

**ANALISIS KARAKTERISTIK PENGATURAN VAR
PADA GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT
SENDIRI DENGAN MENGGUNAKAN KONDENSOR
SINKRON**

SKRIPSI

Oleh

WINNA EVELINA

04 04 03 0849



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

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

**ANALISIS KARAKTERISTIK PENGATURAN VAR
PADA GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT
SENDIRI DENGAN MENGGUNAKAN KONDENSOR
SINKRON**

SKRIPSI

Oleh

WINNA EVELINA

04 04 03 0849



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

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

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi dengan judul :

ANALISIS KARAKTERISTIK PENGATURAN VAR PADA GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI DENGAN MENGGUNAKAN KONDENSOR SINKRON

yang dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada program studi Teknik Elektro, Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, sejauh yang saya ketahui bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari skripsi yang sudah dipublikasikan dan atau pernah dipakai untuk mendapatkan gelar kesarjanaan di lingkungan Universitas Indonesia maupun di perguruan tinggi atau instansi manapun, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Depok, 9 Juli 2008

Winna Evelina

NPM 0404030849

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul:

**ANALISIS KARAKTERISTIK PENGATURAN VAR PADA GENERATOR
INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI DENGAN MENGGUNAKAN
KONDENSOR SINKRON**

Dibuat untuk melengkapi sebagian persyaratan menjadi sarjana teknik pada program studi Teknik Elektro Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Skripsi ini telah diujikan pada sidang ujian skripsi pada 4 Juli 2008 dan dinyatakan memenuhi syarat/sah sebagai skripsi pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Depok, 9 Juli 2008

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Uno B. Sudibyo

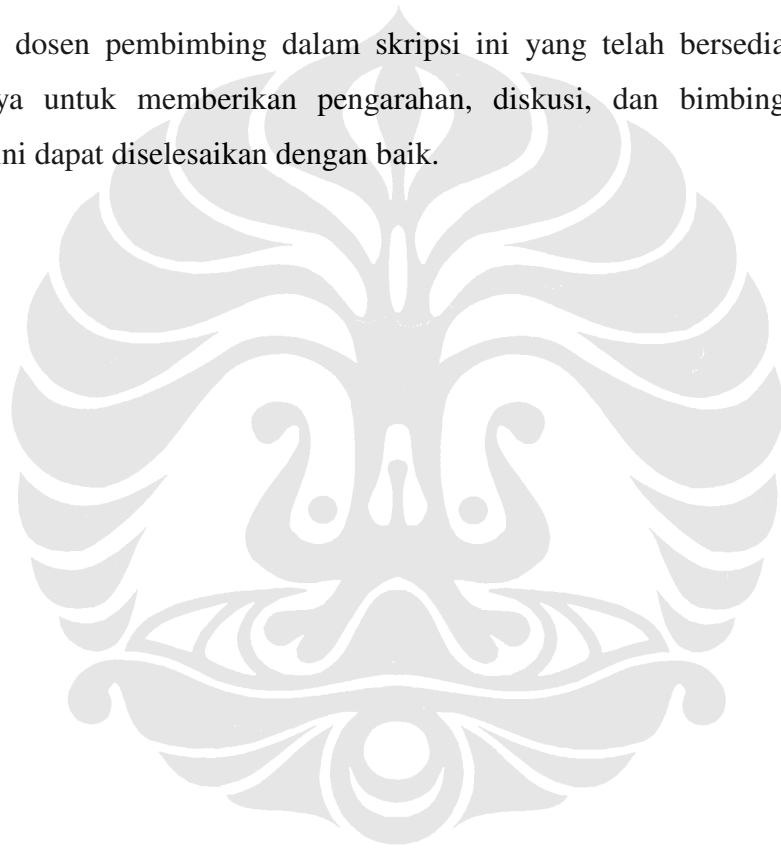
NIP. 130 517 308

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis ucapkan kepada **Allah SWT** karena atas rahmat dan karunia-Nya penulisan tugas skripsi ini dapat diselesaikan. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

Dr. Ir. Uno B. Sudiby

Sebagai dosen pembimbing dalam skripsi ini yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberikan pengarahan, diskusi, dan bimbingan, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.



Winna Evelina
NPM 04 04 03 0849
Departemen Teknik Elektro

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Uno B. Sudibyo

**ANALISIS KARAKTERISTIK PENGATURAN VAR PADA GENERATOR
INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI MENGGUNAKAN KONDENSOR
SINKRON**

ABSTRAK

Generator induksi adalah mesin induksi dimana rotornya berputar lebih cepat dari medan magnet putar. Generator induksi mampu menghasilkan tegangan. Besar tegangan yang dihasilkan dipengaruhi oleh kecepatan putar dari generator. Generator induksi tetap dapat beroperasi meskipun kecepatannya berubah. Hal ini menyebabkan tegangan yang dihasilkan tidak konstan sehingga pengaturan tegangannya tidak bagus. Salah satu jenis generator induksi adalah generator induksi berpenguat sendiri (SEIG) yang menggunakan kapasitor untuk eksitasi. Untuk menstabilkan tegangan, dibutuhkan metode atau peralatan pengatur tegangan. Salah satunya adalah kondensor sinkron. Kondensor sinkron mampu mengatur daya reaktif dalam sistem dengan dihubungkan pada terminal generator.

Skripsi ini menjelaskan tentang simulasi pengaturan tegangan pada SEIG dengan menggunakan kondensor sinkron. Simulasi ini dikerjakan pada perangkat lunak MATLAB. Parameter yang digunakan pada simulasi diambil dari mesin induksi di laboratorium. Sistem SEIG disimulasikan menggunakan kondensor sinkron untuk menambah daya reaktif pada sistem. Analisis dari seluruh simulasi dipaparkan pada bagian akhir skripsi untuk mengetahui karakteristik hasil pengaturan tegangan dengan kondensor sinkron.

Berdasarkan hasil simulasi, kondensor sinkron mampu mengatur tegangan pada sistem. Hasil yang diperoleh, tegangan pada ketiga fasa seimbang dan tegangan yang dihasilkan oleh generator induksi stabil. Simulasi ini menunjukkan perbedaan tegangan yang dihasilkan antara menggunakan dengan tanpa menggunakan pengatur tegangan. Untuk memaksimalkan pengaturan tegangan dengan menggunakan kondensor sinkron, sangat penting mengetahui besar daya reaktif yang dibutuhkan dalam sistem. Hal ini diperlukan untuk menyeimbangkan daya reaktif yang dibutuhkan dalam sistem dengan daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron. Untuk mengatur daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron, besar eksitasi yang diberikan pada kondensor sinkron perlu diatur. Semakin besar jatuh tegangan dalam sistem berarti semakin besar daya reaktif yang dibutuhkan.

KATA KUNCI : Generator Induksi, Kondensor Sinkron, Pengatur Tegangan

Winna Evelina
NPM 04 04 03 0849
Electrical Engineering Department

Counselor
Dr. Ir. Uno B. Sudibyo

**ANALYSIS OF SELF EXCITED INDUCTION GENERATOR VAR
REGULATION CHARACTERISTICS USING SYNCHRONOUS
CONDENSOR**

ABSTRACT

An induction generator is an induction machine whose rotor rotates faster than its rotating magnetic field. An induction generator is capable of producing voltage which value is influenced by the rotating speed of the generator. An induction generator can still operate although its speed changes. This causes a non constant voltage regulation is not good. One types of an induction generator is a Self Excited Induction Generator (SEIG) which uses capacitors for excitation. To stabilize its voltage, methods or equipments of voltage regulation is needed, such as synchronous condenser. A synchronous condenser is able to control reactive power on the system by connecting it to generators terminal.

This paper describes about voltage regulator simulation on SEIG by using synchronous condenser. The simulation is conducted using MATLAB software. Parameters for the simulation are taken from an induction machine in the energy conversion laboratory. The SEIG system is simulated using synchronous condenser to add reactive power to system. The analysis of simulation is explained on the last section of the paper. It is used to know the characteristic of voltage regulator with synchronous condenser.

Based on simulation, the synchronous condenser is able to control the voltage on system. The result is the voltage on three-phase system is balance and voltage produced by the induction generator is stable. The simulation shows voltage difference produced with and without voltage regulation. To maximize voltage regulation with synchronous condenser, it is important to know the value of reactive power needed on system, balance the reactive power needed on the system and the reactive power produced by the synchronous condenser. To control reactive power produced by the synchronous condenser, excitation to the synchronous condenser need to be managed. The bigger the voltage drop on the system, the bigger reactive power needed.

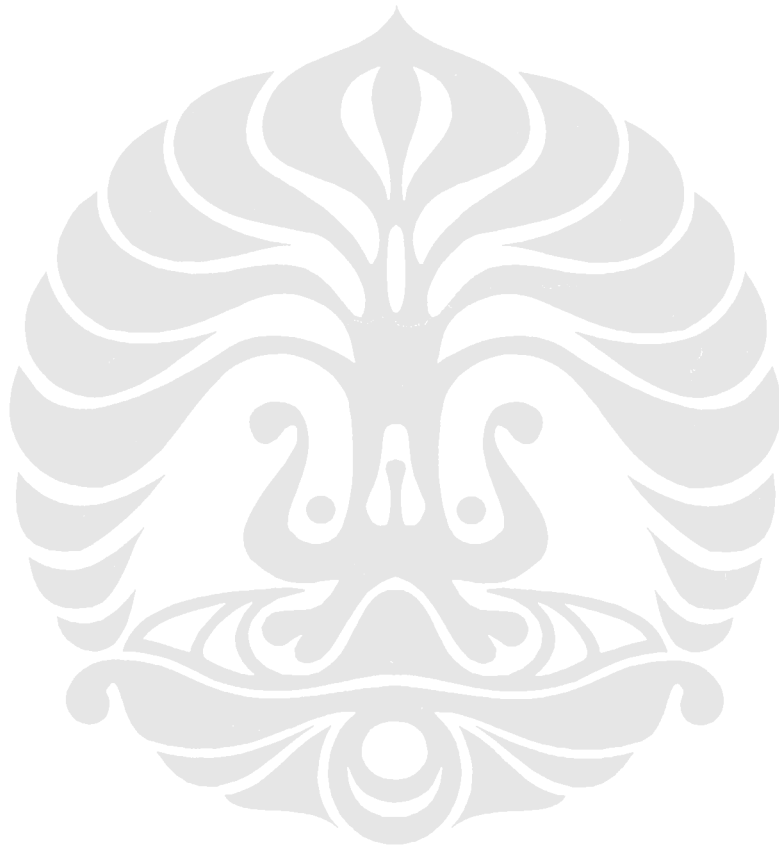
KEYWORDS : Induction Generator, Synchronous Condenser, Voltage Regulator

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI	ii
PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xiv
DAFTAR ISTILAH DAN SIMBOL	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH	2
1.3 TUJUAN PENULISAN	2
1.4 BATASAN MASALAH	3
1.5 METODOLOGI PENELITIAN	3
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	3
BAB II TEORI GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI DAN METODE PENGATURAN TEGANGAN	4
2.1 MESIN INDUKSI	4
2.2 GENERATOR INDUKSI	4
2.2.1 Umum	4
2.2.2 Jenis-jenis Generator Induksi	5
2.2.2.1 Generator Induksi Masukan Ganda	5
2.2.2.2 Generator Induksi Berpenguat Sendiri	6
2.3 GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI	8
2.3.1 Prinsip Kerja	8
2.3.2 Proses Pembangkitan Tegangan	10
2.3.3 Rangkaian Ganti	11

2.4 NILAI KAPASITANSI MINIMUM	11
2.5 METODE PENGATURAN TEGANGAN	13
2.6 KONDENSOR SINKRON	16
2.6.1 Prinsip Kerja	17
2.6.2 Pengaturan Tegangan dengan Kondensor Sinkron	17
2.6.3 Rangkaian Ganti	19
BAB III PEMODELAN DAN SIMULASI PENGATURAN VAR PADA GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI DENGAN KONDENSOR SINKRON	20
3.1 PEMODELAN GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI	20
3.1.1 Kerangka Acuan	20
3.1.2 Model Mesin Induksi	22
3.1.3 Model Generator Induksi Berpenguat Sendiri	26
3.2 PARAMETER MESIN INDUKSI	29
3.2.1 Nilai Kapasitansi Minimum	31
3.3 PEMODELAN KONDENSOR SINKRON	32
3.3.1 Fluks Bocor dalam Kumparan	34
3.3.2 Persamaan Tegangan pada Acuan $dq0$ Rotor	35
3.3.3 Persamaan Arus dari Fluks Bocor	35
3.3.4 Rangkaian Ganti Pemodelan Mesin Sinkron	36
3.4 RANGKAIAN SISTEM SIMULASI	37
3.4.1 Simulasi Sistem Dengan MATLAB	38
3.5 MODEL PENGENDALI TEGANGAN	40
3.5.1 Kondensor Sinkron	41
3.6 SIMULASI SISTEM	45
BAB IV ANALISIS HASIL SIMULASI PENGATURAN VAR PADA GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI DENGAN KONDENSOR SINKRON	48
4.1 ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM TANPA PENGENDALI TEGANGAN	49
4.2 ANALISIS HASIL SIMULASI KONDENSOR SINKRON	54

