata	9
Gambar 2.8. Diagram vektor tegangan	10
Gambar 2.9. Tegangan fungsi arus eksitasi dengan faktor kerja satu	11
Gambar 2.10. Tegangan fungsi arus eksitasi dengan faktor kerja terbelakang	12
Gambar 2.11. Tegangan fungsi arus eksitasi dengan faktor kerja terdahulu	13
Gambar 3.1. Rangkaian generator induksi hubungan short shunt	16
Gambar 3.2. Rangkaian ekivalen per fasa generator induksi hubungan short shunt	16
Gambar 3.3. Rangkaian ekivalen per fasa generator induksi hubungan short shunt pada frekuensi dasar	17
Gambar 3.4. Rangkaian ekivalen generator induksi tanpa beban	22
Gambar 3.5. Rangkaian generator induksi hubungan long shunt	23
Gambar 3.6. Rangkaian ekivalen per fasa generator induksi hubungan long shunt pada frekuensi dasar	24
Gambar 3.7. Grafik untuk menentukan kapasitor eksitasi dan kompensasi generator induksi hubungan long shunt	27
Gambar 3.8. Rangkaian ekivalen pengujian beban nol	29
Gambar 4.1. Pengukuran tahanan stator per fasa	31
Gambar 4.2. Rangkaian percobaan beban nol	31
Gambar 4.3. Rangkaian ekivalen beban nol	32

Gambar 4.4. Rangkaian ekivalen hubung singkat	33
Gambar 4.5. Rangkaian percobaan karakteristik magnetisasi	35
Gambar 4.6. Kurva magnetisasi	36
Gambar 4.7. Linierisasi kurva magnetisasi	37
Gambar 4.8. Tegangan beban fungsi daya keluaran	38
Gambar 4.9. Arus stator fungsi daya keluaran	39
Gambar 4.10. Arus eksitasi fungsi daya keluaran	39
Gambar 4.11. Frekuensi fungsi daya keluaran	39
Gambar 4.12. Kurva regulasi tegangan generator induksi hubungan short shunt	40
Gambar 4.13. Frekuensi fungsi daya keluaran\ generator induksi hubungan short shunt	41
Gambar 4.14. Tegangan beban fungsi daya keluaran generator induksi hubungan short shunt	41
Gambar 4.15. Arus eksitasi fungsi daya keluaran generator induksi hubungan short shunt	41
Gambar 4.16. Arus stator fungsi daya keluaran generator induksi hubungan short shunt	42
Gambar 4.17. Frekuensi fungsi daya keluaran generator induksi hubungan long shunt	43
Gambar 4.18. Tegangan beban fungsi daya keluaran generator induksi hubungan long shunt	43
Gambar 4.19. Arus eksitasi fungsi daya keluaran generator induksi hubungan short shunt	43
Gambar 4.20. Arus stator fungsi daya keluaran generator induksi hubungan short shunt	44



## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1. Data karakteristik magnetisasi	36
Tabel 4.2. Data hasil simulasi dengan beban diatur $C_{eks} = 80 \mu F$ , putaran tetap 1 p.u	38
Tabel 4.3. Data hasil pengamatan dengan beban diatur $C_{eks} = 80 \mu F$ , putaran tetap 1 p.u	38
Tabel 4.4. Data hasil simulasi generator induksi hubungan short shunt saat putaran tetap 1 p.u dengan kapasitor eksitasi $80 \mu F$ dan kapasitor kompensasi $150 \mu F$	40
Tabel 4.5. Data hasil pengamatan generator induksi hubungan short shunt saat putaran tetap 1 p.u dengan kapasitor eksitasi $80 \mu F$ dan kapasitor kompensasi $150 \mu F$	40
Tabel 4.6. Data hasil simulasi generator induksi hubungan long shunt saat putaran tetap 1 p.u dengan kapasitor eksitasi $120 \mu F$ dan kapasitor kompensasi $250 \mu F$	42
Tabel 4.7. Data hasil pengamatan generator induksi hubungan long shunt saat putaran tetap 1 p.u dengan kapasitor eksitasi $120 \mu F$ dan kapasitor kompensasi $250 \mu F$	42

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1. LATAR BELAKANG

Untuk menggerakkan pembangkit tenaga listrik dibutuhkan sumber-sumber energi yang dapat digunakan sebagai penggerak mula. Namun akhir-akhir ini cadangan sumber energi yang tak terbarukan seperti minyak, gas bumi, batubara dan lain-lain yang digunakan sebagai sumber energi penggerak mula dari pusat pembangkit dirasakan semakin menipis [4]. Oleh sebab itu perlu dilakukan pengkajian mengenai pemanfaatan potensi energi.

Di Indonesia saat ini masih banyak daerah yang sulit dijangkau oleh jaringan sistem tenaga listrik yang dihasilkan Perusahaan Listrik Negara (PLN), baik secara teknis maupun secara ekonomis. Di lain pihak daerah tersebut mempunyai sumber energi yang dapat dirubah menjadi energi listrik yang dibutuhkan oleh masyarakat pedesaan. Salah satu sumber energi yang banyak terdapat dan belum dimanfaatkan secara maksimal oleh masyarakat desa adalah tenaga air atau angin.

Mesin induksi dalam prinsip dapat digunakan sebagai generator dengan beberapa keuntungan seperti dapat digerakkan dengan kecepatan putaran yang bervariasi, tidak memerlukan sumber arus searah untuk penguatan dan tidak memerlukan tenaga ahli untuk pengoperasian. Keuntungan lain dari mesin induksi adalah konstruksi kokoh, biaya pemeliharaan yang rendah, konstruksi rotor sangkar tanpa sikat serta harga yang lebih murah bila dibandingkan dengan mesin sinkron dan mesin arus searah.

Untuk membangkitkan tegangan generator induksi penguatan sendiri membutuhkan daya reaktif kapasitif sebagai sumber eksitasi. Daya reaktif kapasitif ini dapat diperoleh dari jala-jala atau dari kapasitor yang dihubungkan dengan terminal stator generator. Kapasitor ini berfungsi sebagai pembangkit daya reaktif untuk menghasilkan fluksi magnetisasi di celah udara [1-8].

Analisis generator induksi penguatan sendiri dengan menggunakan kapasitor telah banyak dipresentasikan. Dalam [4,5,6,7], analisis generator induksi penguatan sendiri melibatkan parameter mesin, kecepatan putaran rotor, kapasitansi eksitasi dan impedansi beban. Metode yang digunakan untuk menganalisis generator induksi penguatan sendiri adalah rangkaian ekuivalen per fasa dengan metode impedansi loop.

Dari hasil analisis performance steady-state generator induksi penguatan sendiri dengan beban statis yang dilakukan dalam [4,5], ternyata tegangan keluaran generator turun secara cepat atau hilang secara tiba-tiba bila arus beban dinaikkan. Regulasi tegangan dapat mencapai 30 %.

Penurunan tegangan generator induksi penguatan sendiri dapat diatasi dengan memasang kapasitor eksitasi yang cukup besar, tapi mengakibatkan arus yang mengalir di stator akan melebihi nilai nominalnya. Arus stator yang melebihi nilai nominal akan merusak generator induksi tersebut.

Dalam referensi [1] telah dikemukakan suatu konfigurasi rangkaian generator induksi tiga fasa penguatan sendiri dengan kompensasi tegangan keluaran. Kompensasi tegangan keluaran didapat dari pemasangan kapasitor yang dihubungkan secara seri di sisi stator. Dalam konfigurasi yang diusulkan [1], mesin hanya dinyatakan dengan reaktansi magnetisasi. Analisis menggunakan rangkaian ekuivalen per fasa dengan metode admitansi nodal. Dari penelitian yang dilakukan terhadap mesin induksi 3 fasa, 4 kutub, 60 Hz, 3 HP, 220 V (hubungan delta) diperoleh tegangan beban sebesar 115 Volt dengan regulasi tegangan diatas 4 %.

Referensi [6] juga melakukan penelitian dengan konfigurasi yang sama dengan [1], tapi tidak mengabaikan reaktansi stator, reaktansi rotor, tahanan stator dan tahanan rotor. Analisis juga menggunakan rangkaian ekuivalen per fasa dengan metode impedansi loop. Dari penelitian yang dilakukan terhadap mesin induksi 3 fasa, 4 kutub, 50 Hz, 380 V, 5.4 A, 2 Kw mendapatkan tegangan 205 V dengan regulasi sebesar 1.9 %.

Dalam penelitian ini, diusulkan suatu bentuk konfigurasi rangkaian generator induksi tiga fasa penguatan sendiri dengan kompensasi tegangan keluaran tanpa pengabaian reaktansi stator, reaktansi rotor, tahanan stator dan tahanan rotor. Kompensasi tegangan keluaran didapat dengan pemasangan kapasitor yang dihubungkan secara seri di sisi beban. Analisis dilakukan untuk beban statis menggunakan rangkaian ekivalen per fasa dengan metode impedansi loop.

## **1.2. PERMASALAHAN**

Permasalahan generator induksi adalah terjadinya penurunan tegangan terminal secara cepat atau tegangan akan hilang dengan tiba-tiba bila beban bertambah, sesuai dengan analisis yang dilakukan dalam [4,5]. Penurunan tegangan ini terjadi karena arus eksitasi menjadi kecil yang disebabkan oleh penurunan tegangan terminal. Oleh sebab itu perlu didisain suatu konfigurasi rangkaian yang dapat menghasilkan tegangan yang maksimum dengan regulasi tegangan yang rendah.

## **1.3. TUJUAN PENELITIAN**

Tujuan penelitian ini adalah untuk:

1. Menganalisis generator induksi tiga fasa penguatan sendiri hubungan short-shunt.
2. Menganalisis generator induksi tiga fasa penguatan sendiri hubungan long-shunt.
3. Membandingkan hasil simulasi dan pengamatan laboratorium dari kedua konfigurasi tersebut.

## **1.4. PEMBATAAN MASALAH**

Pembatasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Analisis dilakukan dalam kondisi steady state,
2. Generator induksi dibebani dengan beban statis,
3. Semua parameter mesin diasumsikan tetap,
4. Rugi inti, gesekan dan angin diabaikan,
5. Kapasitor eksitasi yang dianalisis hubungan bintang (Y),
6. Tidak membahas masalah pengaturan.

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1. Umum**

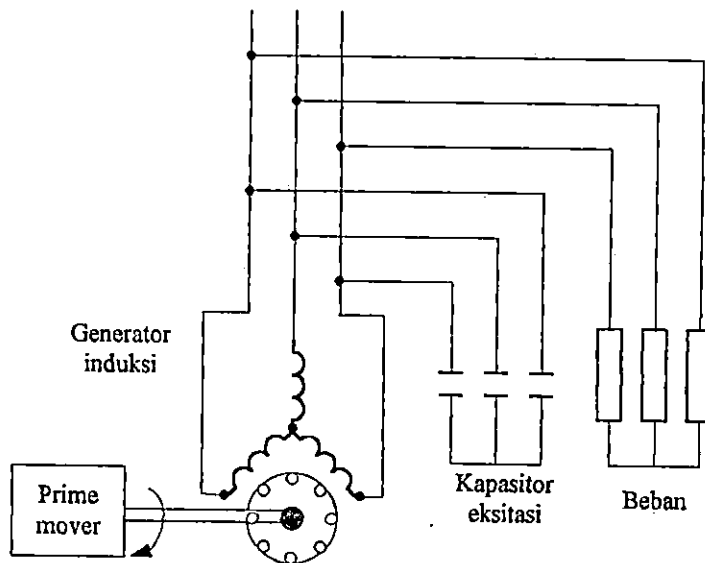
Mesin induksi dapat dioperasikan sebagai motor maupun sebagai generator. Bila dioperasikan sebagai motor, mesin induksi harus dihubungkan dengan sumber tegangan (jala-jala), daya mengalir dari jala-jala ke motor dan mesin bekerja dengan slip lebih besar dari nol sampai satu ( $0 \leq s \leq 1$ ). Jika mesin induksi dioperasikan sebagai generator, daya akan mengalir dari mesin induksi dan akan bekerja dengan slip yang lebih kecil dari nol ( $s < 0$ ).

Untuk mengoperasikan mesin induksi sebagai generator diperlukan daya mekanis untuk memutar rotor dan sumber daya reaktif untuk memenuhi kebutuhan arus eksitasi. Kebutuhan daya reaktif dapat diperoleh dari jala-jala atau dari suatu kapasitor. Tanpa adanya daya reaktif, mesin induksi yang dioperasikan sebagai generator tidak menghasilkan tegangan. Jika generator induksi terhubung dengan jala-jala, maka kebutuhan daya reaktif diambil dari jala-jala.

Namun bila generator induksi tidak terhubung dengan jala-jala, maka kebutuhan daya reaktif dapat disediakan dari suatu unit kapasitor. Kapasitor tersebut dihubungkan paralel dengan terminal keluaran generator. Kapasitor yang dipasang harus mampu memberikan daya reaktif yang dibutuhkan untuk menghasilkan fluksi di celah udara. Karena generator dapat melakukan eksitasi sendiri dinamakan generator induksi penguatan sendiri.

#### **2.2. Prinsip Kerja dan Proses Pembangkitan Tegangan**

Rangkaian generator induksi penguatan sendiri diperlihatkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Skema Prinsip Kerja Generator Induksi Penguatan Sendiri

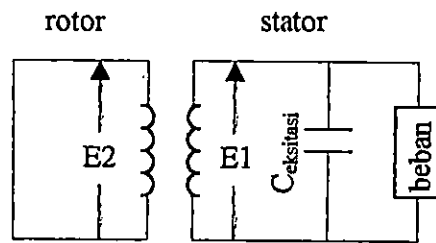
Untuk mengoperasikan mesin induksi sebagai generator dibutuhkan daya mekanis sebagai penggerak mula yang akan memutar rotor. Putaran rotor yang digerakkan oleh daya mekanis tersebut harus lebih besar dari kecepatan medan putar stator atau kecepatan sinkron. Dengan putaran rotor yang melebihi kecepatan sinkron dapat dikatakan bahwa generator induksi penguatan sendiri bekerja dengan slip negatif, seperti diperlihatkan dalam persamaan (2.1).