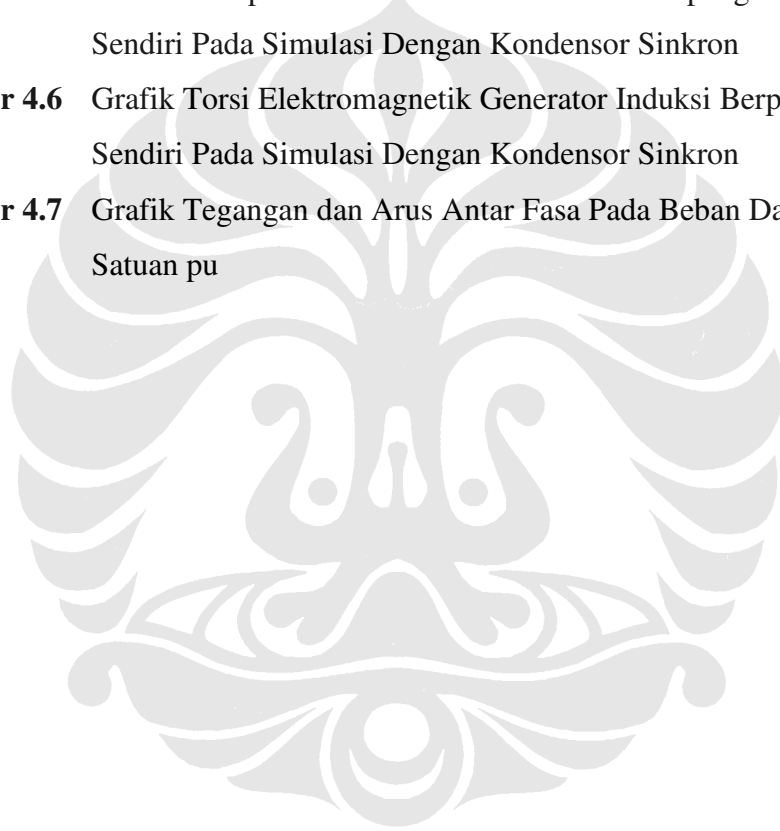
4.3 ANALISIS HASIL SIMULASI GENERATOR INDUKSI DENGAN KONDENSOR SINKRON	57
BAB V KESIMPULAN	65
DAFTAR ACUAN	66
DAFTAR PUSTAKA	67
LAMPIRAN	68



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema Generator Induksi Masukan Ganda	5
Gambar 2.2	Skema Generator Induksi Berpenguat Sendiri	7
Gambar 2.3	Rangkaian Ganti Generator Induksi Berpenguat Sendiri	11
Gambar 2.4	Skema Static VAR Compensator	14
Gambar 2.5	Skema Diagram Fasor Motor Sinkron Tanpa Beban	15
Gambar 2.6	Skema Aplikasi Kondensor Sinkron Pada Sistem	16
Gambar 2.7	Hubungan Arus Eksitasi (I_f) Dengan Arus Jangkar (I_a) Pada Beban Tetap	18
Gambar 2.8	Rangkaian Ganti Kondensor Sinkron	19
Gambar 3.1	Hubungan $abc-dq0$	22
Gambar 3.2	Mesin Induksi 3 Fasa 2 Kutub Dengan Konfigurasi Bintang	22
Gambar 3.3	Model Mesin Induksi Dalam Referensi Kerangka Acuan	24
Gambar 3.4	Rangkaian Ganti Generator Induksi Berpenguat Sendiri Pada Referensi Kerangka Acuan	27
Gambar 3.5	Pemodelan Mesin Sinkron Ideal	32
Gambar 3.6	Rangkaian Ganti Mesin Sinkron Pada Sistem $dq0$	37
Gambar 3.7	Model Mesin Induksi yang Digunakan Pada MATLAB	38
Gambar 3.8	Kotak Dialog Parameter Mesin Induksi Pada MATLAB	39
Gambar 3.9	Simulasi Generator Induksi Berpenguat Sendiri	40
Gambar 3.10	Model Mesin Sinkron Pada MATLAB	41
Gambar 3.11	Kotak Dialog Mesin Sinkron	42
Gambar 3.12	Rangkaian Simulasi Kondensor Sinkron Sebagai Pengendali Tegangan	43
Gambar 3.13	Simulasi Pengaturan VAR Pada Generator Induksi Berpenguat Sendiri Dengan Menggunakan Kondensor Sinkron	44
Gambar 3.14	Diagram Blok Fungsi Pengendali Eksitasi Mesin Sinkron	44
Gambar 3.15	Grafik Torsi Masukan Generator	45
Gambar 3.16	Grafik Tegangan Medan Masukan Mesin Sinkron	46

Gambar 4.1	Grafik Kecepatan Putar Generator Induksi Berpenguat Sendiri	51
Gambar 4.2	Tegangan Keluaran Generator Induksi Berpenguat Sendiri	53
Gambar 4.3	Daya Keluaran Generator Induksi Berpenguat Sendiri Dalam kW	53
Gambar 4.4	Grafik Kecepatan Putar, Daya Aktif dan Torsi Elektromagnetik Dari Kondensor Sinkron	55
Gambar 4.5	Grafik Kecepatan Putar Generator Induksi Berpenguat Sendiri Pada Simulasi Dengan Kondensor Sinkron	60
Gambar 4.6	Grafik Torsi Elektromagnetik Generator Induksi Berpenguat Sendiri Pada Simulasi Dengan Kondensor Sinkron	61
Gambar 4.7	Grafik Tegangan dan Arus Antar Fasa Pada Beban Dalam Satuan pu	64



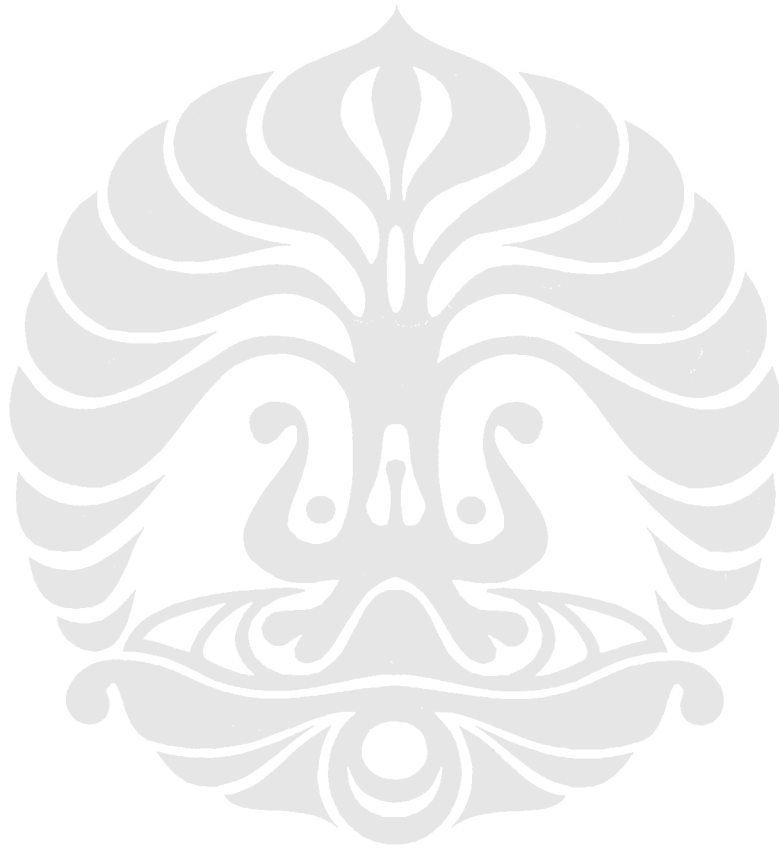
DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Parameter Mesin Induksi Yang Digunakan Dalam Penelitian	31
------------------	---	----



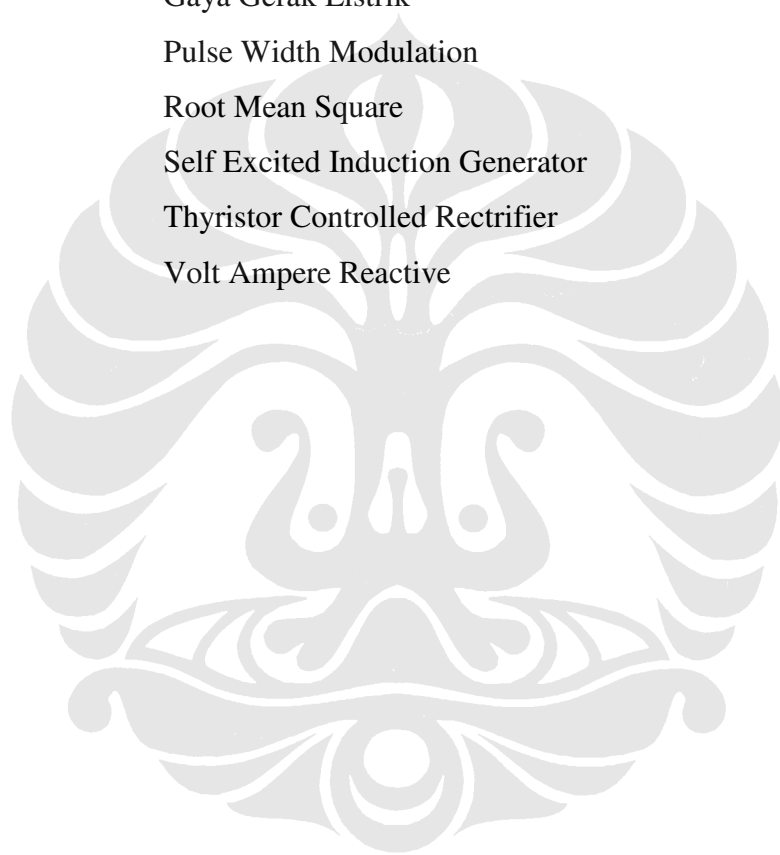
DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Gambar Grafik Hasil Simulasi	68
	Hasil Simulasi Sistem Tanpa Pengendali Tegangan	68
	Hasil Simulasi Kondensor Sinkron	70
	Hasil Simulasi Dengan Kondensor Sinkron	72
Lampiran 2	Rangkaian Simulasi	73



DAFTAR SINGKATAN

ABB	Arus Bolak Balik
AS	Arus Searah
DFIG	Doubly Fed Induction Generator
ELC	Electronic Load Controller
FC-TCR	Fixed Capacitor Thyristor Controlled Rectifier
GGL	Gaya Gerak Listrik
PWM	Pulse Width Modulation
RMS	Root Mean Square
SEIG	Self Excited Induction Generator
TCR	Thyristor Controlled Rectifier
VAR	Volt Ampere Reactive



DAFTAR SIMBOL

abc	= Sumbu Fasa
$dq0$	= Sumbu Kerangka Acuan
f	= Frekuensi
θ	= Sudut Putar
ω	= Kecepatan Putar
ζ	= Vairabel Integral
N	= Jumlah Lilitan
λ	= Fluks Gandeng
p	= Notasi Derivatif
L	= Induktansi
i, I	= Arus
V, U	= Tegangan
P	= Daya Aktif
Q	= Daya Reaktif
j	= Notasi Bilangan Imajiner
X	= Reaktansi
R	= Tahanan
a	= nilai per unit dari frekuensi
b	= nilai per unit dari kecepatan
Z	= Impedansi
C	= Kapasitansi
π	= notasi phi
s	= slip

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG MASALAH

Berdasarkan penelitian, kebutuhan energi yang dibutuhkan di dunia setiap tahun akan selalu meningkat. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut biasanya digunakan sumber energi tak terbarukan. Namun sumber energi tak terbarukan terbatas jumlahnya dan dikhawatirkan tidak mampu lagi memenuhi kebutuhan energi di dunia. Selain itu penggunaan sumber energi tak terbarukan, dalam hal ini minyak bumi, dapat mengakibatkan timbulnya pencemaran lingkungan akibat dari dihasilkannya gas buang dari pemakaian sumber energi tersebut. Untuk mengatasi masalah tersebut maka perlu dilakukan pengembangan teknologi dengan menggunakan sumber energi terbarukan. Salah satu bentuk teknologi yang menggunakan sumber energi terbarukan dan sedang dikembangkan adalah generator induksi.

Generator induksi adalah generator yang menggunakan prinsip induksi elektromagnetik dalam pengoperasiannya. Generator ini dapat bekerja pada putaran rendah serta tidak tetap kecepatannya, sehingga generator induksi banyak digunakan pada pembangkit listrik dengan daya yang rendah seperti pada pembangkit listrik tenaga mikrohidro atau pembangkit listrik tenaga bayu. Keuntungan dari penggunaan generator induksi dibandingkan dengan generator biasa diantaranya adalah ukuran dan harga yang lebih murah, tidak memerlukan sumber AS, adanya proteksi terhadap bahaya kelebihan beban dan hubung singkat, dan lain-lain. Oleh karena itu, generator induksi banyak digunakan pada sistem tenaga listrik yang terisolir. Pada sistem tenaga listrik yang terisolir, generator induksi menggunakan penguat yang dihasilkan sendiri (*self excited*) sehingga sering disebut generator induksi berpenguat sendiri (*self excited induction generator*).