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.1)$$

dengan :

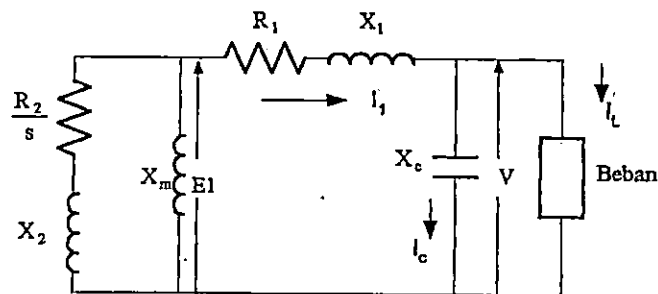
- s : slip
- $n_s$  : kecepatan sinkron
- $n_r$  : kecepatan putaran rotor

Syarat utama terbangkitnya tegangan generator induksi adalah adanya remanensi di rotor atau kapasitor eksitasi yang digunakan harus sudah mempunyai muatan listrik terlebih dahulu. Remanensi atau muatan kapasitor merupakan tegangan awal yang diperlukan untuk proses pembangkitan tegangan selanjutnya. Proses pembangkitan tegangan akan terjadi bila salah satu syarat diatas dipenuhi. Gambar 2.2 memperlihatkan proses pembangkitan tegangan generator induksi.



Gambar 2.2. Rangkaian proses pembangkitan tegangan

Dari Gambar 2.2 dapat dibuat rangkaian ekuivalen per fasa generator induksi penguatan sendiri seperti Gambar 2.3.



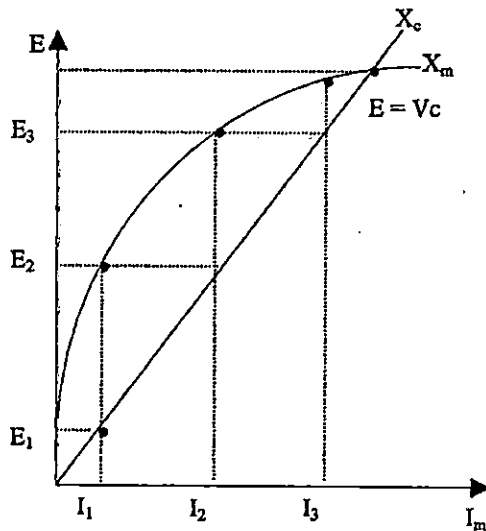
Gambar 2.3. Rangkaian ekuivalen per fasa generator induksi

keterangan :

- $R_1$  : tahanan stator
- $R_2$  : tahanan rotor
- $X_1$  : reaktansi bocor stator
- $X_2$  : reaktansi bocor rotor
- $X_m$  : reaktansi magnetisasi
- $X_c$  : reaktansi kapasitansi
- $I_1$  : arus stator
- $I_c$  : arus magnetisasi
- $I_L$  : arus beban
- $s$  : slip
- $V$  : tegangan keluaran (fasa-netral)

Dengan menghubungkan kapasitor di terminal stator, akan terbentuk suatu rangkaian tertutup. Dengan adanya tegangan awal tadi, di rangkaian akan mengalir arus. Arus tersebut akan menghasilkan fluksi di celah udara, sehingga di stator akan terbangkit tegangan induksi sebesar  $E_1$ . Tegangan  $E_1$  ini akan mengakibatkan arus mengalir ke kapasitor sebesar  $I_1$ . Dengan adanya arus sebesar  $I_1$ , akan menambah jumlah fluksi di

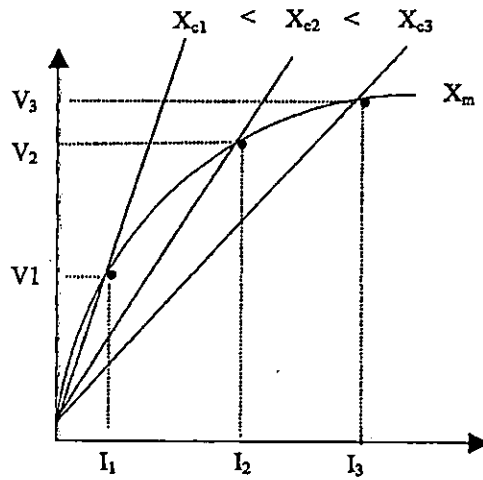
celah udara, sehingga tegangan di stator menjadi  $E_2$ . Tegangan  $E_2$  akan mengalirkan arus di kapasitor sebesar  $I_2$  yang menyebabkan fluksi bertambah dan tegangan yang dibangkitkan juga akan meningkat. Proses ini terjadi sampai mencapai titik kesetimbangan  $E = V_c$  seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.4. Dalam kondisi ini tidak terjadi lagi penambahan fluksi ataupun tegangan yang dibangkitkan.



Gambar 2.4. Proses pembangkitan tegangan

Nilai kapasitor yang dipasang sangat menentukan terbangkitnya tegangan atau tidak. Untuk terbangkitnya tegangan generator induksi, nilai kapasitor yang dipasang harus lebih besar dari nilai kapasitor minimum yang diperlukan untuk proses eksitasi. Jika kapasitor yang dipasang lebih kecil dari kapasitor minimum yang diperlukan, maka proses pembangkitan tegangan tidak akan berhasil, seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.5.

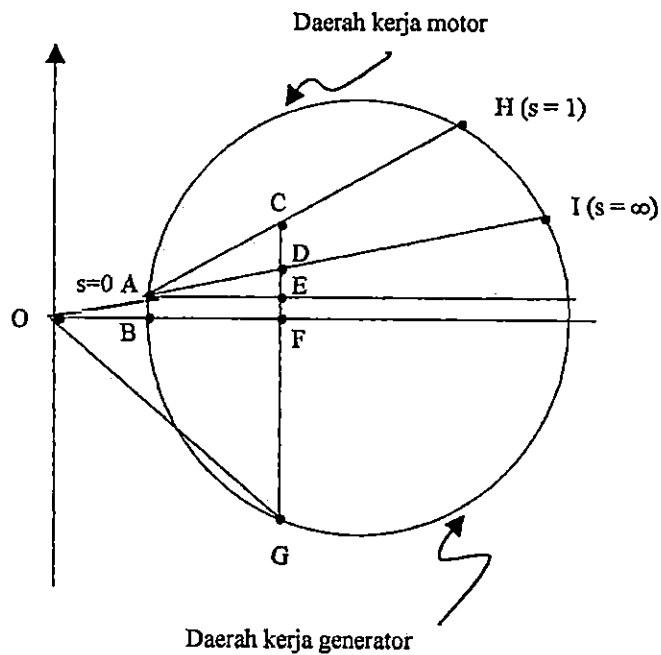




Gambar 2.5. Tegangan fungsi kapasitor eksitasi

### 2.3. Diagram Lingkaran Generator Induksi

Perubahan beban generator induksi penguatan sendiri akan mempengaruhi harga slip, seperti diperlihatkan dalam Gambar 2.6.



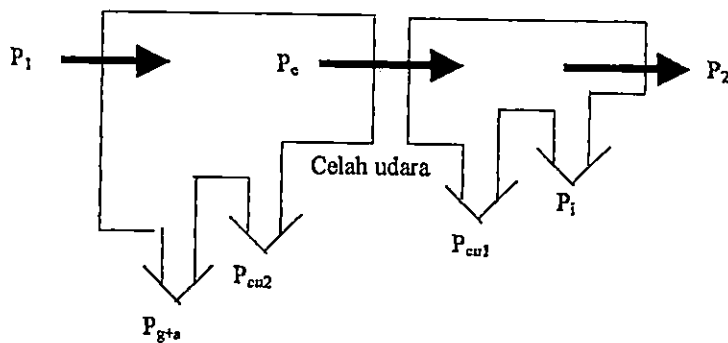
Gambar 2.6. Diagram lingkaran generator induksi

Daerah kerja generator ditunjukkan oleh busur ABGI. Titik A sampai titik I menunjukkan slip berharga negatif sampai slip berharga takhingga. Garis AH menyatakan daerah kerja motor. Garis AH juga menyatakan daya keluaran mekanis, merepresentasikan daya masukan mekanis penggerak mula yang memutar generator induksi. Titi B menyatakan daya keluaran generator berharga nol. Untuk itu mesin harus dioperasikan di suatu harga negatif yang kecil, sehingga diperoleh rugi-rugi putaran beban nol.

Untuk suatu beban tertentu misal titik G, garis OG menyatakan arus stator saat kondisi beban tersebut. Garis CG menyatakan daya masukan mekanis per fasa dan garis FG menyatakan daya keluaran listrik per fasa. Sedangkan garis CD, DE dan EF menyatakan rugi-rugi tembaga rotor, rugi-rugi tembaga stator dan rugi-rugi beban nol.

#### 2.4. Diagram Aliran Daya Nyata

Diagram aliran daya nyata dan rugi-rugi daya generator induksi penguatan sendiri ditunjukkan dengan Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Diagram aliran daya nyata

Rugi-rugi gesekan dan angin  $P_{g+a}$ , rugi-rugi inti stator  $P_i$  biasanya dianggap konstan dan disebut dengan rugi-rugi beban nol. Sedangkan rugi-rugi tembaga stator dan rotor tidak tetap dan besarnya sangat tergantung kepada arus beban. Diagram aliran daya dan rugi-rugi daya nyata generator induksi dapat dinyatakan dengan persamaan-persamaan berikut :

$$P_1 = P_{mek} - P_{g+a} \quad (2.2)$$

$$P_c = P_1 - P_{cu2} \quad (2.3)$$

$$P_2 = P_c - P_{cu1} - P_i \quad (2.4)$$

dengan

- $P_1$  : daya masukan rotor
- $P_2$  : daya keluaran stator
- $P_{mek}$  : daya mekanis dari prime mover
- $P_{g+a}$  : rugi-rugi gesekan dan angin
- $P_i$  : rugi-rugi inti stator
- $P_c$  : daya pada celah udara
- $P_{cu1}$  : rugi-rugi tembaga stator
- $P_{cu2}$  : rugi-rugi tembaga rotor

## 2.5. Pengaruh Pembebanan Terhadap Arus Eksitasi

Dari rangkaian ekivalen gambar 2.3, hubungan antara tegangan keluaran dengan arus stator diperlihatkan pada persamaan berikut

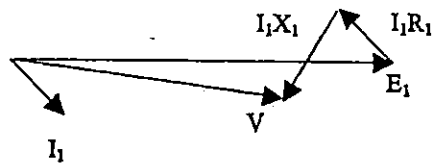
$$V = E_1 - I_1(R_1 + jX_1) \quad (2.5)$$

$$I_1 = I_c + I_L \quad (2.6)$$

dengan

- $V$  : tegangan keluaran generator
- $E_1$  : ggl induksi yang dibangkitkan pada stator
- $I_1$  : arus stator
- $I_L$  : arus beban

Dari persamaan (2.5) diatas dapat digambarkan diagram vektor tegangan generator induksi dengan Gambar 2.8.



Gambar 2.8. Diagram vektor tegangan

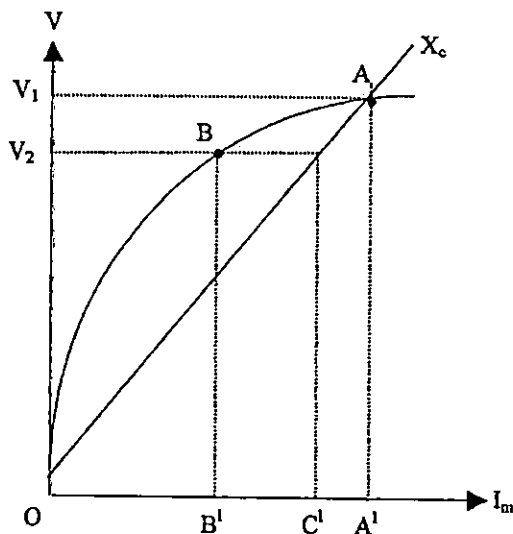
Dari persamaan (2.6), tegangan keluaran sangat ditentukan oleh arus eksitasi. Semakin kecil arus eksitasi, tegangan keluaran yang dihasilkan generator induksi akan semakin kecil pula.

### 2.5.1. Pembebanan Dengan Faktor Kerja Satu

Pembebanan dengan faktor kerja satu artinya generator hanya melayani beban yang bersifat resistif (R). Beban yang bersifat resistif ini hanya menarik arus kerja. Kenaikkan arus beban akan memperbesar rugi tegangan di tahanan stator dan memperbesar kebocoran fluksi di reaktansi stator, sehingga tegangan keluaran akan turun (persamaan 2.5). Penurunan tegangan keluaran akan menyebabkan arus eksitasi ikut menurun, seperti diperlihatkan pada persamaan (2.7).

$$I_c = \frac{V}{X_c} \quad (2.7)$$

Proses penurunan tegangan keluaran berlangsung sampai tercapainya titik keseimbangan yang baru seperti ditunjukkan dengan Gambar 2.9.



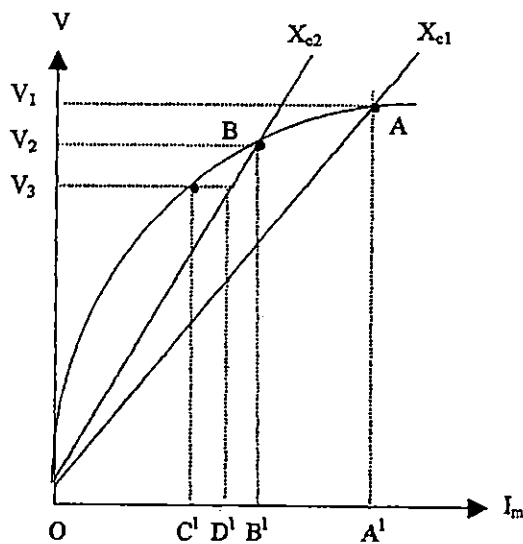
Gambar 2.9. Tegangan fungsi arus eksitasi dengan faktor kerja satu

Titik A merupakan titik kerja keadaan beban nol dengan tegangan sebesar  $V_1$  dan arus eksitasi sebesar  $OA'$ . Saat generator induksi dibebani, titik kerja turun menjadi titik B

dengan tegangan keluaran generator sebesar  $V_2$  dan arus eksitasi menjadi sebesar  $OC^1$ . Dari arus eksitasi sebesar  $OC^1$  tersebut yang digunakan untuk eksitasi hanya sebesar  $OB^1$ , sedangkan sisanya sebesar  $B^1C^1$  digunakan untuk mengatasi kebocoran fluksi di stator.

### 2.5.2. Pembebanan Dengan Faktor Kerja Terbelakang (leading)

Beban dengan faktor kerja terbelakang menyerap daya reaktif induktif. Daya reaktif induktif beban tersebut harus dipenuhi oleh kapasitor eksitasi. Dengan demikian kapasitor eksitasi akan berfungsi ganda yaitu sebagai penghasil arus eksitasi dan sebagai sumber daya reaktif induktif yang dibutuhkan beban. Akibatnya daya reaktif yang dibutuhkan untuk eksitasi akan berkurang, sehingga tegangan terminal juga akan turun. Jika beban induktif yang terpasang terlalu besar, generator akan kehilangan arus eksitasi yang mengakibatkan tegangan keluaran juga akan hilang. Gambar 2.10 memperlihatkan pengaruh beban induktif terhadap arus eksitasi dan tegangan terminal generator.

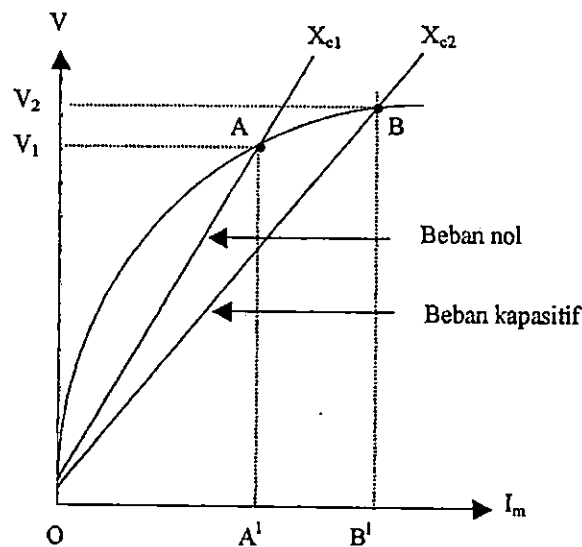


Gambar 2.10. Tegangan fungsi arus eksitasi dengan faktor kerja terbelakang

Saat beban nol tegangan terminal sebesar  $V_1$  dan arus eskitasi sebesar  $OA^1$ . Dengan mengalirnya arus ke beban, tegangan terminal generator turun menjadi  $V_2$  dan arus eksitasi menjadi  $OB^1$ . Di generator sendiri akan terjadi kerugian tegangan akibat adanya impedansi stator, sehingga tegangan terminal menjadi  $V_3$  dan arus eksitasi sebesar  $OD^1$ . Arus eksitasi yang sesungguhnya digunakan untuk penguatan adalah sebesar  $OC^1$ , sedangkan arus sebesar  $C^1D^1$  adalah arus yang terpakai untuk mengimbangi kebocoran fluksi stator. Arus sebesar  $A^1B^1$  merupakan pengurangan arus eksitasi karena mengalirnya daya ke beban.

### 2.5.3. Pembebanan Dengan Faktor Kerja Terdahulu (lagging)

Beban dengan faktor kerja terdahulu berarti beban bersifat kapasitif. Sesuai dengan sifatnya, beban kapasitif ini akan memberikan daya reaktif ke generator. Akibatnya terjadi penambahan arus eksitasi di generator, sehingga tegangan terminal generator akan lebih besar dari kondisi beban nol. Jika kenaikan arus eksitasi sama dengan arus bocor di fluksi, tegangan terminal akan sama dengan keadaan beban nolnya ; sedangkan bila kenaikan ini lebih kecil dari kebocoran arus fluksi, tegangan terminal generator akan mengalami sedikit penurunan. Gambar 2.11 memperlihatkan pengaruh beban kapasitif terhadap arus eksitasi dan tegangan terminal generator.



Gambar 2.11. Tegangan fungsi arus eksitasi dengan faktor kerja terdahulu

Dalam kondisi beban nol tegangan terminal sebesar  $V_1$  dan arus eksitasi sebesar  $OA^1$ . Dengan mengalirnya arus ke beban, tegangan terminal generator naik sebesar  $V_2$  dan arus eksitasi menjadi  $OB^1$ . Hal ini disebabkan besarnya kapasitor setelah pembebanan menjadi bertambah besar yang diperlihatkan dalam persamaan berikut :

$$C_{akhir} = C_{awal} + C_{beban} \quad (2.8)$$

Dengan penambahan kapasitansi ini, arus eksitasi akan bertambah sebesar  $A^1B^1$ .

## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1. Umum

Penelitian ini menggunakan metode perancangan dan analisis secara teoritis. Untuk membuktikan hasil penelitian dilakukan percobaan laboratorium. Hasil simulasi perancangan akan dibandingkan dengan hasil pengamatan laboratorium. Langkah-langkah dalam analisis generator induksi adalah sebagai berikut

1. Menentukan persamaan frekuensi keluaran ( $\omega$ ) berdasarkan rangkaian ekuivalen per fasa dengan metode impedansi loop.
2. Menentukan persamaan reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ) berdasarkan frekuensi yang dihasilkan.
3. Menghitung tegangan induksi ( $E_1$ ) berdasarkan kurva magnetisasi.
4. Menentukan persamaan tegangan, arus, daya dan regulasi tegangan yang dihasilkan saat beban tertentu.

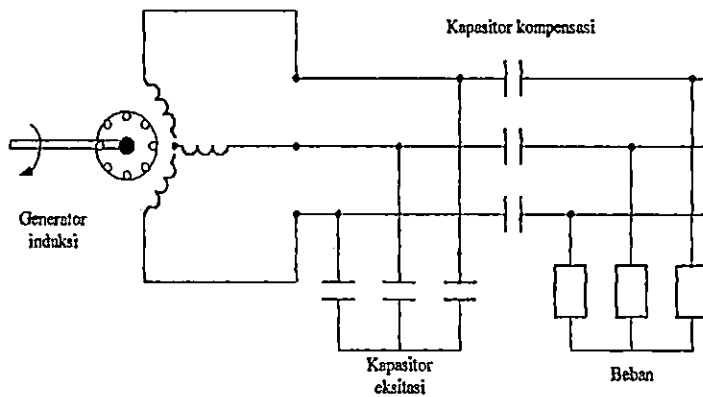
Generator induksi dengan kompensasi tegangan menggunakan kapasitor yang diserikan di sisi stator dikenal dengan nama generator induksi hubungan long shunt. Sedangkan generator induksi dengan kompensasi tegangan menggunakan kapasitor yang diserikan di sisi beban dinamakan dengan generator induksi hubungan short shunt.

Analisis generator induksi tiga fasa penguatan sendiri dengan kompensasi tegangan yang diteliti menggunakan rangkaian ekuivalen per fasa dengan metode impedansi loop. Karena generator induksi bekerja dengan putaran atau beban yang bervariasi, akibatnya frekuensi keluaran generator juga akan bervariasi, sehingga parameter-parameter mesin yang dipengaruhi oleh frekuensi akan ikut berubah. Oleh sebab itu rangkaian ekuivalen generator induksi harus dirubah menjadi suatu rangkaian baru yang semua besaran berdasarkan pada frekuensi dasar.



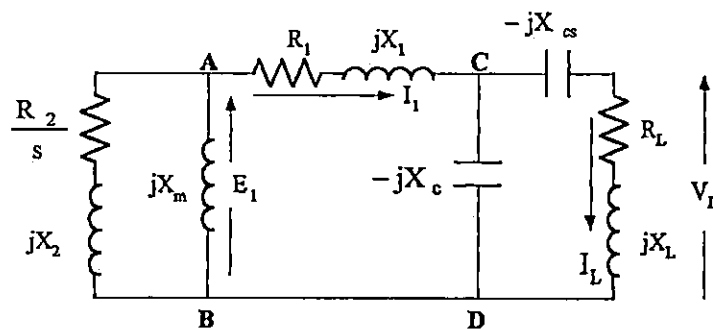
### 3.2. Generator Induksi Dengan Hubungan Short-Shunt

Rangkaian generator induksi hubungan short shunt diperlihatkan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Rangkaian generator induksi hubungan short shunt

Rangkaian ekivalen per fasa generator induksi hubungan short shunt diperlihatkan dalam Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Rangkaian ekivalen per-fasa generator induksi hubungan short shunt

Rangkaian ekivalen Gambar 3.2 harus dirubah menjadi rangkaian ekivalen yang baru, dan semua besaran yang berhubungan dengan frekuensi keluaran dinyatakan dalam frekuensi dasar. Harga slip yang disesuaikan dengan dengan frekuensi dasar menjadi :

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} = \left( 1 - \frac{\omega_r}{\omega_s} \right) \quad (3.1)$$

bila persamaan (3.1) dikalikan dengan  $\frac{a}{a}$  diperoleh

$$s = \left( a - a \frac{\omega_r}{\omega_s} \right) \frac{1}{a} \tag{3.2}$$

difinisikan

$$a \frac{\omega_r}{\omega_s} = b \tag{3.3}$$

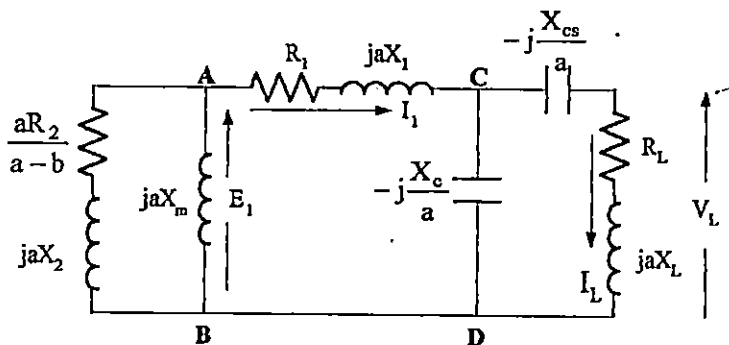
sehingga

$$s = \frac{a - b}{a} \tag{3.4}$$

dengan

- a : perbandingan antara frekuensi keluaran dengan frekuensi dasar
- b : perbandingan antara kecepatan putar rotor dengan kecepatan putaran sinkron yang disesuaikan dengan frekuensi dasar

Rangkaian ekivalen generator induksi hubungan short shunt yang berdasarkan frekuensi dasar diperlihatkan dalam Gambar 3.3.



Gambar 3.3. Rangkaian ekivalen per-fasa pada frekuensi dasar generator induksi hubungan short shunt

keterangan :

- $R_1$  : tahanan stator
- $X_1$  : reaktansi bocor stator
- $R_2$  : tahanan rotor
- $X_2$  : reaktansi bocor rotor
- $R_L$  : tahanan beban
- $X_L$  : reaktansi beban
- a : perbandingan frekuensi keluaran dengan frekuensi dasar
- b : kecepatan putaran rotor pada frekuensi dasar
- $X_c$  : reaktansi kapasitif shunt
- $X_{cs}$  : reaktansi kapasitif seri
- $X_m$  : reaktansi magnetisasi



- $I_1$  : arus stator  
 $E_f$  : tegangan induksi pada celah udara  
 $V_L$  : tegangan beban  
 $I_L$  : arus beban

Dari rangkaian ekivalen dalam Gambar 3.3, dapat diturunkan persamaan reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ) dan frekuensi keluaran ( $\omega$ ). Jika nilai reaktansi magnetisasi yang dihitung lebih besar atau lebih kecil dari nilai reaktansi berdasarkan kurva magnetisasi, maka proses pembangkitan tegangan tidak akan terjadi.