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Permasalahan yang dihadapi dalam penggunaan generator induksi adalah tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator. Karena besarnya energi putar yang masuk ke dalam generator tidak tetap sehingga mengakibatkan tegangan yang dihasilkan generator tidak tetap pula. Dalam suatu sistem tenaga listrik dibutuhkan tegangan yang tetap, maka dalam penggunaan generator induksi dibutuhkan adanya pengaturan tegangan. Pengaturan tegangan dapat dilakukan dengan menggunakan penambah daya reaktif seperti bank kapasitor, kondensor sinkron dan *Static Var Compensator* (SVC). Selain sebagai pengatur tegangan, bank kapasitor pada generator induksi berpenguat sendiri juga digunakan sebagai sumber daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator.

Ketika kecepatan putar generator berkurang, maka tegangan yang dihasilkan generator juga berkurang. Penggunaan kondensor sinkron pada terminal generator akan menaikkan nilai tegangan yang dihasilkan oleh generator. Namun penggunaan kondensor sinkron akan mempengaruhi nilai frekuensi listrik yang dihasilkan oleh generator. Untuk mengatur agar nilai frekuensi listrik tetap dapat digunakan inverter yang diatur[1].

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan permasalahan tersebut, pada penelitian ini penulis akan menganalisis penggunaan kondensor sinkron sebagai salah satu metode pengaturan tegangan generator induksi yang beroperasi dengan kecepatan yang berubah-ubah dan juga dampaknya terhadap frekuensi listrik yang dihasilkan. Diharapkan dari penelitian ini dapat diketahui karakteristik penggunaan kondensor sinkron sebagai pengaturan tegangan pada generator induksi yang bekerja pada putaran yang tidak tetap dengan beban tetap. Sehingga dari hasil penelitian ini dapat diketahui nilai daya reaktif yang diperlukan dalam pengaturan tegangan generator pada kisaran perubahan putaran generator tertentu.

1.4 BATASAN MASALAH

Skripsi ini dibatasi hanya membahas pada hal-hal berikut:

1. Karakteristik mesin induksi yang digunakan diperoleh dengan mengukur saat mesin beroperasi sebagai motor
2. Pengukuran tegangan, arus, dan daya dilakukan pada kondisi ideal
3. Simulasi yang dilakukan menggunakan blok model dari perangkat lunak
4. Kondisi saturasi pada simulasi diabaikan
5. Karakteristik dan dasar teori motor AS yang digunakan sebagai penggerak utama generator induksi tidak dibahas pada skripsi ini
6. Pengaruh pengaturan tegangan generator induksi terhadap frekuensi yang dihasilkan tidak dibahas pada skripsi ini.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dilakukan dimulai dengan studi literatur, studi perancangan rangkaian, simulasi rangkaian penelitian dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB R2007a, aplikasi rangkaian penelitian dengan menggunakan mesin induksi merek Labvolt, dan analisis perbandingan hasil simulasi dengan perangkat lunak dan teori.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Agar mempermudah pembahasan, penulisan dibagi dalam beberapa bab. Bab satu menguraikan latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Bab dua membahas tentang contoh pembangkitan energi listrik dengan sumber energi terbarukan, dasar teori generator induksi berpenguat sendiri, dan beberapa metode pengaturan tegangan serta teori pengaturan tegangan dengan kondensator sinkron. Bab tiga membahas perancangan rangkaian simulasi dengan perangkat lunak dan aplikasi rangkaian pada mesin. Bab empat membahas hasil simulasi serta analisis perbandingan hasil simulasi dengan teori. Bab lima merupakan penutup yang berisi kesimpulan.

BAB II

TEORI GENERATOR INDUKSI PENGUAT SENDIRI DAN METODE PENGATURAN TEGANGAN

2.1 MESIN INDUKSI

Mesin induksi adalah mesin listrik yang bekerja menggunakan prinsip induksi elektromagnetik. Dikatakan mesin induksi karena tegangan yang timbul pada stator, yang nantinya akan menghasilkan medan magnet stator dan arus stator, diinduksikan pada kumparan rotor. Tidak dihubungkan secara langsung dengan menggunakan kabel. Salah satu keuntungan tetap dari mesin induksi adalah tidak dibutuhkannya sumber AS dalam menjalankan mesin tersebut.

Berdasarkan konstruksinya, mesin induksi dapat dibagi berdasarkan jenis rotornya. Terdapat dua jenis rotor yang digunakan dalam mesin induksi. Yang pertama adalah jenis rotor belitan. Rotor jenis ini menggunakan kumparan yang berbentuk lilitan dari kawat. Keuntungan rotor jenis ini adalah dapat dihubungkan dengan komponen listrik lain seperti hambatan ataupun komponen pengatur tegangan seperti PWM. Komponen-komponen ini dapat dihubungkan langsung dengan rotor melalui kabel.

Jenis rotor yang kedua adalah rotor sangkar bajing. Pada rotor ini tidak terdapat kumparan, terdiri dari batang-batang logam yang dirangkai sedemikian rupa sehingga batang-batang logam tersebut melintang di sepanjang permukaan rotor untuk kemudian di tiap ujung batang-batang logam tersebut disatukan dengan menggunakan cincin. Rotor jenis ini tidak dapat dihubungkan dengan komponen listrik.

2.2 GENERATOR INDUKSI

2.2.1 Umum

Generator induksi merupakan mesin induksi yang bekerja sebagai generator. Ketika kecepatan putar rotor mesin induksi lebih besar dari kecepatan sinkron dari medan putar pada celah udara, mesin induksi yang sama dapat bekerja sebagai generator induksi [1].

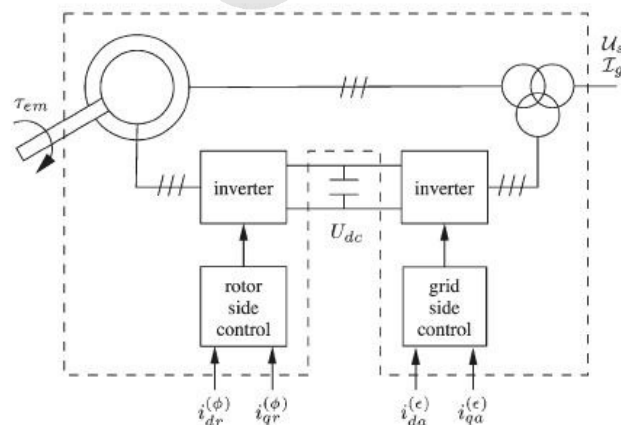
Generator induksi masih dapat bekerja dan menghasilkan tegangan walaupun kecepatan putarnya dan sumber daya masukannya tidak tetap. Oleh karena itu, generator induksi saat ini mulai banyak digunakan sebagai pembangkit energi terutama untuk sumber daya tak terbarukan terutama untuk daerah yang terisolasi dari jaringan listrik.

2.2.2 Jenis-jenis Generator Induksi

Dalam aplikasinya generator induksi dibagi menjadi dua jenis yaitu generator induksi masukan ganda (*Doubly Fed Induction Generator* atau DFIG) dan generator induksi berpenguat sendiri (*Self Excited Induction Generator* atau SEIG). Pembagian jenis generator ini berdasarkan pada sumber eksitasi generator berasal. Eksitasi pada generator induksi dibutuhkan untuk menghasilkan medan magnet pada rotor generator untuk selanjutnya menghasilkan induksi elektromagnetik pada stator yang akan menghasilkan energi listrik. Selain itu juga eksitasi dibutuhkan untuk mengkompensasi daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator dalam membangkitkan listrik.

2.2.2.1 Generator Induksi Masukan Ganda

Pada generator induksi masukan ganda, eksitasi diperoleh dari jaringan listrik yang telah terpasang. Generator induksi jenis ini menyerap daya reaktif dari jaringan listrik untuk membangkitkan medan magnet yang dibutuhkan. Pada generator induksi jenis ini, terminal keluaran generator dihubungkan dengan inverter yang kemudian dihubungkan dengan bagian rotor generator.



Gambar 2.1 Skema Generator Induksi Masukan Ganda

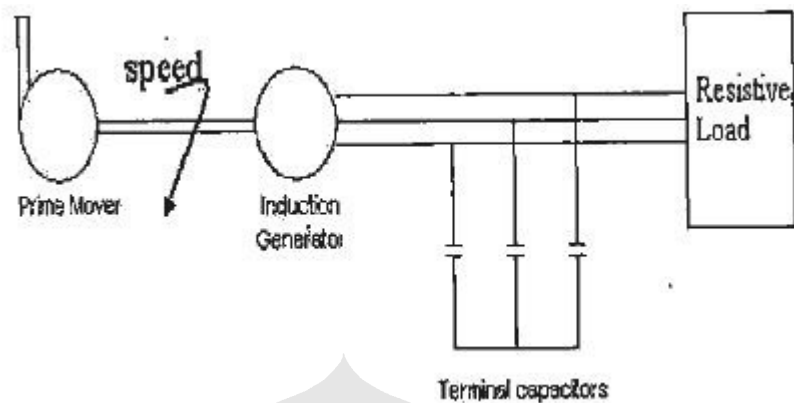
Gambar di atas merupakan gambar skema dari model generator induksi masukan ganda. Seperti yang terlihat pada gambar, terdapat dua buah inverter yang menghubungkan antara keluaran generator dengan rotor. Kedua inverter tersebut dihubungkan dengan penghubung AS. Inverter yang terhubung dengan jaringan bekerja pada frekuensi yang sama dengan frekuensi jaringan. Inverter ini juga mengatur besar faktor daya yang masuk agar sesuai dengan besar daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator. Sedangkan inverter yang terhubung dengan rotor bekerja pada frekuensi yang sesuai dengan frekuensi putaran generator. Dengan menggunakan konfigurasi seperti ini, besar arus yang mengalir pada rotor dapat diatur sesuai dengan daya yang akan dibangkitkan.

Generator induksi masukan ganda saat ini banyak digunakan sebagai generator pada pembangkit listrik tenaga bayu. Keuntungan dari generator induksi masukan ganda diantaranya adalah tegangan dan frekuensi yang dihasilkan dapat tetap besarnya walaupun kecepatan putarnya berubah-ubah. Namun generator induksi jenis ini membutuhkan inverter sebagai pengatur tegangan pada rotor dan juga rotor jenis kumparan karena generator ini membutuhkan sumber pada rotornya. Sehingga tidak semua jenis mesin induksi dapat digunakan sebagai generator induksi jenis ini. Selain itu juga generator ini membutuhkan adanya jaringan listrik untuk dapat beroperasi, karena sumber daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator berasal dari jaringan. Sehingga apabila tidak ada jaringan listrik atau generator lain yang memberikan daya reaktif maka generator jenis ini tidak dapat beroperasi. Selain itu jika terjadi gangguan pada jaringan atau *blackout* jaringan generator ini juga tidak dapat beroperasi.

2.2.2.2 *Generator Induksi Berpenguat Sendiri*

Pada generator induksi berpenguat sendiri, eksitasi diperoleh dari kapasitor yang dipasang paralel pada terminal keluaran generator. Generator induksi jenis ini bekerja seperti mesin induksi pada daerah saturasinya hanya saja terdapat bank kapasitor yang dipasang pada terminal statornya. Karena sumber eksitasi generator ini berasal dari kapasitor yang dipasang pada terminalnya maka mesin induksi dengan rotor kumparan maupun sangkar bajing dapat digunakan sebagai

generator induksi berpenguat sendiri. Berikut adalah gambar skema model generator induksi berpenguat sendiri.



Gambar 2.2 Skema Generator Induksi Berpenguat Sendiri

Generator induksi jenis ini memiliki beberapa keuntungan yaitu tidak membutuhkan pengaturan tegangan pada rotornya, tidak memerlukan inverter, desain peralatan yang tidak rumit, harga pembuatan lebih murah, perawatan yang diperlukan murah dan tidak sulit, dan tidak memerlukan jaringan listrik untuk dapat beroperasi. Namun generator induksi berpenguat sendiri juga dapat beroperasi dalam suatu jaringan listrik dan tetap dapat beroperasi walaupun terdapat gangguan pada jaringan. Oleh karena itu generator induksi berpenguat sendiri lebih fleksibel dalam pengoperasiannya. Berdasarkan alasan tersebut generator induksi berpenguat sendiri merupakan pilihan yang tepat untuk memenuhi kebutuhan energi di tempat yang terisolir dimana daya reaktif dari jaringan listrik tidak atau belum ada. Sumber energi yang digunakan untuk mensuplai generator dapat berasal dari sumber energi yang tidak terlalu besar jumlahnya, seperti kincir angin ataupun kincir air di sungai (yang biasa dikenal dengan pembangkit listrik tenaga mikrohidro).