### 3.2.1. Perhitungan Frekuensi Keluaran dan Reaktansi Magnetisasi Pada Generator Induksi Hubungan Short Shunt.

Menurut hukum Kirchoff mengenai tegangan, loop ABCD dari rangkaian ekivalen dalam Gambar 3.3, berlaku persamaan tegangan sebagai berikut:

$$I_1(Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd}) = 0 \quad (3.5)$$

$$Z_{ab} = \frac{jaX_m \left( \frac{aR_2}{a-b} + jaX_2 \right)}{\frac{aR_2}{a-b} + j(aX_m + aX_2)} \quad (3.6)$$

$$Z_{ac} = R_1 + jaX_1 \quad (3.7)$$

$$Z_{cd} = \frac{\left\{ R_L - j \left( \frac{X_{cs}}{a} - aX_L \right) \right\} \left\{ -j \frac{X_c}{a} \right\}}{R_L - j \left( \frac{X_{cs}}{a} + \frac{X_c}{a} - aX_L \right)} \quad (3.8)$$

Tegangan akan dibangkitkan bila  $I_1 \neq 0$ . Dari persamaan (3.5) akan diperoleh

$$Z_{ab} + Z_{ac} + Z_{cd} = 0 \quad (3.9)$$

Persamaan (3.1), (3.2), (3.3) dan (3.4) juga dapat ditulis dalam bentuk :

$$Z_{ab} = \frac{jX_m R_2 - (X_2 X_m)(a-b)}{R_2 + j(X_2 + X_m)(a-b)} \quad (3.10)$$

$$Z_{ac} = \frac{R_1 + jX_1}{a} \quad (3.11)$$

$$Z_{cd} = \frac{a^2 X_L X_c - X_{cs} X_c - ja R_L X_c}{a^3 R_L + ja^4 X_L - ja^2 X_{cs} - ja^2 X_c} \quad (3.12)$$

Dengan demikian, persamaan (3.5) dapat ditulis :

$$\begin{aligned} & \frac{jX_m R_2 - (X_2 X_m)(a-b)}{R_2 + j(X_2 + X_m)(a-b)} + \frac{R_1 + jX_1}{a} \\ & + \frac{a^2 X_L X_c - X_{cs} X_c - ja R_L X_c}{a^3 R_L + ja^4 X_L - ja^2 X_{cs} - ja^2 X_c} = 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Apabila persamaan (3.9) diselesaikan dengan menyamakan penyebutnya, maka akan diperoleh

$$\begin{aligned} & \{jX_m R_2 - (X_2 X_m)(a-b)\} \{a\} \{a^3 R_L + ja^4 X_L - ja^2 X_{cs} - ja^2 X_c\} \\ & + \{R_1 + jX_1\} \{R_2 + j(X_2 + X_m)(a-b)\} \{a^3 R_L + ja^4 X_L - ja^2 X_{cs} - ja^2 X_c\} \\ & + \{a^2 X_L X_c - X_{cs} X_c - ja R_L X_c\} \{a\} \{R_2 + j(X_2 + X_m)(a-b)\} = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Persamaan 3.14 menyatakan bahwa bagian riil dan bagian imajiner dari persamaan tersebut harus sama dengan nol. Bila bagian imajiner dari persamaan 3.14 disamakan dengan nol, maka akan diperoleh persamaan

$$\begin{aligned} & -(A_1 X_m + A_2) a^4 + (A_3 X_m + A_4) a^3 \\ & + (A_5 X_m + A_6) a^2 - (A_7 X_m + A_8) a - A_9 = 0 \end{aligned} \quad (3.15)$$

kalau persamaan tersebut diselesaikan, maka diperoleh suatu persamaan untuk menghitung nilai reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ) sebagai berikut :

$$X_m = \frac{A_2 a^4 - A_4 a^3 - A_6 a^2 + A_8 a + A_9}{-A_1 a^4 + A_3 a^3 + A_5 a^2 - A_7 a} \quad (3.16)$$

dengan

$$A_1 = X_L(R_1 + R_2) + R_L(X_1 + X_2)$$

$$A_2 = X_L(X_1R_2 + X_2R_1) + X_1X_2R_L$$

$$A_3 = b\{R_1X_L + R_L(X_1 + X_2)\}$$

$$A_4 = bX_2(X_LR_1 + X_1R_L)$$

$$A_5 = X_c(R_1 + R_2 + R_L) + X_{cs}(R_1 + R_2)$$

$$A_6 = X_c\{R_2(X_1 + X_L) + X_2(R_1 + R_L)\} + X_{cs}(X_1R_2 + X_2R_1) + R_1R_2R_L$$

$$A_7 = b\{X_c(R_1 + R_L) + R_1X_{cs}\}$$

$$A_8 = bX_2\{X_c(R_L + R_1) + R_1X_{cs}\}$$

$$A_9 = R_2X_cX_{cs}$$

Dengan cara yang sama bila bagian real dari persamaan (3.14) disamakan dengan nol, maka nilai  $X_m$  dapat ditentukan dengan persamaan

$$X_m = \frac{B_2a^5 - B_4a^4 - B_6a^3 + B_8a^2 + B_{10}a - B_{12}}{-B_1a^5 + B_3a^4 + B_5a^3 - B_7a^2 - B_9a + B_{11}} \quad (3.17)$$

dengan

$$B_1 = X_L(X_1 + X_2)$$

$$B_2 = X_1X_2X_L$$

$$B_3 = bX_L(X_1 + X_2)$$

$$B_4 = bX_1X_2X_L$$

$$B_5 = X_c(X_1 + X_2 + X_L) + R_L(R_1 + R_2) + X_{cs}(X_1 + X_2)$$

$$B_6 = X_cX_2(X_L + X_1) + R_L(X_1R_2 + X_2R_1) + R_1R_2X_L + X_1X_2X_{cs}$$

$$B_7 = b\{X_c(X_1 + X_2 + X_L) + X_{cs}(X_1 + X_2) + R_1R_L\}$$

$$B_8 = bX_2\{X_c(X_L + X_1) + R_1R_L + X_1X_{cs}\}$$

$$B_9 = X_cX_{cs}$$

$$B_{10} = X_c(R_2R_L + R_1R_2) + X_{cs}(X_2X_c + R_1R_2)$$

$$B_{11} = bX_cX_{cs}$$

$$B_{12} = bX_2X_cX_{cs}$$

Karena nilai  $X_m$  persamaan (3.16) dan (3.17) sama secara simultan, diperoleh suatu persamaan polinomial orde 9 untuk menentukan nilai frekuensi keluaran (a).

$$p_9 a^9 + p_8 a^8 + p_7 a^7 + p_6 a^6 + p_5 a^5 + p_4 a^4 + p_3 a^3 + p_2 a^2 + p_1 a + p_0 = 0 \quad (3.18)$$

dengan

$$p_9 = A_1 B_2 - A_2 B_1$$

$$p_8 = A_2 B_3 + A_4 B_1 - A_1 B_4 - A_3 B_2$$

$$p_7 = A_2 B_5 - A_4 B_3 + A_6 B_1 - A_1 B_6 + A_3 B_4 - A_5 B_2$$

$$p_6 = A_1 B_8 + A_3 B_6 + A_5 B_4 + A_7 B_2 - A_2 B_7 - A_4 B_5 - A_6 B_3 - A_8 B_1$$

$$p_5 = A_1 B_{10} + A_8 B_3 - A_9 B_1 + A_4 B_7 + A_5 B_6 - A_2 B_9 - A_7 B_4 - A_6 B_5 - A_3 B_8$$

$$p_4 = A_2 B_{11} + A_4 B_9 + A_6 B_7 + A_8 B_5 + A_9 B_3 - A_1 B_{12} - A_3 B_{10} - A_5 B_8 - A_7 B_6$$

$$p_3 = A_6 B_9 + A_3 B_{12} + A_7 B_8 - A_4 B_{11} - A_8 B_7 + A_9 B_5 - A_5 B_{10}$$

$$p_2 = A_5 B_{12} + A_7 B_{10} - A_9 B_7 - A_6 B_{11} - A_8 B_9$$

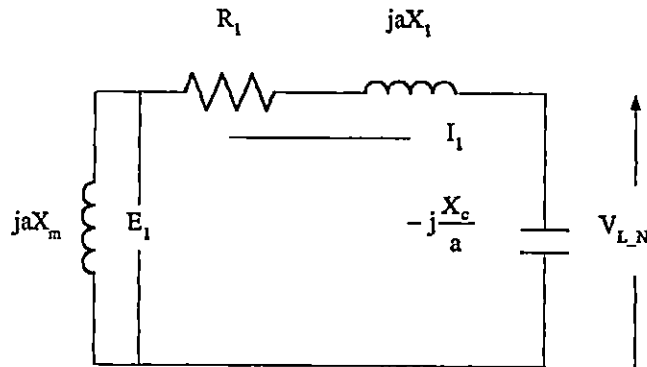
$$p_1 = A_8 B_{11} - A_9 B_9 - A_7 B_{12}$$

$$p_0 = A_9 B_{11}$$

Persamaan polinomial orde sembilan tersebut diselesaikan secara numerik menggunakan prosedur iterasi Newton-Raphson. Dari persamaan polinomial itu terlihat bahwa bila terjadi perubahan kecepatan atau beban, akan mengakibatkan terjadinya perubahan frekuensi (a). Dengan perubahan frekuensi akan menyebabkan nilai  $X_m$  akan ikut berubah pula dan tegangan induksi yang dibangkitkan juga berubah.

### 3.2.2. Kapasitor Eksitasi dan Kompensasi

Untuk menentukan kebutuhan nilai kapasitor eksitasi bagi generator induksi hubungan short shunt diasumsikan generator bekerja tanpa beban. Rangkaian ekivalen generator induksi tanpa beban diperlihatkan dalam Gambar 3.4.



Gambar 3.4. Rangkaian ekivalen generator induksi tanpa beban

Dalam kondisi tanpa beban slip berharga sangat kecil ( $s \sim 0$ ), sehingga frekuensi yang dihasilkan akan sebanding dengan kecepatan putaran rotor ( $a = b$ ). Generator induksi akan membangkitkan tegangan bila jumlah loop reaktansi tertutup dalam rangkaian ekivalen Gambar 3.4 sama dengan nol, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$jaX_1 + jaX_m - j\frac{X_c}{a} = 0$$

$$\frac{X_c}{a} = aX_1 + aX_m$$

$$X_c = a^2(X_1 + X_m) = b^2(X_1 + X_m)$$

$$C_{\min} = \frac{1}{\omega b^2(X_1 + X_m)} \quad (3.19)$$

dengan

$C_{\min}$  : nilai kapasitor eksitasi ( $\mu\text{F}$ )

$\omega$  :  $2\pi.f$

$b$  : kecepatan putaran rotor (p.u)

$X_1$  : nilai reaktansi stator ( $\Omega$ )

$X_m$  : nilai reaktansi magnetisasi ( $\Omega$ )

Sedangkan nilai kapasitor kompensasi ditentukan secara grafik dari kurva regulasi tegangan fungsi nilai kapasitor kompensasi berdasarkan simulasi. Dari kurva tersebut dapat ditentukan nilai kapasitor kompensasi sesuai dengan regulasi yang diinginkan.

### 3.2.3. Persamaan Tegangan, Arus dan Daya

Dari persamaan polinomial akan didapatkan harga frekuensi keluaran generator induksi. Nilai frekuensi yang diperoleh dari persamaan polinomial digunakan untuk menghitung nilai reaktansi magnetisasi. Nilai reaktansi magnetisasi ini digunakan untuk menghitung tegangan  $E_1$ . Setelah nilai  $E_1$  diperoleh, dapat ditentukan arus dan tegangan beban serta daya keluaran generator.

$$\text{Arus stator } (I_1) = \frac{E_1}{R_1 + jaX_1 + \frac{\left\{ R_L - j \left( \frac{X_{cs}}{a} - aX_L \right) \right\} \left\{ -j \frac{X_c}{a} \right\}}{R_L - j \left( \frac{X_{cs}}{a} + \frac{X_c}{a} - aX_L \right)} \quad (3.20)$$

$$\text{Arus beban } (I_L) = \frac{E_1 - I_1(R_1 + jaX_1)}{R_L - j \left( \frac{X_{cs}}{a} - aX_L \right)} \quad (3.21)$$

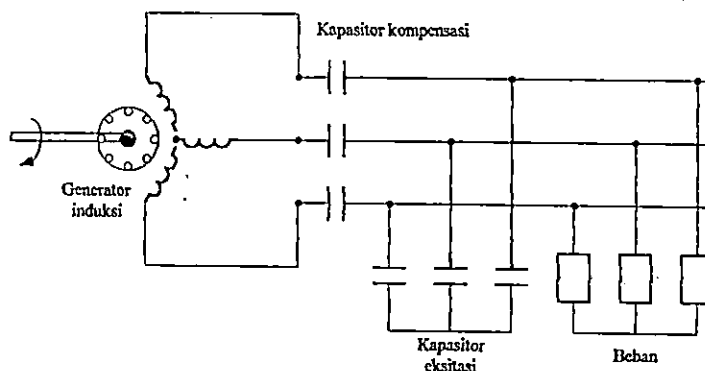
$$\text{Tegangan beban } (V_L) = I_L(R_L + jaX_L) \quad (3.22)$$

$$\text{Daya output per fasa } (P_{out}) = I_L^2 R_L \quad (3.23)$$

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \quad (3.24)$$

### 3.3. Generator Induksi Dengan Hubungan Long-Shunt

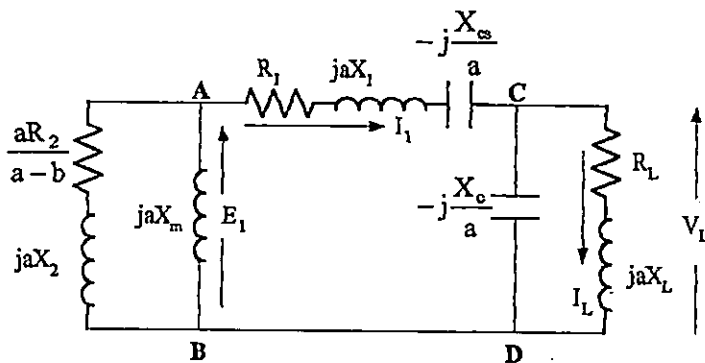
Rangkaian generator induksi hubungan long shunt diperlihatkan dalam Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Rangkaian generator induksi hubungan long shunt



Rangkaian ekivalen generator induksi hubungan long shunt yang telah disesuaikan dengan frekuensi dasar diperlihatkan dalam Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Rangkaian ekivalen per-fasa pada frekuensi dasar generator induksi hubungan long shunt

keterangan :

- $R_1$  : tahanan stator
- $X_1$  : reaktansi bocor stator
- $R_2$  : tahanan rotor
- $X_2$  : reaktansi bocor rotor
- $R_L$  : tahanan beban
- $X_L$  : reaktansi beban
- $a$  : perbandingan frekuensi keluaran dengan frekuensi dasar
- $b$  : kecepatan putaran rotor pada frekuensi dasar
- $X_c$  : reaktansi kapasitif shunt
- $X_{cs}$  : reaktansi kapasitif seri
- $X_m$  : reaktansi magnetisasi
- $I_1$  : arus stator
- $E_1$  : tegangan induksi pada celah udara
- $V_L$  : tegangan beban
- $I_L$  : arus beban

### 3.3.1. Perhitungan Frekuensi Keluaran dan Reaktansi Magnetisasi Pada Generator Induksi Hubungan Long Shunt.

Analisis generator induksi hubungan long shunt menggunakan metode yang sama dengan analisis generator induksi hubungan short shunt. Karena penempatan kapasitor kompensasi yang berbeda dari short, impedansi  $Z_{ab}$ ,  $Z_{ac}$  dan  $Z_{cd}$  dari generator induksi hubungan long shunt adalah sebagai berikut :

$$Z_{ab} = \frac{jaX_m \left( \frac{aR_2}{a-b} + jaX_2 \right)}{\frac{aR_2}{a-b} + j(aX_m + aX_2)} \quad (3.25)$$

$$Z_{ac} = R_1 - j \left( \frac{X_{cs}}{a} - aX_1 \right) \quad (3.26)$$

$$Z_{cd} = \frac{(R_L + jaX_L) \left( -j \frac{X_c}{a} \right)}{R_L - j \left( \frac{X_c}{a} - aX_L \right)} \quad (3.27)$$

Dengan cara penguraian yang sama dengan konfigurasi short-shunt, bila bagian imajiner disamakan dengan nol diperoleh persamaan reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ) sebagai berikut :

$$X_m = \frac{A_2 a^4 - A_4 a^3 - A_6 a^2 + A_8 a + A_9}{-A_1 a^4 + A_3 a^3 + A_5 a^2 - A_7 a} \quad (3.28)$$

dengan

$$A_1 = X_L(R_1 + R_2) + R_L(X_1 + X_2)$$

$$A_2 = X_L(X_1 R_2 + X_2 R_1) + X_1 X_2 R_L$$

$$A_3 = b \{ R_1 X_L + R_L(X_1 + X_2) \}$$

$$A_4 = b X_2 (X_L R_1 + X_1 R_L)$$

$$A_5 = X_c (R_1 + R_2 + R_L) + X_{cs} R_2$$

$$A_6 = X_c \{ R_2 (X_1 + X_L) + X_2 (R_1 + R_L) \} + X_{cs} (X_L R_2 + X_2 R_L) + R_1 R_2 R_L \quad A_9 = R_2 X_c X_{cs}$$

Selanjutnya bila bagian riil disamakan dengan nol, diperoleh persamaan reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ) sebagai berikut :

$$X_m = \frac{B_2 a^5 - B_4 a^4 - B_6 a^3 + B_8 a^2 + B_{10} a - B_{12}}{-B_1 a^5 + B_3 a^4 + B_5 a^3 - B_7 a^2 - B_9 a + B_{11}} \quad (3.29)$$

dimana

$$B_1 = X_L(X_1 + X_2)$$

$$B_2 = X_1X_2X_L$$

$$B_3 = bX_L(X_1 + X_2)$$

$$B_4 = bX_1X_2X_L$$

$$B_5 = X_c(X_1 + X_2 + X_L) + R_L(R_1 + R_2) + X_{cs}X_L$$

$$B_6 = X_2\{X_c(X_1 + X_L) + R_1R_L + X_{cs}X_L\} + R_2(R_1R_L + X_1R_L)$$

$$B_7 = b\{X_c(X_1 + X_2 + X_L) + R_1R_L + X_{cs}X_L\}$$

$$B_8 = bX_2\{X_c(X_L + X_1) + R_1R_L + X_LX_{cs}\}$$

$$B_9 = X_cX_{cs}$$

$$B_{10} = X_c(R_1R_1 + R_2R_L + X_2X_{cs}) + R_2R_LX_{cs}$$

$$B_{11} = bX_cX_{cs}$$

$$B_{12} = bX_2X_cX_{cs}$$

Dari persamaan (3.28) dan (3.29) diperoleh persamaan polinomial untuk menghitung frekuensi keluaran generator induksi hubungan long shunt sebagai berikut :

$$\begin{aligned} p_9a^9 + p_8a^8 + p_7a^7 + p_6a^6 + p_5a^5 \\ + p_4a^4 + p_3a^3 + p_2a^2 + p_1a + p_0 = 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

dengan

$$p_9 = A_1B_2 - A_2B_1$$

$$p_8 = A_2B_3 + A_4B_1 - A_1B_4 - A_3B_2$$

$$p_7 = A_2B_5 - A_4B_3 + A_6B_1 - A_1B_6 + A_3B_4 - A_5B_2$$

$$p_6 = A_1B_8 + A_3B_6 + A_5B_4 + A_7B_2 - A_2B_7 - A_4B_5 - A_6B_3 - A_8B_1$$

$$p_5 = A_1B_{10} + A_8B_3 - A_9B_1 + A_4B_7 + A_5B_6 - A_2B_9 - A_7B_4 - A_6B_5 - A_3B_8$$

$$p_4 = A_2B_{11} + A_4B_9 + A_6B_7 + A_8B_5 + A_9B_3 - A_1B_{12} - A_3B_{10} - A_5B_8 - A_7B_6$$

$$p_3 = A_6B_9 + A_3B_{12} + A_7B_8 - A_4B_{11} - A_8B_7 + A_9B_5 - A_5B_{10}$$

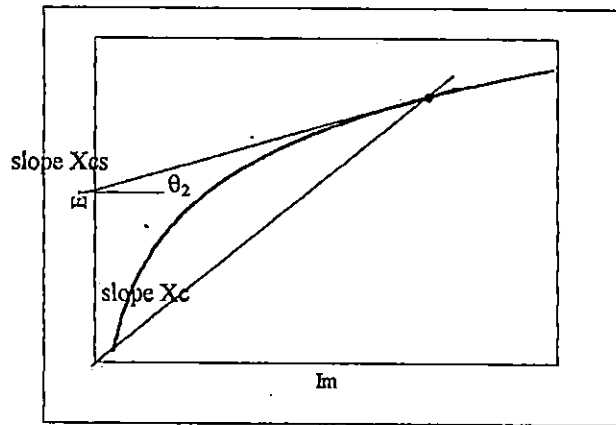
$$p_2 = A_5B_{12} + A_7B_{10} - A_9B_7 - A_6B_{11} - A_8B_9$$

$$p_1 = A_8B_{11} - A_9B_9 - A_7B_{12}$$

$$p_0 = A_9B_{11}$$

### 3.3.2. Kapasitor Eksitasi dan Kompensasi

Nilai kapasitor eksitasi dan kompensasi generator induksi hubungan long shunt ditentukan secara grafis dari kurva magnetisasi sebagai berikut.



Gambar 3.7. Grafik untuk menentukan kapasitor eksitasi dan kompensasi generator induksi hubungan long shunt

- Gambarkan suatu garis lurus dari titik 0 sampai memotong kurva magnetisasi di titik tegangan nominal generator. Tangen  $\theta_1$  tersebut merupakan reaktansi kapasitansi dari kapasitor eksitasi.
- Gambarkan suatu garis lurus yang menyinggung titik perpotongan dari kurva magnetisasi dengan reaktansi kapasitansi eksitasi. Tangen  $\theta_2$  merupakan reaktansi kapasitansi dari kapasitor kompensasi.

Cara penentuan seperti ini sama dengan menentukan nilai induktansi shunt dan seri pada generator arus searah hubungan long shunt.

### 3.3.3. Persamaan Tegangan, Arus dan Daya

$$\text{Arus stator } (I_1) = \frac{E_1}{R_1 - j\left(\frac{X_{cs}}{a} + aX_1\right) + \frac{(R_L + jaX_L)\left(-j\frac{X_c}{a}\right)}{R_L - j\left(\frac{X_c}{a} + aX_L\right)}} \quad (3.31)$$

$$\text{Arus beban } (I_L) = \frac{E_1 - I_1\left(R_1 + jaX_1 - j\frac{X_{cs}}{a}\right)}{R_L + jaX_L} \quad (3.32)$$

$$\text{Tegangan beban } (V_L) = I_L(R_L + jaX_L) \quad (3.33)$$

$$\text{Daya output per fasa } (P_{out}) = I_L^2 R_L \quad (3.34)$$

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \quad (3.35)$$

### 3.4. Kurva Karakteristik Magnetisasi

Untuk menentukan tegangan terminal, arus beban, tegangan beban dan daya keluaran, terlebih dahulu harus diketahui tegangan induksi yang dibangkitkan ( $E_1$ ). Nilai tegangan  $E_1$  didapat dengan menggunakan karakteristik magnetisasi. Karakteristik magnetisasi diperoleh dengan cara memutar mesin induksi saat kecepatan sinkron dan saat frekuensi dasar ( $a=1$ ), kemudian stator diberi tegangan arus bolak balik yang bervariasi. Selanjutnya dicatat perubahan arus untuk setiap perubahan harga tegangan yang diberikan.

Dari data hasil pengukuran tersebut diperoleh kurva  $E_1$  terhadap  $X_m$ , yang dinamakan dengan kurva magnetisasi. Dengan menggunakan kurva magnetisasi, harga  $E_1$  dapat dihitung untuk setiap perubahan harga  $X_m$ . Untuk menyatakan tegangan  $E_1$  dalam bentuk matematis, data karakteristik magnetisasi ini perlu dilinierisasi, sehingga tegangan  $E_1$  dapat dinyatakan dengan persamaan (3.36).

$$E_1 = K_1 + K_2 X_m \quad (3.36)$$

Salah satu bentuk penyelesaian regresi linier adalah dengan metode kuadrat terkecil. Regresi linier dengan metode kuadrat terkecil, prinsipnya adalah meminimalkan jumlah kuadrat dari kesalahan (error), sehingga diperoleh nilai  $K_1$  dan  $K_2$  sebagai berikut :

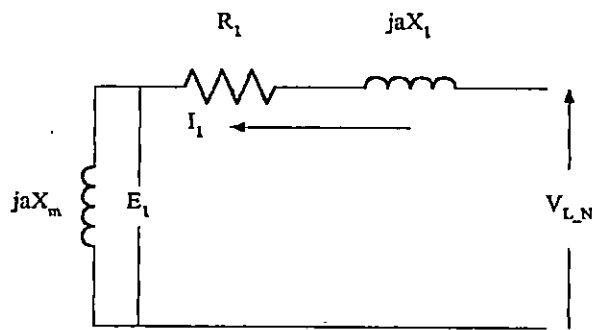
$$K_1 = \frac{\sum X^2 \sum Y - \sum X \sum XY}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

$$K_2 = \frac{N \sum XY - \sum X \sum Y}{N \sum X^2 - (\sum X)^2}$$

dengan

- N : jumlah pasang nilai  
 X : nilai reaktansi magnetisasi  
 Y : tegangan induksi yang dibangkitkan

Untuk menentukan harga  $X_m$  dari data kurva magnetisasi, dianalisis dengan rangkaian ekuivalen satu fasa saat keadaan beban nol seperti dalam Gambar 3.8



Gambar 3.8. Rangkaian ekuivalen pengujian beban nol

Dari Gambar 3.8 dapat ditentukan tegangan  $E_1$  sebagai berikut

$$E_1 = X_m I_1 \quad (3.37)$$

Arus beban nol ( $I_1$ ) adalah

$$I_1 = \frac{V_{L-N}}{Z_1} \quad (3.38)$$

$$Z_1 = R_1 + j(X_1 + X_m) \quad (3.39)$$

Dari persamaan (3.39) reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ) dan tegangan  $E_1$  dapat dihitung dengan rumus

$$X_m = \sqrt{(Z_1^2 - R_1^2)} - X_1 \quad (3.40)$$

$$E_1 = \left( \sqrt{(Z_1^2 - R_1^2)} - X_1 \right) I_1 \quad (3.41)$$

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Pengukuran Parameter Mesin

Parameter-parameter generator induksi penguatan sendiri yang perlu diketahui adalah sebagai berikut :

- ❖ Tahanan stator ( $R_1$ ),
- ❖ Tahanan rotor ( $R_2$ ),
- ❖ Reaktansi bocor stator ( $X_1$ ),
- ❖ Reaktansi bocor rotor ( $X_2$ ).

Parameter-parameter mesin tersebut diperoleh dari beberapa percobaan yaitu :

- ❖ Percobaan arus searah,
- ❖ Percobaan beban nol,
- ❖ Percobaan hubung singkat (rotor ditahan).

Mesin induksi yang difungsikan sebagai generator mempunyai data sebagai berikut :

Mesin LK-355

Motor induksi 3 fasa rotor sangkar, 4 kutub

Tegangan : 220/380 Volt ( $\Delta/Y$ )

Arus nominal : 15.1/9.1 Amper ( $\Delta/Y$ )

Frekuensi : 50 Herz

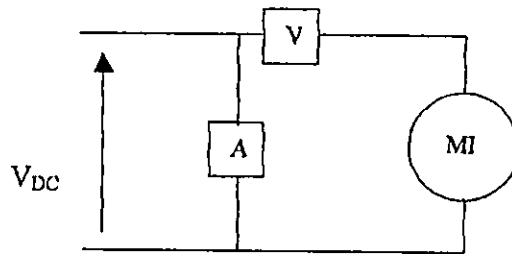
Jumlah kutub : 4

Daya : 4 Kw

#### 4.1.1. Percobaan Sumber Arus Searah

Percobaan sumber arus searah dilakukan untuk menentukan nilai tahanan stator ( $R_1$ ).