Skripsi ini membahas tentang metode pengaturan tegangan pada generator induksi berpenguat sendiri. Penulis memilih generator induksi berpenguat sendiri karena semakin luasnya aplikasi generator induksi berpenguat sendiri karena fleksibilitas yang dimilikinya. Selain itu penulis berpendapat generator induksi berpenguat sendiri perlu dikembangkan penggunaannya seiring dengan semakin tingginya kebutuhan listrik di Indonesia serta melihat keuntungan yang dimiliki oleh generator induksi berpenguat sendiri.

Dengan melihat kondisi di Indonesia dimana terdapat beberapa daerah yang belum terjangkau jaringan listrik, generator induksi berpenguat sendiri merupakan salah satu solusi yang tepat. Hal ini karena generator induksi berpenguat sendiri dapat beroperasi sendiri tanpa adanya jaringan listrik, maka generator ini merupakan pilihan tepat untuk pengembangan jaringan listrik di Indonesia. Dengan melihat besarnya sumber energi angin yang dimiliki Indonesia masih belum tereksplorasi secara maksimal kesempatan menggunakan generator induksi berpenguat sendiri sebagai pembangkit listrik tenaga bayu masih cukup besar. Karena Indonesia adalah negara kepulauan maka sudah tentu terdapat banyak sungai. Bahkan di daerah pedalaman sekalipun biasanya terdapat sungai. Sungai-sungai ini dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik tenaga mikrohidro untuk memenuhi kebutuhan desa-desa disekitarnya yang belum terjangkau jaringan listrik. Dengan melihat kenyataan ini maka dapat diketahui bahwa kesempatan penggunaan generator induksi berpenguat sendiri cukup besar. Oleh karena itu dibutuhkan pengembangan teknologi pendukungnya agar kualitas energi yang dihasilkannya menjadi lebih baik.

2.3 GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, generator induksi berpenguat sendiri sama seperti mesin induksi yang bekerja pada daerah saturasi namun terdapat kapasitor yang dipasang pada terminal statornya. Oleh karena itu rangkaian ganti generator induksi berpenguat sendiri tidak berbeda dengan rangkaian ganti mesin induksi. Prinsip kerja generator induksi berpenguat sendiri tidak terlalu berbeda dengan prinsip kerja motor induksi yang sudah umum dengan tambahan proses pada saat pembangkitan medan magnet.

2.3.1 Prinsip Kerja

Generator induksi berpenguat sendiri bekerja dengan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Untuk dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik, generator membutuhkan eksitasi. Eksitasi adalah arus yang digunakan untuk membangkitkan medan magnet yang nantinya akan menghasilkan GGL induksi. Sesuai dengan karakteristiknya, mesin induksi tidak

memiliki sumber AS yang terpisah. Oleh karena itu dibutuhkan sumber lain yang dapat menghasilkan eksitasi bagi generator.

Pada generator induksi berpenguat sendiri, seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, eksitasi berasal dari kapasitor yang dipasang pada terminalnya. Ketika kapasitor dengan besar kapasitansi yang tepat dipasang pada terminal mesin induksi yang diputar oleh tenaga dari luar, GGL akan terinduksi pada kumparan mesin akibat dari eksitasi yang dihasilkan oleh kapasitor. Namun generator induksi akan menghasilkan eksitasi sendiri dengan bantuan kapasitor hanya jika terdapat sisa medan magnet pada rotornya. Jika tidak ada sisa medan magnet pada rotornya, generator induksi tidak dapat membangkitkan GGL.

Generator induksi yang digunakan pada penelitian ini adalah generator induksi yang terpisah dengan jaringan listrik. Oleh karena itu, generator tidak dapat langsung dioperasikan untuk menghasilkan listrik. Agar generator induksi dapat beroperasi untuk menghasilkan listrik, maka diperlukan medan magnet pada bagian rotor. Untuk menghasilkan medan magnet pada rotor, mesin induksi harus dioperasikan dulu sebagai motor induksi. Ketika dioperasikan sebagai motor, mesin induksi akan menginduksikan GGL pada rotor. GGL ini kemudian akan menghasilkan arus pada rotor, yang kemudian arus rotor ini akan menghasilkan medan magnet pada rotor. Prinsip kerja motor induksi yang lebih detail tidak dibahas pada skripsi ini. Setelah putaran motor cukup tinggi, prime mover dinyalakan.

Setelah prime mover dinyalakan, suplai daya motor induksi dimatikan, dan pada saat itu juga, terminal mesin induksi langsung dihubungkan dengan beban. Yang harus diperhatikan disini bahwa arah putaran prime mover harus sama dengan arah putaran motor induksi. Jika arah putaran tidak sama, maka akan terjadi perubahan arah torsi yang akibatnya dapat merusak mesin induksi dan juga prime mover. Ketika nilai kapasitansi yang dimiliki kapasitor yang terpasang pada terminal mesin induksi cukup untuk mensuplai kebutuhan daya reaktif yang dibutuhkan oleh mesin induksi, mesin induksi dapat beroperasi sebagai generator ketika terminalnya dihubungkan dengan beban. Ketika generator induksi beroperasi, beban tidak boleh dilepas dari terminal generator. Karena ketika beban dilepas, maka arus beban akan terputus. Putusnya arus ini membuat medan

magnet yang ada pada stator menghilang sehingga tidak ada lagi medan magnet yang menginduksi rotor. Akibatnya tidak terjadi GGL induksi pada rotor yang membuat rotor kehilangan arus eksitasi untuk menghasilkan medan magnet. Sehingga pada akhirnya generator tidak dapat beroperasi dan menghasilkan listrik.

2.3.2 Proses Pembangkitan Tegangan

Fenomena penguatan sendiri (*self-excitation*) pada generator induksi tetap menjadi salah satu subjek yang masih diperhatikan meskipun sudah diketahui lebih dari setengah abad [2]. Hal ini disebabkan karena aplikasi dari generator induksi berpenguat sendiri yang banyak digunakan pada sistem yang terisolir.

Ketika mesin induksi diputar pada kecepatan diatas kecepatan sinkronnya (slip bernilai negatif) melalui suatu penggerak utama, torsi induksi yang terjadi menjadi berbalik arah, sehingga mesin induksi bekerja sebagai generator. Ketika mesin induksi bekerja pada slip negatif, mesin menghasilkan arus yang memiliki fasa tertinggal lebih dari 90° dari tegangannya. Hal ini berarti mesin induksi menghasilkan daya aktif, tetapi mesin membutuhkan daya reaktif untuk menghasilkan eksitasi oleh karena itu dibutuhkan suplai daya reaktif terhadap terminal generator induksi. Salah satunya adalah dengan menggunakan bank kapasitor seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya.

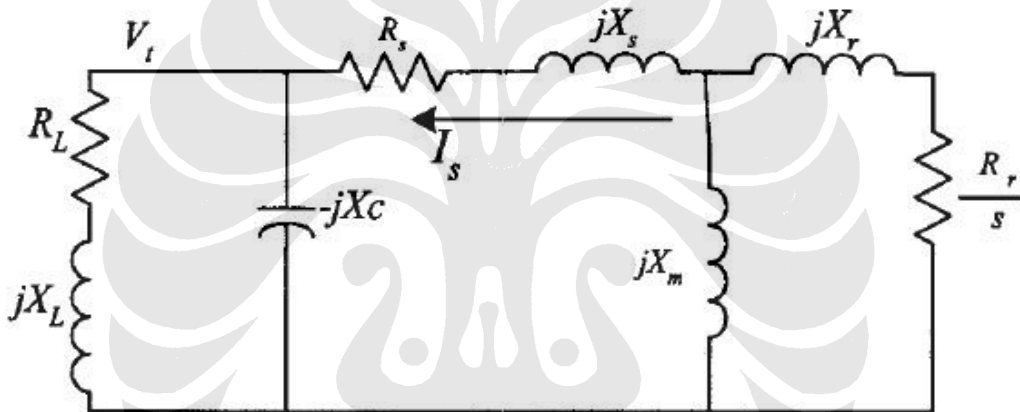
Untuk menghasilkan tegangan pada terminal generator, dibutuhkan medan magnet yang cukup pada rotor. Jika medan magnet yang terdapat pada rotor berada dibawah nilai yang dibutuhkan, tegangan tidak dapat dibangkitkan. Ketika generator induksi pertama kali bekerja, magnet yang tersisa pada rotor membangkitkan tegangan yang kecil. Tegangan ini membuat arus kapasitor mengalir. Mengalirnya arus ini membuat tegangan yang terjadi semakin besar, yang akan berlanjut hingga tegangan seluruhnya dibangkitkan.

Tegangan terminal generator pada kondisi beban nol adalah pertemuan antara kurva magnetisasi generator dengan garis beban kapasitor [2]. Kurva magnetisasi generator dapat diperoleh dengan menjalankan mesin induksi sebagai motor dan kemudian mengukur arus jangkar sebagai fungsi tegangan terminal pada kondisi beban nol. Agar dapat menghasilkan tegangan sesuai

dengan nilai yang diinginkan, kapasitor yang dipasang harus dapat menghasilkan arus magnetisasi sesuai nilai yang dibutuhkan tersebut.

2.3.3 Rangkaian Ganti

Rangkaian ganti mesin induksi tidak jauh berbeda dengan rangkaian ganti transformator. Karena pada dasarnya, prinsip induksi tegangan dan arus pada mesin induksi sama dengan prinsip induksi pada transformator sehingga rangkaian ganti mesin induksi serupa dengan rangkaian ganti transformator. Proses memperoleh rangkaian ganti dan rangkaian ganti transformator tidak dijelaskan dalam skripsi ini. Rangkaian ganti dari generator induksi berpenguat sendiri adalah sebagai berikut:



Gambar 2.3 Rangkaian Ganti Generator Induksi Berpenguat Sendiri

2.4 NILAI KAPASITANSI MINIMUM

Untuk dapat membangkitkan tegangan pada terminalnya, generator induksi berpenguat sendiri membutuhkan suplai daya reaktif yang cukup sehingga kebutuhan daya reaktif generator dapat terpenuhi. Pada saat beroperasi, generator induksi membutuhkan daya reaktif untuk eksitasi.

Daya reaktif yang dibutuhkan generator untuk eksitasi biasanya lebih besar daripada daya reaktif beban, sehingga total daya reaktif yang dihasilkan akan bersifat kapasitif. Untuk dapat memenuhi kebutuhan daya reaktif tersebut maka dapat dipasang kapasitor pada terminal generator. Kapasitor yang dipasang pada terminal generator ini harus memiliki nilai kapasitansi untuk dapat membangkitkan tegangan pada terminal generator. Jika nilai kapasitansi berada

pada nilai di bawah nilai kapasitansi yang dibutuhkan maka tegangan pada terminal generator tidak dapat dibangkitkan.

Untuk dapat menentukan nilai kapasitansi minimum yang dibutuhkan oleh generator dapat dilakukan dengan beberapa metode. Salah satu metode yang dianggap paling efektif adalah dengan menggunakan karakteristik motor induksi dalam menentukan nilai kapasitansi minimum. Karakteristik yang digunakan dalam metode ini adalah karakteristik magnetisasi dari motor induksi. Karakteristik ini diperoleh dengan menjalankan motor induksi dengan kondisi beban nol. Shekar [1], dalam jurnalnya mengatakan bahwa dalam kondisi beban nol, arus yang mengalir pada kapasitor I_c akan sama dengan arus magnetisasi I_m . Tegangan yang dihasilkan V akan meningkat secara linier hingga titik saturasi dari magnet inti tercapai. Sehingga dalam kondisi stabil,

$$I_m = I_c \quad (2.1)$$

$$\frac{V}{X_m} = \frac{V}{X_c} \quad (2.2)$$

$$X_c = X_m \quad (2.3)$$

Dalam percobaan beban nol motor induksi, kita dapat menghitung besar reaktansi magnetis X_m dengan mencatatkan tegangan pada mesin dan kemudian mengukur arus magnetisasi sehingga

$$X_m = \frac{V_{fasa}}{I_m} \quad (2.4)$$

$$X_m = X_c = \frac{1}{2\pi fC} \quad (2.5)$$

Dari persamaan diatas kita dapat memperoleh besar kapasitansi minimum yang dibutuhkan oleh generator. Namun yang perlu diperhatikan disini adalah besar arus magnetisasi I_m merupakan arus beban nol atau arus ketika motor bekerja dalam kondisi beban nol. Oleh karena itu nilai arus ini masih dipengaruhi oleh besar tahanan stator dan reaktansi magnetis stator. Sehingga untuk memperoleh nilai magnetisasi yang sebenarnya harus dilakukan perhitungan lain untuk dapat memisahkan nilai reaktansi magnetis stator dan tahanan stator. Menurut Isnaeni [3] dalam jurnalnya menuliskan sebuah persamaan untuk menentukan nilai kapasitansi minimum yang dibutuhkan generator sebagai fungsi dari daya reaktif

yang ditarik oleh mesin ketika beroperasi sebagai motor ΔQ , tegangan antar fasa U ketika kapasitor terhubung delta, dan frekuensi jaringan f . Persamaan tersebut dinyatakan sebagai:

$$C_{\Delta \text{per fasa}} = \frac{\Delta Q}{3U^2 2\pi f} \quad (2.6)$$

Nilai ini berlaku untuk kapasitansi kapasitor yang terhubung delta. Untuk hubungan bintang nilai kapasitansi yang dibutuhkan per fasa adalah tiga kali dari nilai yang diperoleh dari persamaan di atas.