Rangkaian percobaan arus searah terlihat dalam Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Pengukuran tahanan stator per fasa

Langkah-langkah percobaan

1. Buat rangkaian seperti Gambar 4.1.
2. Catat besar arus (A) dan tegangan (V).
3. Hitung nilai tahanan stator dari kedua data tersebut.

Data hasil pengukuran

$$V_{dc} = 5 \text{ volt}$$

$$I_{dc} = 3,03 \text{ amper}$$

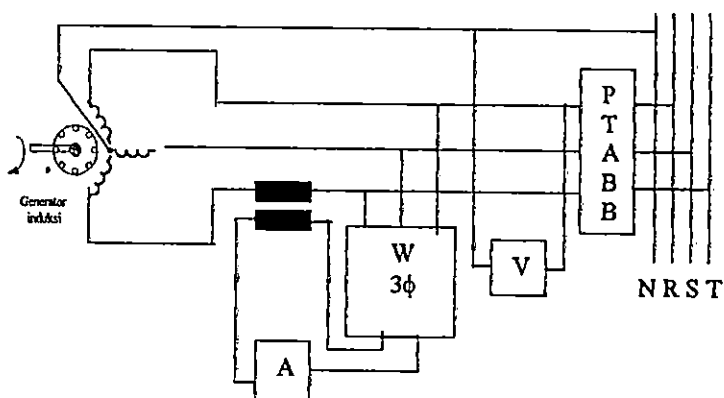
$$R_1 = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$$

$$R_1 = 1,65 \text{ ohm}$$

#### 4.1.2. Percobaan Beban Nol

Percobaan beban nol dilakukan untuk menentukan nilai reaktansi magnetisasi mesin.

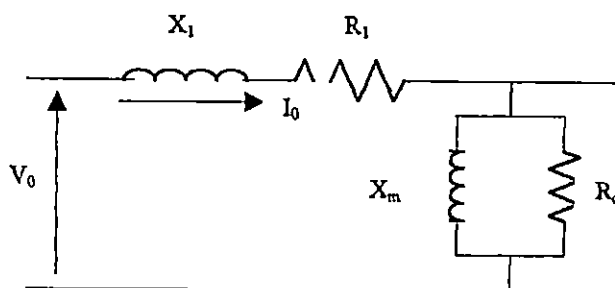
Rangkaian percobaan beban nol adalah seperti Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Rangkaian percobaan beban nol



Dalam keadaan beban nol, putaran rotor hampir sama dengan putaran sinkron, sehingga harga slip mendekati nol ( $s \approx 0$ ) dan impedansi rotor menuju tak terhingga. Dengan demikian rangkaian ekuivalen kondisi beban nol seperti Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Rangkaian ekuivalen beban nol

Langkah-langkah percobaan

1. Buat rangkaian seperti Gambar 4.2.
2. Atur tegangan PTABB pada harga nominal.
3. Catat tegangan (V), arus (A) dan daya 1 $\phi$ .

Data hasil percobaan

Tegangan fasa-netral :  $V_0 = 220$  volt

Arus beban nol :  $I_0 = 5,32$  amper

Daya satu fasa :  $P_0 = 152$  watt

Impedansi beban nol :  $\frac{1}{Z_0} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{jX_m}$

dalam bentuk admitansi :  $Y_0 = G_0 + jB_m$

$$Y_0 = \frac{I_0}{V_0}$$

$$= \frac{5,32}{220} = 0,0242 \text{ mho}$$

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{V_0 I_0}$$

$$= \frac{152}{220 \cdot 5,32} = 0,13$$

$$\varphi_0 = 82,49^\circ$$

$$\sin \varphi_0 = 0,9915$$

$$G_0 = Y_0 \cos \varphi_0$$

$$= 0,0031$$

$$B_m = Y_0 \sin \varphi_0$$

$$= 0,024$$

$$R_c = \frac{1}{G_0}$$

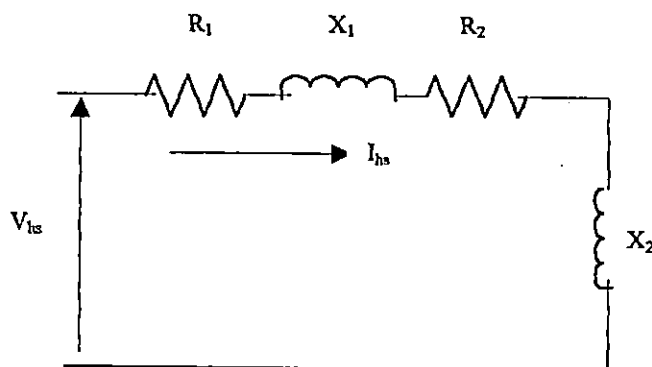
$$= 322,58$$

$$X_m = \frac{1}{B_m}$$

$$= 41,667$$

#### 4.1.3. Percobaan Hubung Singkat

Percobaan hubung singkat berguna untuk menentukan harga tahanan dan reaktansi bocor ekivalen. Dari harga tahanan ekivalen tersebut dapat ditentukan nilai tahanan rotor dan reaktansi bocor stator dan rotor. Rangkaian percobaan hubung singkat sama dengan rangkaian percobaan beban nol. Dalam percobaan hubung singkat putaran rotor  $n_r = 0$ , sehingga berdasarkan persamaan 2.1 harga slip  $s = 1$ . Rangkaian ekivalen percobaan hubung singkat diperlihatkan dalam Gambar 4.4.



Gambar 4.4. Rangkaian ekivalen hubung singkat

Langkah-langkah percobaan

1. Buat rangkaian seperti Gambar 4.2.
  2. Rotor ditahan hingga tidak dapat berputar.
  3. Catat tegangan (V), arus (A) dan daya  $1 \phi$ .
- Ingat arus tidak boleh melebihi nilai nominalnya.

Data hasil percobaan

Tegangan line-netral :  $V_{hs} = 45$  volt

Arus beban nol :  $I_{hs} = 9,0$  amper

Daya hubung singkat  $1\phi$  :  $P_{hs} = 220$  watt

Dari data hubung singkat diperoleh

$$R_{hs} = \frac{P_{hs}}{I_{hs}^2}$$

$$= \frac{220}{9^2} = 2,716 \text{ ohm}$$

$$Z_{hs} = \frac{V_{hs}}{I_{hs}}$$

$$= \frac{45}{9} = 5 \text{ ohm}$$

$$X_{hs} = \sqrt{Z_{hs}^2 - R_{hs}^2}$$

$$= 4,198 \text{ ohm}$$

asumsi  $X_1 = X_2$ , maka

$$\text{Reaktansi bocor stator: } X_1 = \frac{X_{hs}}{2} = 2,099 \text{ ohm}$$

$$\text{Reaktansi bocor rotor : } X_2 = \frac{X_{hs}}{2} = 2,099 \text{ ohm}$$

#### 4.2. Perhitungan Parameter Dalam Per Unit

Analisis yang dilakukan dalam BAB III menggunakan sistem per unit (p.u), oleh karena itu parameter-parameter mesin harus dinyatakan dalam sistem per unit (p.u).

Besaran-besaran dasar yang digunakan :

Tegangan dasar : 220 volt

Arus dasar : 9,1 amper

Frekuensi dasar : 50 Hz

Putaran dasar : 1500 rpm

Impedansi dasar :  $\frac{\text{Tegangan dasar}}{\text{Arus dasar}} = 24,1758 \text{ ohm}$

Daya dasar : Tegangan dasar x Arus dasar = 2002 watt

Perhitungan parameter dalam sistem per unit

$$\text{Tahanan stator } (R_1) : \frac{1,65}{24,1758} = 0,0683$$

$$\text{Tahanan rotor } (R_2) : \frac{1,066}{24,1758} = 0,0441$$

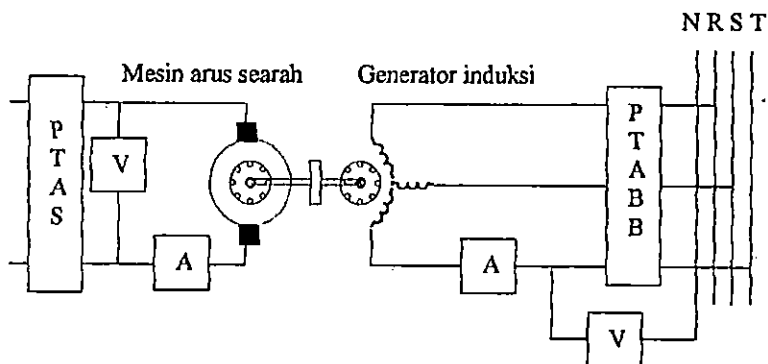
$$\text{Reaktansi bocor stator } (X_1) : \frac{2,099}{24,1758} = 0,0868$$

$$\text{Reaktansi bocor rotor } (X_2) : \frac{2,099}{24,1758} = 0,0868$$

$$\text{Reaktansi magnetisasi } (X_m) : \frac{41,667}{24,1758} = 1,7235$$

### 4.3. Kurva magnetisasi

Rangkaian percobaan untuk mendapatkan kurva magnetisasi seperti dalam Gambar 4.5.



Gambar 4.5. Rangkaian percobaan karakteristik magnetisasi

Langkah kerja percobaan

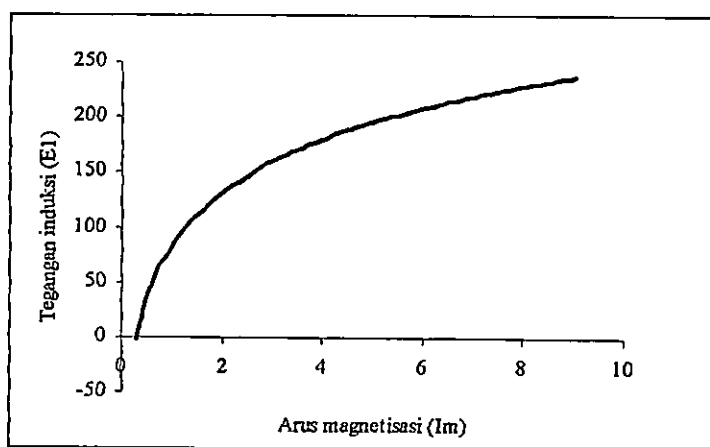
1. Buat rangkaian seperti Gambar 4.5.
2. Putar generator dengan putaran sinkron (pada penelitian ini 1500 rpm).
3. Pasang sumber tegangan arus bolak balik yang dapat diatur di terminal generator.
4. Naikkan tegangan arus bolak balik secara bertahap dan catat tegangan (V) serta arus (A).

Data percobaan karakteristik magnetisasi diperlihatkan dalam Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Data karakteristik magnetisasi

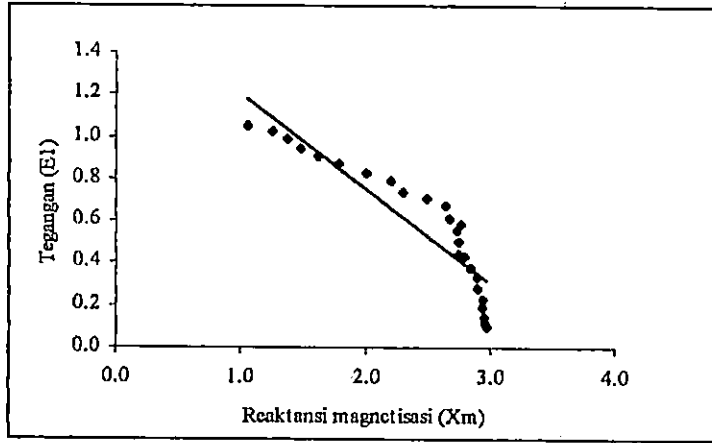
Percobaan		Analisis		
$I_m$	$V_{L-N}$	$Z$	$X_m$	$E$
0.29	21.5	74.138	72.021	20.886
0.37	27.3	73.784	71.666	26.517
0.45	33.1	73.556	71.438	32.147
0.58	42.6	73.448	71.331	41.372
0.70	51.4	73.429	71.311	49.918
0.87	62.9	72.299	70.181	61.057
1.05	75.8	72.190	70.073	73.576
1.21	85.5	70.661	68.543	82.937
1.39	96.8	69.640	67.522	93.855
1.46	100.2	68.630	66.511	97.106
1.65	113.2	68.606	66.487	109.704
1.85	125.9	68.054	65.935	121.980
1.92	132.0	68.750	66.631	127.932
2.08	138.6	66.635	64.515	134.192
2.30	152.0	66.087	63.967	147.125
2.60	162.0	62.308	60.187	156.486
2.90	167.5	57.759	55.636	161.345
3.25	179.8	55.323	53.199	172.898
3.75	190.5	50.800	48.674	182.528
4.42	200.0	45.249	43.120	190.589
5.10	210.0	41.176	39.044	199.126
5.80	220.5	38.017	35.882	208.118
6.50	230.9	35.523	33.386	217.007
7.40	241.2	32.595	30.454	225.358
9.02	250.1	27.727	25.579	230.724

Dari data tersebut dapat dibuat kurva magnetisasi seperti Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Kurva magnetisasi

Dari Tabel 4.1 diatas, diperoleh hubungan antara  $E_1$  dengan  $X_m$  seperti diperlihatkan dalam Gambar 4.7.



Gambar 4.7. Linierisasi kurva magnetisasi

Dari hasil linierisasi diperoleh koefisien

$$K_1 = 1,654$$

$$K_2 = -0,449$$

$$R^2 = 0,8355$$

Dengan demikian persamaan tegangan ( $E_1$ ) dapat dinyatakan

$$E_1 = 1,654 - 0,449 X_m$$

#### 4.4. Hasil Percobaan dan Simulasi

Percobaan dilakukan di Laboratorium Konversi Energi Elektrik, Institut Teknologi Bandung. Pengamatan yang dilakukan adalah melihat performance generator induksi penguatan sendiri pada saat penambahan beban.

- ❖ Generator induksi tanpa kompensasi.
- ❖ Generator induksi dengan kompensasi secara short shunt.
- ❖ Generator induksi dengan kompensasi secara long shunt.

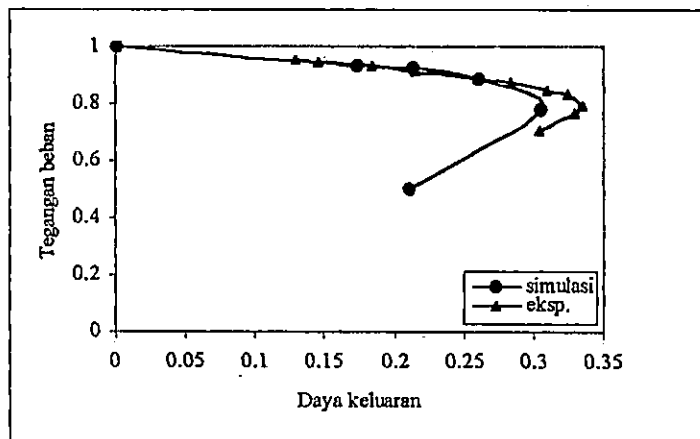
#### 4.4.1. Generator Induksi Tanpa Kompensasi

Tabel.4.2. Data hasil simulasi dengan beban diatur,  
 $C = 80 \mu\text{F}$ , putaran tetap 1 p.u

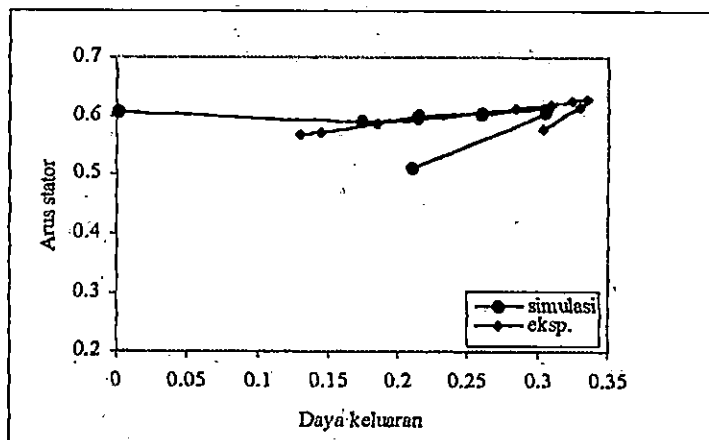
F	$V_L$	$I_s$	$I_c$	$P_0$
0.9987	1.0019	0.6080	0.6080	0.0010
0.9893	0.9333	0.5913	0.5610	0.1742
0.9870	0.9266	0.6021	0.5557	0.2146
0.9833	0.8843	0.6050	0.5284	0.2607
0.9761	0.7819	0.6060	0.4637	0.3057
0.9625	0.5028	0.5119	0.2940	0.2107

Tabel 4.3. Data hasil pengamatan dengan beban diatur,  
 $C = 80 \mu\text{F}$ , putaran tetap 1 p.u

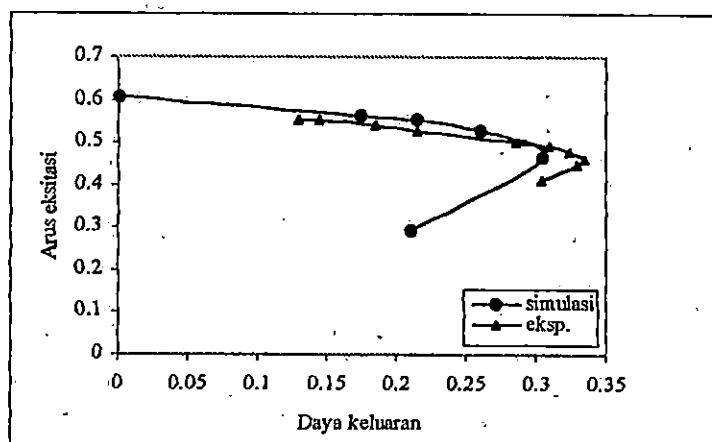
F	$V_L$	$I_s$	$I_c$	$P_0$
0.9940	0.9546	0.5670	0.5560	0.1299
0.9940	0.9455	0.5714	0.5527	0.1449
0.9920	0.9318	0.5868	0.5396	0.1848
0.9900	0.9136	0.5934	0.5286	0.2148
0.9860	0.8727	0.6121	0.5023	0.2847
0.9860	0.8500	0.6187	0.4923	0.3096
0.9860	0.8318	0.6209	0.4802	0.3247
0.9840	0.7955	0.6308	0.4615	0.3347
0.9820	0.7636	0.6231	0.4473	0.3297
0.9800	0.7045	0.6000	0.4121	0.3047



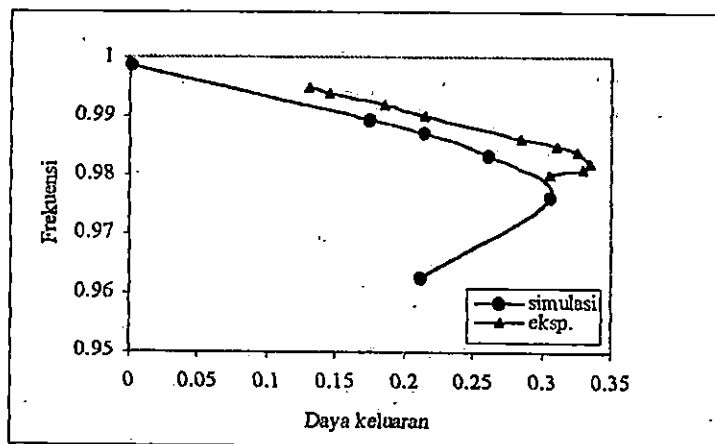
Gambar 4.8. Tegangan beban fungsi daya keluaran



Gambar 4.9. Arus stator fungsi daya keluaran



Gambar 4.10. Arus eksitasi fungsi daya keluaran

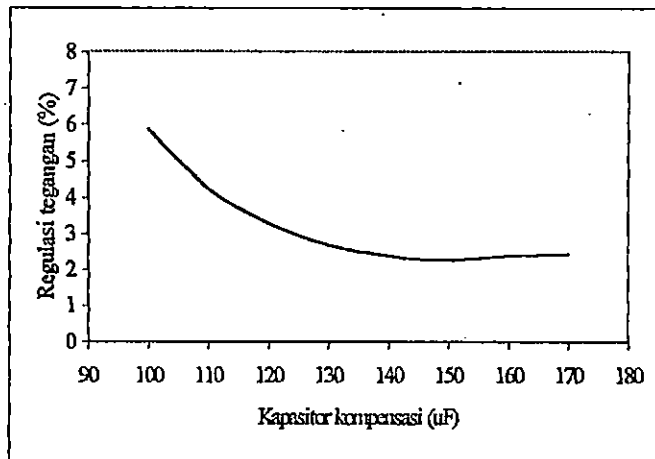


Gambar 4.11. Frekuensi fungsi daya keluaran



#### 4.4.2. Generator Induksi Dengan Hubungan Short-Shunt

Kapasitor eksitasi yang digunakan adalah  $80 \mu\text{F}$ , sedangkan kapasitor kompensasi yang diperoleh dari kurva regulasi tegangan dalam Gambar 4.12 adalah  $150 \mu\text{F}$  dengan regulasi tegangan sebesar 2,27 %.



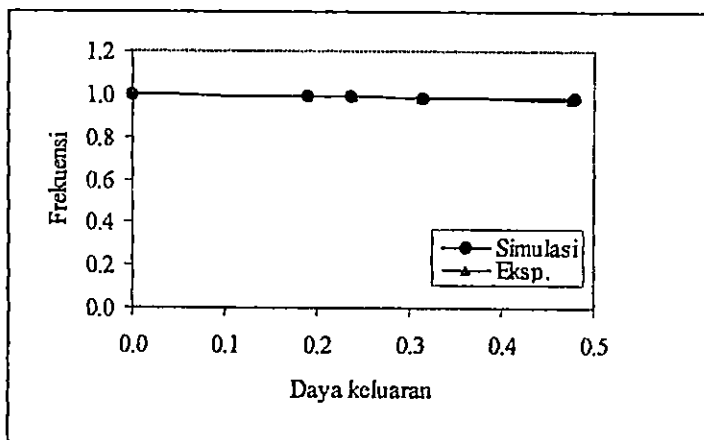
Gambar 4.12. Kurva regulasi tegangan generator induksi hubungan short shunt

Tabel 4.4. Data hasil simulasi generator induksi hubungan short shunt saat putaran tetap 1 p.u dengan kapasitor eksitasi  $80 \mu\text{F}$  dan kapasitor kompensasi  $150 \mu\text{F}$

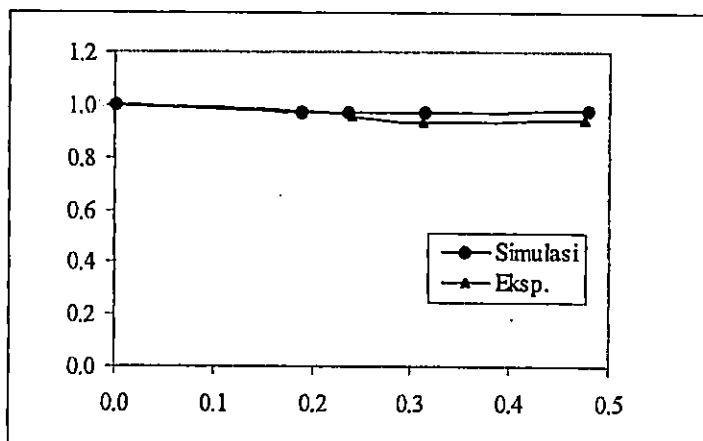
F	$V_L$	$I_s$	$I_c$	$P_0$
0.9987	1.0019	0.6080	0.6080	0.0010
0.9894	0.9717	0.6558	0.5933	0.1888
0.9873	0.9712	0.6914	0.5968	0.2358
0.9839	0.9725	0.7649	0.6065	0.3152
0.9783	0.9797	0.9504	0.6383	0.4799

Tabel 4.5. Data hasil pengamatan generator induksi hubungan short shunt saat putaran tetap 1 p.u dengan kapasitor eksitasi  $80 \mu\text{F}$  dan kapasitor kompensasi  $150 \mu\text{F}$

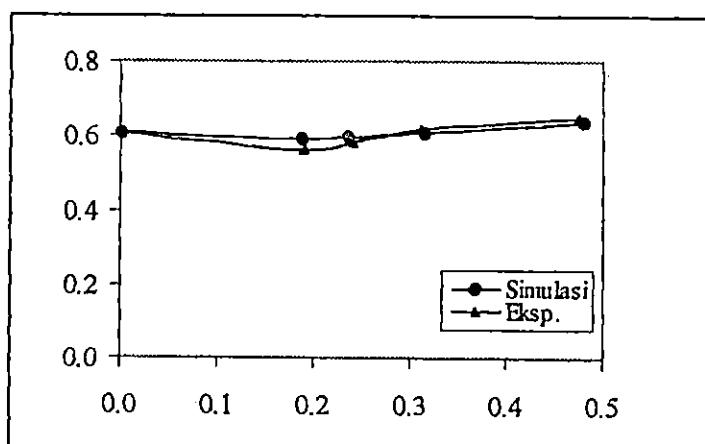
F	$V_L$	$I_s$	$I_c$	$P_0$
0.9980	1.0000	0.6154	0.6044	0.0010
0.9900	0.9773	0.6813	0.5604	0.1898
0.9860	0.9545	0.7253	0.5824	0.2398
0.9800	0.9318	0.7967	0.6154	0.3122
0.9720	0.9409	1.0000	0.6484	0.4745



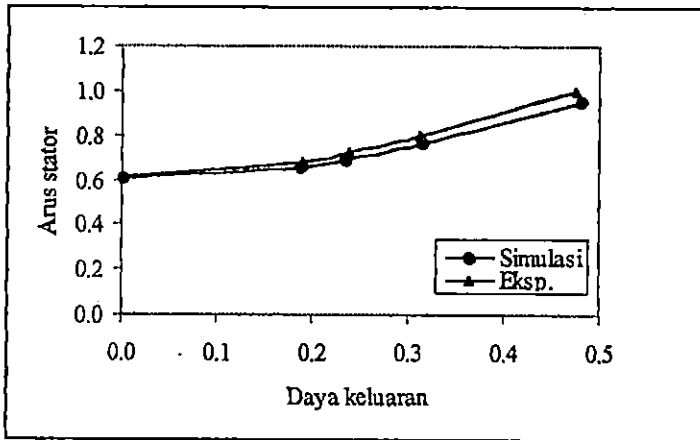
Gambar 4.13. Frekuensi fungsi daya keluaran generator induksi hubungan short shunt



Gambar 4.14. Tegangan beban fungsi daya keluaran generator induksi hubungan short shunt



Gambar 4.15. Arus eksitasi fungsi daya keluaran generator induksi hubungan short shunt



Gambar 4.16. Arus stator fungsi daya keluaran generator induksi hubungan short shunt

#### 4.4.3. Generator Induksi Dengan Hubungan Long-Shunt

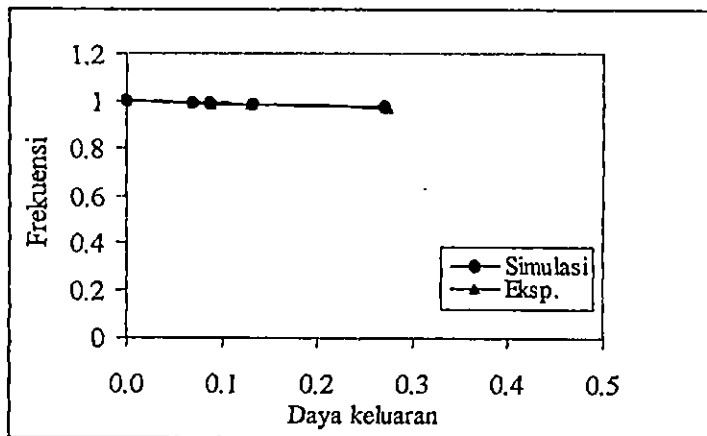
Nilai kapasitor eksitasi dan kapasitor kompensasi yang optimum untuk generator induksi hubungan long shunt adalah  $120 \mu\text{F}$  dan  $250 \mu\text{F}$ .