Nilai kapasitansi yang diperoleh dari perhitungan melalui metode di atas kemudian diterapkan pada bank kapasitor yang terpasang pada terminal generator.

Karena nilai pengaturan tegangan pada mesin induksi sangat buruk, maka pada kondisi perubahan beban, pengaturan tegangan harus dibantu dengan pengaturan daya reaktif. Dengan mengambil nilai tegangan keluaran generator sebagai masukan yang kemudian akan dibandingkan dengan suatu nilai referensi maka akan dapat dirancang pengendali yang akan mengendalikan besar daya reaktif yang disuplai ke sistem sehingga nilai pengaturan tegangan akan tetap terjaga baik.

2.5 METODE PENGATURAN TEGANGAN

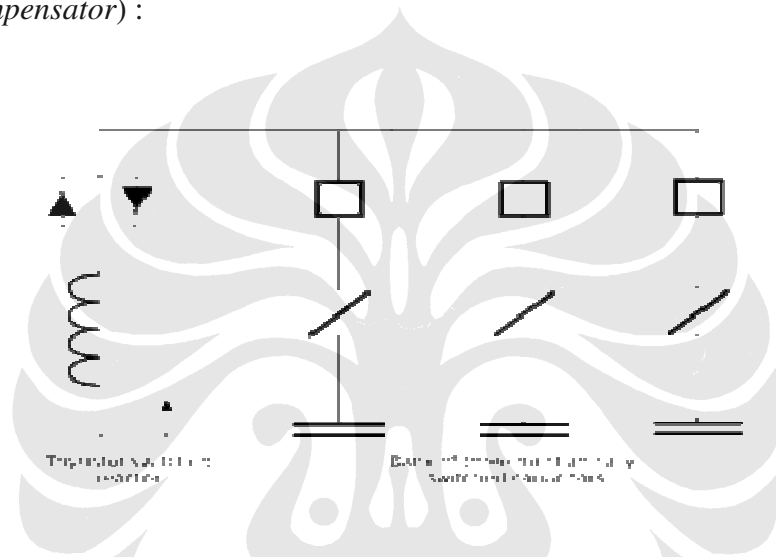
Ketika perputaran atau torsi generator berubah, tegangan terminal yang dihasilkan generator akan berubah. Untuk menjaga agar perubahan tegangan yang terjadi ketika perputaran atau torsi pada generator induksi berubah bernilai minimum, maka arus reaktif yang mengalir pada sistem harus diatur.

Beberapa metode pengaturan tegangan dapat diaplikasikan pada sistem generator induksi berpuang sendiri. Beberapa metode tersebut antara lain dengan menggunakan: bank kapasitor, Kompensator daya reaktif statis (*Static Var Compensator* atau SVC), pengaturan tap transformator dan kondensor sinkron.

Metode bank kapasitor menggunakan beberapa kapasitor dengan nilai kapasitansi yang dibutuhkan untuk dihubungkan dengan beban. Kapasitor pada sistem daya listrik menimbulkan daya reaktif untuk memperbaiki tegangan dan faktor daya, karenanya menambah kapasitor sistem akan mengurangi kerugian. Dalam kapasitor seri daya reaktif sebanding dengan kuadrat arus beban, sedang

pada kapasitor paralel sebanding dengan kuadrat tegangan. Pemasangan peralatan kapasitor seri dan paralel pada jaringan distribusi mengakibatkan rugi-rugi daya akibat aliran daya reaktif pada saluran dapat dikurangi sehingga kebutuhan arus menurun dan tegangan mengalami kenaikan sehingga kapasitas sistem bertambah.

Metode dengan kompensator daya reaktif statis (*Static Var Compensator*) terdiri dari kapasitor, reaktor dan thyristor yang bekerja sebagai saklar yang dapat diatur kapan thyristor nyala atau mati dengan mengatur sudut penyalanya. Berikut ini merupakan gambar rangkaian kompensator daya reaktif statis (*static var compensator*) :

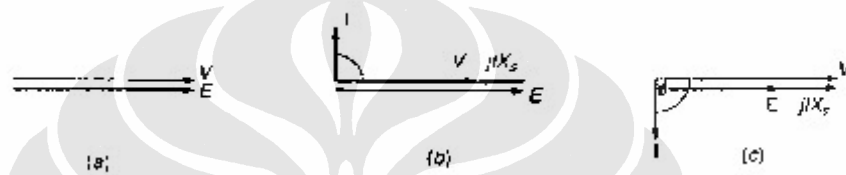


Gambar 2.4 Skema *Static Var Compensator*

Dengan mengatur sudut penyalan dari thyristor maka besar arus reaktor dapat diatur. Arus yang diterima oleh kompensator daya reaktif statis (*static var compensator*) merupakan penjumlahan dari arus kapasitor dan arus reaktor. Besarnya arus kapasitor tetap, yang dirubah adalah besarnya arus reaktor dengan mengatur alfa. Dengan demikian, dengan mengatur nilai reaktor yang tepat arus yang diterima oleh kompensator daya reaktif statis (*static var compensator*) dapat divariasikan dari kapasitif hingga induktif. Oleh karena itu kompensator daya reaktif statis (*static var compensator*) dapat diatur untuk memberikan atau mengambil daya reaktif pada sistem. Namun pada kompensator daya reaktif statis (*static var compensator*) menimbulkan masalah harmonisasi sehingga diperlukan tambahan rangkaian filter atau rangkaian tertentu untuk mengurangi masalah harmonisasi.

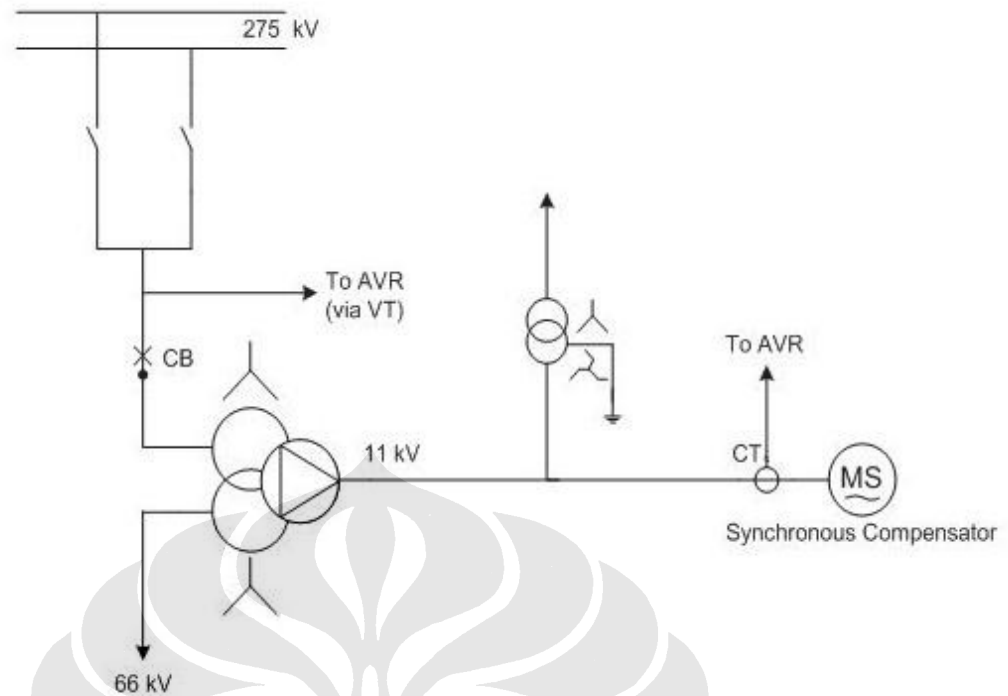
Metode berikutnya adalah dengan pengaturan tap transformator. Pengaturan tap transformator akan mengubah rasio dari transformator tersebut. Dengan mengubah rasio dari transformator maka tegangan pada sisi sekunder dapat divariasikan dan kita atur besarnya.

Metode pengaturan tegangan selanjutnya adalah dengan menggunakan kondensor sinkron. Kondensor sinkron merupakan motor sinkron yang dioperasikan tanpa beban. Motor sinkron tanpa beban dalam keadaan penguatan tertentu dapat menimbulkan daya reaktif. Perhatikan diagram vektor motor sinkron tanpa beban pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.5 Skema Diagram Fasor Motor Sinkron Tanpa Beban

Pada gambar (a), penguatan normal, sehingga $V = E$. Motor dalam keadaan mengambang karena tidak memberikan ataupun menarik arus. V berimpit dengan E karena dalam keadaan tanpa beban sudut daya $\delta = 0$. Pada gambar (b), penguatan berlebih, sehingga $E > V$. Arus kapasitif (leading current) ditarik dari jala-jala. Daya aktif $P = VI \cos \theta = 0$. Sehingga, motor berfungsi sebagai pembangkit daya reaktif yang bersifat kapasitif (kapasitor). Pada gambar (c), penguatan berkurang, sehingga $E < V$. Arus magnetisasi (lagging current) ditarik dari jala-jala. Sehingga motor berfungsi sebagai pembangkit daya reaktif yang bersifat induktif (induktor). Hal ini berarti pengaturan arus medan pada kondensor sinkron akan mengatur besarnya daya reaktif yang diberikan atau diambil dari sistem transmisi. Berikut ini salah satu contoh instalasi kondensor sinkron pada sistem transmisi :



Gambar 2.6 Skema Aplikasi Kondensator Sinkron pada Sistem

Dari keseluruhan metode pengaturan tegangan yang disebutkan di atas, dianggap metode yang paling efektif adalah metode pengaturan tegangan dengan menggunakan kondensator sinkron. Karena kondensator sinkron dapat memberikan daya reaktif yang dapat divariasikan besarnya tanpa menimbulkan harmonisasi yang tinggi dibandingkan dengan Kompensator daya reaktif statis (*static var compensator*)[8]. Metode inilah yang kemudian diaplikasikan pada simulasi kerja generator induksi berpenguat sendiri.

2.6 KONDENSATOR SINKRON

Kondensator sinkron merupakan motor sinkron yang dioperasikan tanpa beban. Kondensator sinkron memiliki prinsip kerja sama dengan motor sinkron dengan sudut daya $\delta = 0$ sehingga kondensator sinkron dapat diaplikasikan sebagai sumber daya reaktif dengan mengatur nilai arus eksitasinya. Kondensator sinkron merupakan salah satu solusi dalam pengaturan tegangan generator induksi berpenguat sendiri[9].

2.6.1 Prinsip Kerja

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, kondensor sinkron merupakan motor sinkron yang dioperasikan tanpa beban. Sehingga prinsip kerjanya sama dengan motor sinkron. Kondensor sinkron bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Untuk dapat mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, maka dibutuhkan medan magnet pada bagian stator dan rotornya. Pada kondensor sinkron, bagian stator dihubungkan dengan sumber ABB sedangkan bagian rotor dihubungkan dengan sumber AS. Sumber ABB yang dihubungkan pada bagian stator akan menghasilkan arus yang kemudian arus ini akan menghasilkan medan putar pada kumparan stator. Kemudian sumber AS pada bagian rotor akan menghasilkan arus yang kemudian menghasilkan medan magnet pada kumparan motor. Medan magnet pada rotor akan berinteraksi mengikuti medan putar pada stator. Hal ini menyebabkan rotor berputar mengikuti arah medan putar stator hingga mencapai kecepatan sinkronisasi. Ketika kondensor sinkron telah mencapai kecepatan sinkronisasi, maka kecepatan putar kondensor sinkron akan tetap besarnya walaupun sumber ABB dan sumber AS yang terhubung dengan kondensor tersebut diubah-ubah nilainya.

2.6.2 Pengaturan Tegangan dengan Kondensor Sinkron

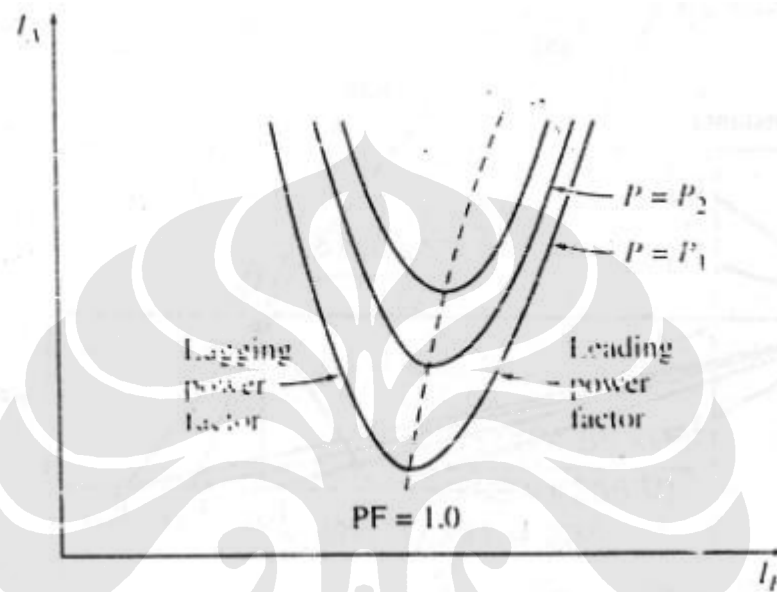
Seperti telah dijelaskan sebelumnya, kondensor sinkron merupakan motor sinkron yang dioperasikan tanpa beban. Maka kondensor sinkron beroperasi dengan sudut daya $\delta = 0$. Dimana sudut daya tersebut mempengaruhi besarnya torsi (T), daya aktif (P) dan daya reaktif (Q) yang dihasilkan oleh kondensor sinkron. Hal tersebut dapat dinyatakan pada persamaan berikut :

$$T_{em} = \frac{3.V_{\phi}.E_a.\sin \delta}{X_s} \quad (2.7)$$

$$P = T_{em} \cdot \omega \quad (2.8)$$

Dari kedua persamaan tersebut maka diperoleh nilai $P = T = 0$, karena besar $\sin \delta = 0$. Hal ini secara tidak langsung menyatakan bahwa kondensor hanya menyuplai daya reaktif. Sehingga kondensor sinkron dapat diaplikasikan sebagai

penghasil daya reaktif. Besarnya daya reaktif (Q) dapat diatur dengan mengatur besarnya arus penguatan atau arus eksitasi. Arus eksitasi dapat diatur dengan mengatur besar sumber AS yang dihubungkan pada bagian rotor. Dengan diaturnya besar arus eksitasi maka besarnya arus pada kumparan jangkar juga akan berubah. Di bawah ini merupakan gambar grafik yang menggambarkan hubungan arus eksitasi (If) dengan arus jangkar (Ia) :



Gambar 2.7 Hubungan arus eksitasi (If) dengan arus jangkar (Ia) pada beban tetap

Gambar di atas menunjukkan saat motor sinkron bekerja pada faktor daya tertinggal arus eksitasi (If) berbanding terbalik dengan arus jangkar (Ia), sedangkan saat motor sinkron bekerja pada faktor daya mendahului arus eksitasi (If) berbanding lurus dengan arus jangkar (Ia). Hal ini secara tidak langsung menunjukkan perubahan nilai daya reaktif (Q) akibat perubahan arus eksitasi (If). Pernyataan tersebut dapat ditunjukkan dalam persamaan berikut :

$$Q = \sqrt{3} \cdot V_{\phi} \cdot I_a \cdot \sin \vartheta \quad (2.9)$$

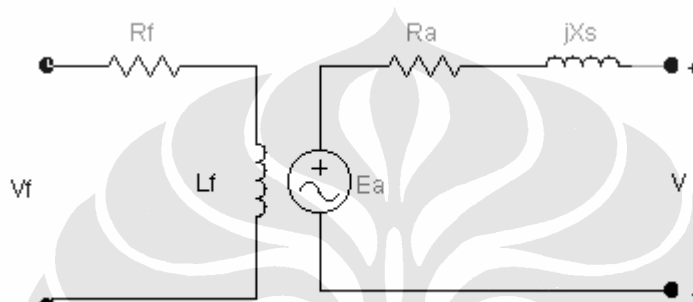
Besarnya daya reaktif (Q) yang dihasilkan dapat mempengaruhi besarnya tegangan pada jaringan. Hal ini dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V} \quad (2.10)$$

Persamaan di atas juga dapat menyatakan besarnya daya reaktif (Q) yang dibutuhkan untuk pengaturan tegangan sehingga diperoleh nilai tegangan yang diinginkan.

2.6.3 Rangkaian Ganti

Rangkaian ganti kondensor sinkron sama dengan motor sinkron. Proses memperoleh rangkaian ganti tersebut tidak dijelaskan dalam skripsi ini. Rangkaian ganti dari kondensor sinkron adalah sebagai berikut:



Gambar 2.8 Gambar rangkaian ganti kondensor sinkron

BAB III

PEMODELAN DAN SIMULASI PENGATURAN TEGANGAN GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI DENGAN KONDENSOR SINKRON

3.1 PEMODELAN GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI

3.1.1 Kerangka Acuan

Untuk mempermudah dalam menganalisa model mesin induksi, maka besaran-besaran yang terdapat dalam mesin induksi ditransformasikan ke dalam bentuk kerangka acuan. Kerangka acuan ini digunakan untuk mentransformasikan besaran dalam sistem abc (sistem fasa) menjadi besaran dalam sistem berputar $dq0$. Teori kerangka acuan menyatakan besaran-besaran pada sumbu-sumbu kuadratur (*quadrature*), langsung (*direct*), dan nol (*zero*) dengan mengasumsikan suatu nilai kecepatan putar dari kerangka acuan pada transformasinya. Jika sistem yang ditransformasikan merupakan sistem yang seimbang maka nilai komponen nol akan sama dengan nol.

Dalam skripsi Alfredo [4] transformasi variabel 3 fasa dari suatu rangkaian yang diam ditentukan menjadi kerangka acuan dengan persamaan:

$$f_{qd0s} = K_s f_{abcs} \quad (3.1)$$

Dimana:

$$f_{qd0s} = \begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \\ f_{0s} \end{bmatrix}; f_{abcs} = \begin{bmatrix} f_{as} \\ f_{bs} \\ f_{cs} \end{bmatrix}; K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0)$$

Dengan ξ adalah variabel pengintegralan.

Jika ditulis dalam bentuk persamaan maka bentuk matriks di atas menjadi:

$$f_q = \frac{2}{3} \left[f_a \cos \theta + f_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.2)$$

$$f_d = \frac{2}{3} \left[f_a \sin \theta + f_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \quad (3.3)$$

$$f_0 = \frac{1}{3} (f_a + f_b + f_c) \quad (3.4)$$

Untuk merepresentasikan variabel kerangka acuan sebagai variabel 3 fasa dapat digunakan invers dari persamaan di atas yaitu :

$$f_{abc} = K_s^{-1} f_{dq0s} \quad (3.5)$$

Dengan :

$$K_s^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}$$

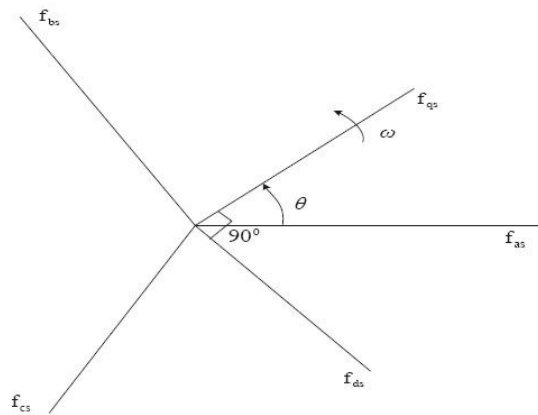
Dalam bentuk persamaan menjadi

$$f_a = f_q \cos \theta + f_d \sin \theta + f_0 \quad (3.6)$$

$$f_b = f_q \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_d \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + f_0 \quad (3.7)$$

$$f_c = f_q \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + f_d \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) + f_0 \quad (3.8)$$

Variabel f dalam persamaan tersebut dapat merepresentasikan tegangan, arus, fluks gandeng, ataupun muatan listrik. Notasi subskripsi s menunjukkan bahwa variabel, parameter, dan transformasi berhubungan dengan rangkaian stasioner. Transformasi tersebut dapat digunakan untuk mentransformasikan kumparan mesin induksi yang berubah terhadap waktu. Hubungan dari besaran-besaran diatas akan tampak seperti berikut:

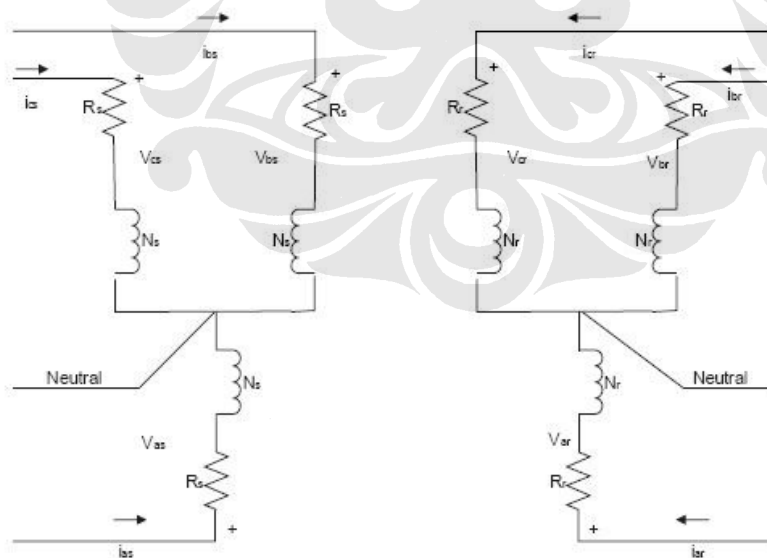


Gambar 3.1 Hubungan abc-dq0

Berdasarkan gambar di atas, persamaan transformasi kerangka acuan merupakan transformasi yang meletakkan variabel f_{qs} dan f_{ds} secara tegak lurus yang berputar dengan kecepatan sudut ω diatas f_{as} , f_{bs} , dan f_{cs} (besaran dalam fungsi waktu) yang diasumsikan sebagai variabel dalam suatu sumbu yang diam dengan beda fasa 120° .

3.1.2 Model Mesin Induksi

Model mesin induksi yang digunakan dalam penelitian ini dapat digambarkan seperti gambar berikut :



Gambar 3.2 Mesin Induksi 3 Fasa 2 Kutub Dengan Konfigurasi Bintang

Gambar di atas menggambarkan penampang stator dan rotor dari sebuah mesin induksi 2 kutub, 3 fasa, dengan konfigurasi Bintang. Kumputan stator merupakan kumputan yang terdistribusi sinusoidal identik dengan jumlah lilitan

sebanyak N_s dan memiliki tahanan r_s . Sedangkan kumparan rotor terdiri dari tiga kumparan yang terdistribusi sinusoidal identik dengan jumlah lilitan sebanyak N_r dan hambatan r_r . Ketiga fasa yang tergambar pada gambar diatas merupakan fasa a,b,c dengan urutan positif.

Pada mesin induksi terdapat dua jenis rotor yaitu rotor belitan dan rotor sangkar bajing. Dalam menganalisa mesin induksi, rotor sangkar bajing dapat dianalisa menggunakan perumpamaan sebagai rotor belitan. Persamaan yang dianalisa berikut merupakan persamaan untuk rotor belitan. Namun persamaan ini juga dapat digunakan untuk menganalisa rotor sangkar bajing.

Persamaan tegangan generator induksi dinyatakan dalam persamaan:

$$V_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (3.9)$$

$$V_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \quad (3.10)$$

Dengan notasi subskripsi s dan r mengindikasikan variabel stator dan rotor. λ melambangkan fluks gabungan dan p adalah notasi derivatif $\frac{d}{dt}$.

Persamaan di atas dapat dirubah dengan mengganti fluks hubung sebagai hasil kali antara arus dan induktansi kumparan. Kemudian merubah persamaan dalam referensi kerangka acuan dengan transformasi $abc-dq0$. Maka persamaan di atas menjadi:

$$V_{qd0s} = r_s i_{qd0s} + \omega \lambda_{dqs} + p \lambda_{qd0s} \quad (3.11)$$

$$V'_{qd0r} = r_r i'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dqr} + p \lambda'_{qd0r} \quad (3.12)$$

Dimana:

ω adalah kecepatan angular listrik dari kerangka acuan

ω_r adalah kecepatan angular dari rotor

$$\lambda_{dqs} = \begin{bmatrix} \lambda_{ds} \\ -\lambda_{qs} \\ 0 \end{bmatrix}; \lambda'_{dqr} = \begin{bmatrix} \lambda'_{dr} \\ -\lambda'_{qr} \\ 0 \end{bmatrix}$$

Dan notasi ' menandakan nilai besaran rotor yang mengacu pada besaran stator

Kemudian dengan memasukkan hubungan antara fluks hubung dengan arus yang mengalir, dimana arus telah ditransformasikan dalam referensi kerangka acuan, maka persamaan tegangan dapat ditulis sebagai:

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (3.13)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (3.14)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (3.15)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (3.16)$$

$$\text{Dengan: } \lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i'_{qr}$$

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i'_{dr}$$

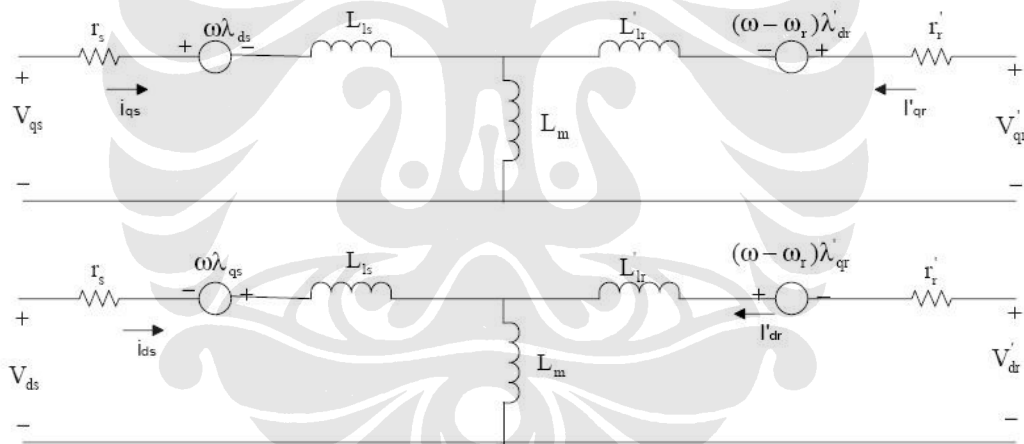
$$\lambda'_{qr} = L'_r i'_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\lambda'_{dr} = L'_r i'_{dr} + L_m i_{ds}$$

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

$$L_r = L_{lr} + L_m$$

Dengan menggunakan persamaan diatas, maka dapat digambarkan rangkaian ganti dari generator induksi dalam referensi kerangka acuan sebagai berikut:



Gambar 3.3 Model Mesin Induksi Dalam Referensi Kerangka Acuan

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, pembangkitan tegangan pada generator induksi membutuhkan eksitasi. Eksitasi pada generator induksi berpenguat sendiri diperoleh dari kapasitor yang dipasang pada terminalnya. Oleh karena itu, rangkaian ganti dari generator induksi berpenguat sendiri akan memiliki bentuk serupa dengan rangkaian ganti diatas, hanya saja terdapat kapasitor pada terminal statornya.