Tabel 4.6. Data hasil simulasi generator induksi hubungan long shunt saat putaran tetap 1 p.u dengan kapasitor eksitasi  $120 \mu\text{F}$  dan kapasitor kompensasi  $250 \mu\text{F}$

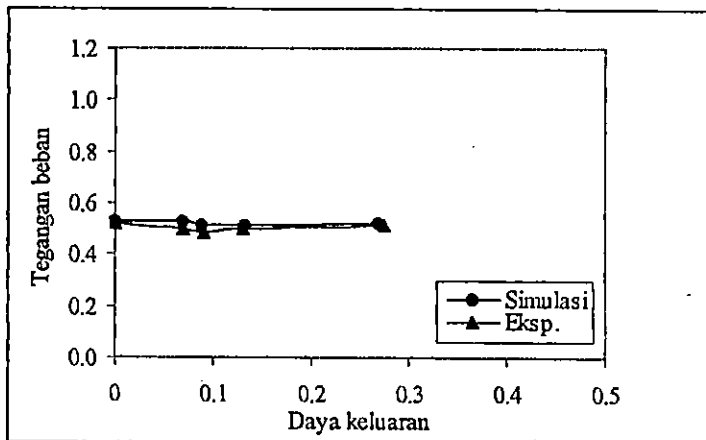
F	$V_L$	$I_s$	$I_c$	$P_0$
0.9987	0.5252	0.9965	0.9965	0.0003
0.9933	0.5240	0.9975	0.9888	0.0687
0.9915	0.5130	0.9813	0.9663	0.0877
0.9881	0.5137	0.9980	0.9643	0.1320
0.9790	0.5196	1.0971	0.9663	0.2700

Tabel 4.7. Data hasil pengamatan generator induksi hubungan long shunt saat putaran tetap 1 p.u dengan kapasitor eksitasi  $120 \mu\text{F}$  dan kapasitor kompensasi  $250 \mu\text{F}$

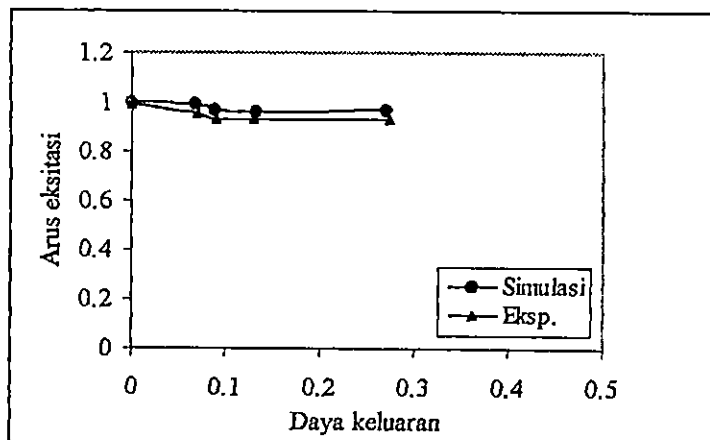
F	$V_L$	$I_s$	$I_c$	$P_0$
1	0.5227	0.989011	0.989011	0.0000
0.9900	0.5000	0.989011	0.956044	0.0699
0.9880	0.4864	0.934066	0.934066	0.0899
0.9840	0.5000	0.989011	0.934066	0.1299
0.9700	0.5091	1.153846	0.934066	0.2747



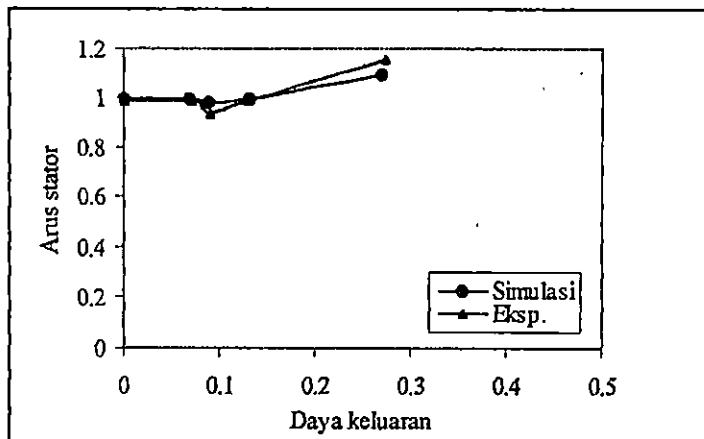
Gambar 4.17. Frekuensi fungsi daya keluaran generator induksi hubungan long shunt



Gambar 4.18. Tegangan beban fungsi daya keluaran generator induksi hubungan long shunt



Gambar 4.19. Arus eksitasi fungsi daya keluaran generator induksi hubungan long shunt



Gambar 4.20. Arus stator fungsi daya keluaran generator induksi hubungan long shunt

## 4.5. Pembahasan

### 4.5.1. Pengaruh Kapasitor Seri Terhadap Tegangan Beban

Bagi generator induksi dengan hubungan long shunt, kapasitor yang diserikan dengan tahanan dan reaktansi stator menyebabkan tegangan beban akan menjadi lebih kecil. Hal ini disebabkan karena impedansi di titik AC dalam rangkaian ekivalen generator induksi hubungan long shunt Gambar 3.6 akan bertambah besar jika dibandingkan dengan tanpa adanya kapasitor seri ini. Hubungan kapasitor eksitasi dengan kapasitor kompensasi merupakan hubungan seri. Bila beberapa buah kapasitor diserikan, maka kapasitansi totalnya menjadi semakin kecil yang menyebabkan tegangan pada terminal beban juga menjadi kecil. Dengan adanya kapasitor kompensasi ini penurunan tegangan akibat pertambahan beban tidak terjadi dengan cepat seperti diperlihatkan dalam gambar 4.18.

Sedangkan bagi generator induksi dengan hubungan short shunt, penambahan kapasitor seri tersebut menyebabkan tegangan pada terminal kapasitor eksitasi akan bertambah besar. Dengan penambahan kapasitor seri ini, seakan-akan kapasitor eksitasi menjadi lebih besar jika dibandingkan dengan tanpa penambahan kapasitor seri ini. Sesuai menurut teori, jika dua atau lebih kapasitor dihubungkan secara paralel, maka kapasitansi totalnya akan menjadi lebih besar. Akibatnya arus eksitasi akan bertambah

besar dan tegangan pada terminal beban juga ikut bertambah besar seperti diperlihatkan pada gambar 4.14. Perubahan beban tidak menyebabkan terjadinya penurunan tegangan secara cepat atau hilang dengan tiba-tiba.

#### **4.5.2. Pengaruh Kapasitor Seri Terhadap Arus Stator**

Pemilihan kapasitor seri yang tidak tepat bagi generator induksi hubungan long shunt dan short shunt akan mengakibatkan arus yang mengalir di kumparan stator akan melebihi nilai nominalnya. Dalam Gambar 4.16 memperlihatkan pengaruh perubahan beban terhadap arus yang mengalir pada kumparan stator di generator induksi penguatan sendiri dengan kompensasi secara short shunt. Arus yang mengalir pada kumparan stator akan menjadi bertambah besar akibat penambahan beban. Hal ini disebabkan tahanan beban menjadi lebih kecil, sehingga kapasitansi kapasitor kompensasi lebih dominan dibanding dengan tahanan beban. Sesuai dengan tinjauan pustaka pada bab II, bila beban berupa kapasitor, maka arus yang mengalir pada kumparan stator akan menjadi naik. Kenaikan arus yang mengalir pada stator tidak terjadi secara cepat, namun bila hal ini terus berlanjut akan mengakibatkan bagi generator tersebut, karena arus yang mengalir pada kumparan stator dapat menjadi lebih besar dari arus nominalnya. Sedangkan pada generator induksi dengan kompensasi secara long shunt kenaikan arus stator akan terjadi dengan cepat sesuai dengan penambahan beban.

#### **4.5.3. Pengaruh Kapasitor Seri Terhadap Frekuensi**

Bila kecepatan putar generator induksi penguatan sendiri dapat dijaga konstan pada setiap perubahan beban, frekuensi yang dihasilkan pada kedua metode kompensasi tidak terlalu jauh berbeda seperti diperlihatkan dalam gambar 4.13 dan 4.17.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Penurunan tegangan beban generator induksi penguatan sendiri yang terjadi akibat kenaikan arus beban dapat dikompensasi dengan penambahan kapasitor seri, baik di sisi stator maupun di sisi beban.
2. Dalam konfigurasi short shunt dengan kapasitor eksitasi  $80 \mu\text{F}$  dan kapasitor kompensasi  $150 \mu\text{F}$  diperoleh tegangan beban  $0,9797 \text{ p.u}$  dengan regulasi tegangan sebesar  $2,27 \%$ , arus stator  $0,9504 \text{ p.u}$ , arus beban  $0,4899 \text{ p.u}$ , serta daya keluaran per fasa yang mampu disalurkan ke beban sebesar  $0,4777 \text{ p.u}$ .
3. Dalam konfigurasi long shunt dengan kapasitor eksitasi  $120 \mu\text{F}$  dan kapasitor kompensasi  $250 \mu\text{F}$  diperoleh tegangan beban  $0,5196 \text{ p.u}$  dengan regulasi tegangan sebesar  $1,08 \%$ , arus stator  $1,0971 \text{ p.u}$ , arus beban  $0,5196 \text{ p.u}$ , serta daya keluaran per fasa yang mampu disalurkan ke beban sebesar  $0,2700 \text{ p.u}$ .
4. Untuk nilai kapasitor dan eksitasi yang sama, generator induksi penguatan sendiri dengan konfigurasi short shunt akan memberikan hasil yang lebih baik bila dibandingkan dengan konfigurasi long shunt.
5. Antara hasil simulasi dan eksperimen mempunyai model yang sama dan terdapat kesesuaian yang mendekati. Perbedaan antara hasil simulasi dengan eksperimen disebabkan karena alat ukur yang digunakan mempunyai toleransi yang kurang sempurna dan pengabaian-pengabaian yang dilakukan.

## 5.2. Saran

1. Dalam penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan analisis generator induksi penguatan sendiri saat kondisi transien untuk melihat perubahan beban yang dinamis.
2. Perubahan beban atau perubahan kecepatan putaran rotor akan menyebabkan terjadinya perubahan frekuensi keluaran. Untuk itu perlu studi lanjutan untuk penyempurnaan penelitian ini, yaitu penggunaan elektronika daya untuk mengatur frekuensi keluaran, sehingga diperoleh frekuensi keluaran yang tetap walaupun terjadi perubahan beban atau perubahan kecepatan putaran rotor.
3. Dalam penelitian ini kompensasi tegangan diperoleh dengan penambahan kapasitor seri, untuk penelitian berikutnya disarankan untuk meneliti kompensasi tegangan dengan menggunakan induktor.



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Bim, J.Szajner and Y. Burian, " Voltage compensation of an induction generator with long-shunt connection ", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. EC-4, No. 3, pp.526-530, September 1989.
- [2] L.Ouazane and G. Mcpherson, Jr., " Analysis of the isolated induction generators ", IEEE Trans. On P.A.S., Vol. PAS-102, No. 8, pp.2793-2798.
- [3] N.H. Malik and A.A. Mazi. "Capacitance Requirements For Isolated Self Excited Induction Generators". IEEE Trans On Energy Conversion, Vol. EC-2, No. 1, pp.62-69, March 1987.
- [4] N.H. Malik and S.E. Hague, " Steady state analysis and performance of isolated self-excited induction generator " , IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. EC-1, No. 3, pp.134-139, September 1986.
- [5] S.S. Murthy, O.P. Malik and A.K. Tandom, " Analysis of self-excited induction generators " , Proceeding of IEE, Vol. 129, Part C, No. 6, pp.260-265, November 1982.
- [6] T.F. Chan, "Steady-State Analysis Of Self-Excited Induction Generators " , IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 9, No. 2, pp.288-296, September 1994.
- [7] T.F. Chan, "Analysis Of Self-Excited Induction Generators Using An Iterative Method", IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 10, No. 3, pp.502-507, September 1995.
- [8] Yusuf Ismail, " Studi Analisa Generator Penguatan Snediri Pada Beban Dinamik", Thesis Elektroteknik ITB, 1995.