Rangkaian dan persamaan diatas merupakan pemodelan mesin induksi dilihat dari elektrisnya. Sedangkan untuk sisi mekanisnya dapat dilakukan

pemodelan dengan menggunakan besar daya yang terdapat pada kumparan stator dan rotor sebagai,

$$P = v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} + v'_{ar} i'_{ar} + v'_{br} i'_{br} + v'_{cr} i'_{cr} \quad (3.17)$$

Jika besaran daya tersebut ditransformasikan kedalam bentuk $dq0$ maka akan diperoleh persamaan,

$$P = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} + 2v_{0s} i_{0s} + v'_{qr} i'_{qr} + v'_{dr} i'_{dr} + v'_{0r} i'_{0r}) \quad (3.18)$$

Dengan mengasumsikan bahwa sistem seimbang baik pada stator maupun rotor, maka komponen 0 dapat dihilangkan.

Kemudian substitusi persamaan 3.13 hingga 3.16 sehingga pada persamaan 3.18 dapat diketahui bahwa persamaan daya mesin induksi dalam referensi kerangka acuan terdiri dari tiga komponen yaitu $i^2 r$, $ip\lambda$, dan ωli . Komponen $i^2 r$ melambangkan rugi tembaga. Komponen $ip\lambda$ melambangkan besar pertukaran energi medan magnet di antara kumparan. Sedangkan komponen ωli melambangkan besar energi yang dikonversi menjadi energi mekanik. Sehingga dapat disimpulkan bahwa besar torsi elektromagnetis yang berkerja pada mesin sebagai jumlah dari komponen ωli dibagi dengan kecepatan putar mekanis mesin. Secara matematis besar torsi elektromagnetis adalah,

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} \left[\omega (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\lambda'_{dr} i'_{qr} - \lambda'_{qr} i'_{dr}) \right] \quad (3.19)$$

Dengan melihat hubungan fluks gandeng pada persamaan 3.13 hingga 3.16 dapat diketahui bahwa

$$\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds} = -(\lambda'_{dr} i'_{qr} - \lambda'_{qr} i'_{dr}) = L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \quad (3.20)$$

Sehingga persamaan torsi elektromagnetis mesin induksi dapat dituliskan sebagai,

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \quad (3.21)$$

Pada operasi mesin induksi sebagai generator, torsi elektromagnetis yang terjadi bernilai negatif maka persamaan 3.21 menjadi,

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{qr} i_{ds} - i'_{dr} i_{qs}) \quad (3.22)$$

Sedangkan hubungan antara torsi dan kecepatan putar pada mesin induksi yang beroperasi sebagai generator diberikan oleh,

$$T_m = J \left(\frac{2}{P} \right) p \omega_r + T_{em} \quad (3.23)$$

$$p \omega_m = \frac{1}{2J} (T_m - T_{em} - F \omega_m) \quad (3.24)$$

Dengan :

J adalah konstanta inersia mesin

F adalah koefisien gesek mesin

P adalah jumlah kutub dari mesin

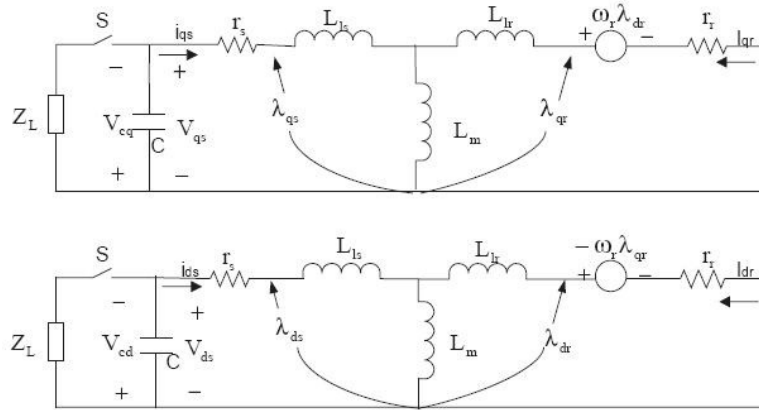
$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m; \omega_m = \frac{\omega_r}{P}$$

Persamaan 3.24 inilah yang kemudian akan digunakan dalam simulasi dengan menggunakan perangkat lunak SIMULINK pada MATLAB R2007a.

3.1.3 Model Generator Induksi Berpenguat Sendiri

Rangkaian ganti generator induksi berpenguat sendiri merupakan rangkaian ganti mesin induksi yang dihubungkan dengan kapasitor pada terminalnya. Untuk menganalisa rangkaian generator induksi berpenguat sendiri dapat digunakan transformasi $abc-dq0$. Dengan menggunakan transformasi ini, karakteristik generator induksi dapat digambarkan dengan memberikan nilai kecepatan putar kerangka acuan, ω , yang sesuai. Untuk kerangka acuan rotor $\omega = \omega_r$, untuk kerangka acuan sinkron $\omega = \omega_e$, kerangka acuan ini digunakan ketika tegangan rotor dan stator tidak seimbang. Sedangkan untuk kerangka acuan stasioner $\omega = 0$, kerangka acuan ini digunakan ketika tegangan stator dan rotor seimbang. Sehingga dengan menggunakan kerangka acuan stasioner transformasi $dq0-abc$ akan menjadi lebih mudah karena, $f_{as} = f_{qs}$, $f_{bs} = f_{as} \angle 120^\circ$, dan $f_{cs} = f_{as} \angle 240^\circ$.

Pada skripsi ini dianggap tegangan pada stator dan rotor seimbang. Sehingga nilai kecepatan putar sumbu kerangka acuan $\omega = 0$. Dengan memasukkan nilai $\omega = 0$ pada rangkaian ganti mesin induksi pada gambar 3.3 dan menambahkan kapasitor pada terminal stator akan diperoleh rangkaian ganti generator induksi berpenguat sendiri. Sehingga gambar rangkaian ganti generator induksi berpenguat sendiri yang telah ditransformasi ke referensi kerangka acuan sebagai berikut,



Gambar 3.4 Rangkaian Ganti Generator Induksi Berpenguat Sendiri Pada Referensi Kerangka Acuan

Dari gambar di atas, saat kondisi beban nol, dapat diperoleh persamaan tegangan sebagai matriks berikut,

$$\begin{bmatrix} r_s + pL_s + \frac{1}{pC} & 0 & pL_m & 0 \\ 0 & r_s + pL_s + \frac{1}{pC} & 0 & pL_m \\ pL_m & -\omega_r L_m & r_r + pL_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r L_m & pL_m & \omega_r L_r & r_r + L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{qr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{cqo} \\ V_{cdo} \\ K_q \\ K_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Dengan V_{cqo} dan V_{cdo} adalah tegangan awal kapasitor dan K_q dan K_d adalah konstanta yang merepresentasikan tegangan induksi awal pada rotor.

Dengan menggunakan persamaan 3.13 hingga 3.16, persamaan diatas dapat disederhanakan. Dalam kerangka acuan stasioner, persamaan 3.13 dapat dituliskan sebagai,

$$V_{qs} = -V_{cq} = r_s i_{qs} + 0 \times \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (3.26)$$

$$r_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + V_{cq} = 0 \quad (3.27)$$

Dengan mensubstitusikan nilai λ_{qs} ke persamaan 3.27 diperoleh,

$$r_s i_{qs} + V_{cq} + L_s p i_{qs} + L_m p i'_{qr} = 0 \quad (3.28)$$

Dari persamaan 3.15 diperoleh,

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} - \omega_r \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (3.29)$$

Dengan mensubstitusi nilai λ'_{dr} dan λ'_{qr} pada persamaan 3.29 diperoleh,

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} - \omega_r (L'_r i'_{dr} + L'_m i_{ds}) + p (L'_r i'_{qr} + L'_m i_{qs}) \quad (3.30)$$

$$r'_r i'_{qr} - \omega_r L'_r i'_{dr} - \omega_r L_m i_{ds} + L'_r p i'_{qr} + L_m p i_{qs} - V'_{qr} = 0 \quad (3.31)$$

Penyelesaian untuk $p i'_{qr}$ didapat,

$$p i'_{qr} = \frac{1}{L'_r} (V_{qr} - r'_r i'_{qr} + \omega_r L'_r i'_{dr} + \omega_r L_m i_{ds} - L_m p i_{qs}) \quad (3.32)$$

Substitusi persamaan 3.32 ke persamaan 3.28 sehingga,

$$r'_s i_{qs} + V_{cq} + L_s p i_{qs} + L_m \left(\frac{V_{qr} - r'_r i'_{qr} + \omega_r L'_r i'_{dr} + \omega_r L_m i_{ds} - L_m p i_{qs}}{L'_r} \right) = 0 \quad (3.33)$$

$$L'_r r'_s i_{qs} + L'_r V_{cq} + L'_r L_s p i_{qs} + L_m V_{qr} - L_m r'_r i'_{qr} + L_m \omega_r L'_r i'_{dr} + \omega_r L_m^2 i_{ds} - L_m^2 p i_{qs} = 0 \quad (3.34)$$

Dengan mengatur ulang persamaan 3.34 didapat,

$$(L_s L'_r - L_m^2) p i_{qs} = -L'_r r'_s i_{qs} + L_m r'_r i'_{qr} - \omega_r L_m^2 i_{ds} - L_m \omega_r L'_r i'_{dr} - L'_r V_{cq} - L_m V_{qr} \quad (3.35)$$

$$p i_{qs} = \frac{-L'_r r'_s i_{qs} + L_m r'_r i'_{qr} - \omega_r L_m^2 i_{ds} - L_m \omega_r L'_r i'_{dr} - L'_r V_{cq} - L_m V_{qr}}{L_s L'_r - L_m^2} \quad (3.36)$$

Dengan memasukkan nilai $V_{qr} = -K_q$ didapat,

$$p i_{qs} = \frac{-L'_r r'_s i_{qs} + L_m r'_r i'_{qr} - \omega_r L_m^2 i_{ds} - L_m \omega_r L'_r i'_{dr} - L'_r V_{cq} + L_m K_q}{L} \quad (3.37)$$

Dengan $L = L_s L'_r - L_m^2$.

Perhitungan yang sama dilakukan pada persamaan V_{ds} dan V'_{dr} dengan menggunakan persamaan 3.14 dan 3.16. Sehingga diperoleh persamaan,

$$p i_{ds} = \frac{L_m^2 \omega_r i_{qs} - L'_r r'_s i_{ds} + L_m \omega_r L'_r i'_{qr} + L_m r'_r i'_{dr} - L'_r V_{cd} + L_m K_d}{L} \quad (3.38)$$

Jika penurunan yang sama dilakukan pada persamaan 3.26 hingga 3.31, namun nilai yang disubstitusikan adalah penyelesaian dari $p i_{qs}$ maka akan diperoleh persamaan untuk $p i_{qr}$ sebagai,

$$p i_{qr} = \frac{L_m r'_s i_{qs} + L_s \omega_r L_m i_{ds} - L'_r r'_r i'_{qr} + L_s \omega_r L'_r i'_{dr} - L'_r K_q + L_m V_{cq}}{L} \quad (3.39)$$

Langkah yang sama dilakukan untuk menentukan nilai dari $p i_{dr}$ sehingga diperoleh persamaan,

$$p i_{dr} = \frac{-L_s \omega_r L_m i_{qs} + L_m r'_s i_{ds} - L_s \omega_r L'_r i'_{qr} - L'_r r'_r i'_{dr} - L'_r K_d + L_m V_{cd}}{L} \quad (3.40)$$

Persamaan 3.37 hingga 3.40 dapat disederhanakan menjadi sebuah bentuk matriks sebagai,

$$pI = AI + B \quad (3.41)$$

Dengan:

$$A = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} -L'_r r_s & -L_m^2 \omega_r & L_m r'_r & -L_m \omega_r L'_r \\ L_m^2 \omega_r & -L'_r r_s & L_m \omega_r L_r & L_m r'_r \\ L_m r_s & L_s \omega_r L_m & -L_s r'_r & L_s \omega_r L_r \\ -L_s \omega_r L_m & L_m r_s & -L_s \omega_r L'_r & -L_s r'_r \end{bmatrix}$$

$$B = \frac{1}{L} \begin{bmatrix} L_m K_q - L'_r V_{cq} \\ L_m K_d - L'_r V_{cd} \\ L_m V_{cq} - L_s K_q \\ L_m V_{cd} - L_s K_d \end{bmatrix}; I = \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \end{bmatrix}$$

$$V_{cq} = \frac{1}{C} \int i_{qs} dt + V_{cq}|_{t=0}; V_{cd} = \frac{1}{C} \int i_{ds} dt + V_{cd}|_{t=0}$$

$$L = L_s L'_r - L_m^2$$

Persamaan diatas inilah yang kemudian digunakan dalam simulasi sistem generator induksi berpenguat sendiri.

3.2 PARAMETER MESIN INDUKSI

Mesin induksi yang digunakan dalam simulasi skripsi ini adalah mesin induksi yang terdapat pada Laboratorium Konversi Energi Listrik Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia dengan merk Labvolt. Mesin induksi yang digunakan memiliki daya maksimum 2 kW. Untuk mendapatkan nilai parameter yang lain dari mesin induksi ini dilakukan dengan beberapa percobaan. Percobaan-percobaan yang dilakukan yaitu percobaan uji arus searah, percobaan beban nol dan percobaan hubung singkat. Dari ketiga percobaan tersebut diperoleh parameter mesin induksi seperti reaktansi dan tahanan mesin.

Pada percobaan pertama dilakukan percobaan uji arus searah. Percobaan ini dilakukan dengan memberikan catu AS pada kumparan stator dari mesin induksi kemudian diukur besarnya arus yang mengalir. Percobaan ini bertujuan untuk

mendapatkan nilai tahanan stator. Setelah dilakukan pengukuran diperoleh nilai tahanan stator sebesar 2Ω .

Percobaan selanjutnya adalah percobaan beban nol. Percobaan ini dilakukan dengan mengoperasikan mesin induksi sebagai motor. Kemudian mesin AS digunakan untuk mengkopel rotor mesin induksi dengan arah putaran searah dengan putaran mesin induksi. Hal ini dilakukan agar mesin induksi beroperasi dengan besar slip minimal dan besar torsi mekanik mendekati nol sehingga arus tidak dapat mengalir ke rotor dikarenakan tahanan rotor yang besar. Pada kondisi ini diukur daya beban nol, tegangan beban nol dan arus beban nol sehingga berdasarkan perhitungan didapat besar impedansi beban nol $86,6 \Omega$. Nilai tersebut bukanlah nilai reaktansi magnetis dari mesin induksi melainkan penjumlahan dari tahanan stator, reaktansi stator dan reaktansi magnetis. Sehingga nilai reaktansi magnetis akan diperoleh setelah dikurangi dengan besar tahanan stator dan reaktansi stator.

Percobaan yang terakhir yaitu percobaan hubung singkat. Percobaan ini bertujuan untuk memperoleh nilai impedansi hubung singkat dari mesin induksi yaitu nilai tahanan rotor, tahanan stator dan reaktansi stator. Percobaan ini sama halnya dengan percobaan mesin induksi beban nol namun motor AS yang mengkopel rotor mesin induksi memiliki arah putaran yang berlawanan dengan arah putaran mesin induksi. Hal ini dilakukan agar mesin induksi bekerja pada nilai slip maksimal sehingga rotor mesin induksi terkunci dan tidak dapat berputar. Pada kondisi tersebut diukur besar daya hubung singkat, tegangan hubung singkat, arus hubung singkat dan frekuensi hubung singkat. Dengan melakukan perhitungan berdasarkan data-data tersebut diperoleh besar tahanan total mesin induksi adalah $4,36 \Omega$. Nilai tersebut dikurangi dengan nilai tahanan stator sehingga diperoleh nilai tahanan rotor yaitu $2,36 \Omega$. Selain itu, dari hasil perhitungan juga diperoleh nilai reaktansi total mesin induksi adalah $7,2 \Omega$. Berdasarkan perbandingan reaktansi stator dan rotor pada buku Chapman[5] yaitu 50:50 diperoleh nilai reaktansi stator dan rotor mesin induksi masing-masing adalah $3,6 \Omega$. Dengan mengurangi nilai impedansi total beban nol dengan nilai tahanan dan reaktansi stator diperoleh nilai reaktansi magnetis sebesar 81Ω .

Untuk memperjelas, nilai parameter-parameter dari mesin induksi yang digunakan dalam simulasi disusun dalam tabel berikut :

Tabel 3.1 Parameter Mesin Induksi Yang Digunakan Dalam Penelitian

Daya Maksimum	2 kW
Tegangan	220 / 380 V
Arus Beban Penuh	8,3 / 4,8 A
Tahanan Stator	2 Ω
Tahanan Rotor	2,36 Ω
Reaktansi Magnetis	81 Ω
Reaktansi Stator	3,6 Ω
Reaktansi Rotor	3,6 Ω
Frekuensi	50 Hz
Cos Phi	0,8
Kecepatan Putar	1440 rpm

3.2.1 Nilai Kapasitansi Minimum

Seperti telah dijelaskan sebelumnya pada subbab 2.4, bahwa generator induksi berpenguat sendiri untuk dapat menghasilkan tegangan memerlukan sumber daya reaktif untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif generator itu sendiri. Oleh karena itu, dibutuhkan kapasitor dengan nilai kapasitansi yang cukup untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif dari generator agar generator induksi berpenguat sendiri dapat beroperasi. Nilai minimal kapasitansi yang dibutuhkan dapat kita peroleh dengan menggunakan persamaan 2.5. Berikut ini perhitungan nilai kapasitansi minimum yang dibutuhkan oleh generator induksi berpenguat sendiri yang digunakan dalam simulasi,

$$P_{maks} = 2000 \text{ Watt}$$

$$\text{Cos phi} = 0,8$$

$$\text{Sehingga } S = \frac{P_{maks}}{\cos phi} = \frac{2000}{0,8} = 2500 \text{ VA}$$

$$\text{Dengan fasa arus } \varphi = \arccos 0,8 = 37^\circ$$

$$\text{Sehingga } \sin \varphi = 0,6$$

$$\text{Diperoleh } Q = S \sin \varphi = 2500 \times 0,6 = 1500 \text{ VAR}$$

Dengan memasukkan ke persamaan 2.5 diperoleh

$$C_{\Delta \text{per fasa}} = \frac{1500}{3 \times 380^2 \times 2 \times \pi \times 50} = 11,02 \mu\text{F}$$

Namun nilai tersebut apabila dimasukkan ke dalam simulasi belum memenuhi kebutuhan daya reaktif dari generator induksi yang digunakan. Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan kembali untuk memperoleh nilai kapasitansi minimum dengan melihat besar reaktansi magnetis dari mesin induksi yaitu 81Ω . Nilai ini kemudian dimasukkan ke dalam persamaan 2.4. Berikut ini perhitungan nilai kapasitansi minimum berdasarkan nilai reaktansi magnetis dari mesin induksi,

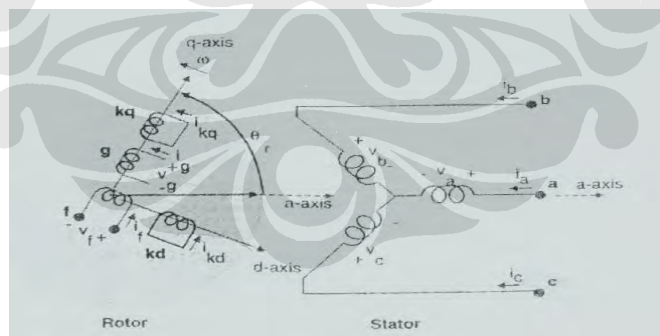
$$X_c = X_m = 81 \Omega$$

$$\text{Maka, } C_{\min} = \frac{1}{2 \times \pi \times 50 \times X_c} = 39,31 \mu F$$

Nilai inilah yang kemudian dimasukkan ke dalam sistem simulasi.

3.3 PEMODELAN KONDENSOR SINKRON [6]

Untuk memudahkan simulasi dari kondensor sinkron, maka perlu dibuat pemodelan dari kondensor sinkron dengan mentransformasikan sumbu abc menjadi sistem sumbu langsung (*direct*), kuadratur (*quadrature*), dan nol. Kondensor sinkron merupakan mesin sinkron yang dioperasikan tanpa beban. Sehingga untuk membuat pemodelannya sama halnya dengan pemodelan mesin sinkron.



Gambar 3.5 Rangkaian ganti mesin sinkron ideal

Dengan menggunakan konvensi motor, tegangan pada tujuh kumparan pada gambar 3.5 adalah seimbang dengan jatuh tegangan resistif. Sehingga persamaan tegangan pada kumparan stator dan rotor dapat disusun menjadi:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta_s \\ \Delta_r \end{bmatrix} \dots\dots\dots (3.42)$$

Dengan

$$V_s = [V_a, V_b, V_c]^T$$

$$V_r = [V_f, V_{kd}, V_g, V_{kq}]^T$$

$$I_s = [I_a, I_b, I_c]^T$$

$$I_r = [I_f, I_{kd}, I_g, I_{kq}]^T$$

$$R_s = \text{diag} [R_a, R_b, R_c]$$

$$R_r = \text{diag} [R_f, R_{kd}, R_g, R_{kq}]$$

$$\Lambda_s = [\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c]^T$$

$$\Lambda_r = [\lambda_f, \lambda_{kd}, \lambda_g, \lambda_{kq}]^T$$

Di mana simbol dari parameter tiap fasanya adalah sebagai berikut:

R_s	resistansi kumparan jangkar
R_f	resistansi kumparan medan sumbu langsung
R_g	resistansi kumparan medan sumbu kuadratur
R_{kd}	resistansi kumparan tambahan sumbu langsung
R_{kq}	resistansi kumparan tambahan sumbu kuadratur
L_{ls}	induktansi bocor kumparan jangkar
L_{lf}	induktansi bocor kumparan medan sumbu langsung
L_{lg}	induktansi bocor kumparan medan sumbu kuadratur
L_{lkd}	induktansi bocor kumparan tambahan sumbu langsung
L_{lkq}	induktansi bocor kumparan tambahan sumbu kuadratur
L_{md}	induktansi magnetis sumbu langsung stator
L_{mq}	induktansi magnetis sumbu kuadratur stator
L_{mf}	induktansi magnetis kumparan medan sumbu langsung
L_{mg}	induktansi magnetis kumparan medan sumbu kuadratur
L_{mkd}	induktansi magnetis kumparan tambahan sumbu langsung
L_{mkq}	induktansi magnetis kumparan tambahan sumbu kuadratur

Dengan demikian fluks bocor pada kumparan stator dan rotor dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\begin{aligned} \Delta_s &= L_{ss}I_s + L_{sr}I_r \\ \Delta_r &= [L_{sr}]^T I_s + L_{rr}I_r \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (3.43)$$

dengan

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lf} + L_{mf} & L_{fkd} & 0 & 0 \\ L_{fkd} & L_{lkd} + L_{mkd} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{lg} + L_{mg} & L_{gkq} \\ 0 & 0 & L_{gkq} & L_{lkq} + L_{mkq} \end{bmatrix}$$

$$L_{sr} = \begin{bmatrix} L_{sf} \sin \theta_r & L_{skd} \sin \theta_r & L_{sg} \cos \theta_r & L_{skq} \cos \theta_r \\ L_{sf} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{sg} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sf} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skd} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sg} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{skq} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

Persamaan L_{ss} dan L_{sr} di atas menunjukkan bahwa L_{ss} dan L_{sr} merupakan fungsi dari sudut rotor yang berubah tiap waktu sesuai dengan kecepatan perputaran rotor.

3.3.1 Fluks Bocor dalam Kumparan

Untuk fluks bocor pada stator dengan dq0 dengan menghilangkan komponen sudut perputaran rotor, didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \lambda_q &= \{L_{ls} + \frac{3}{2}(L_0 - L_{ms})\}I_q + L_{sg}I_g + L_{skq}I_{kq} \\ \lambda_d &= \{L_{ls} + \frac{3}{2}(L_0 + L_{ms})\}I_d + L_{sfd}I_f + L_{skd}I_{kd} \dots \dots \dots (3.44) \\ \lambda_0 &= L_{ls}I_0 \end{aligned}$$

Dengan mengacu pada sumbu dq rotor, variabel kumparan rotor tidak akan memerlukan transformasi rotasi. Maka fluks bocor dari kumparan rotor akan menjadi sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
\lambda_f &= \frac{3}{2} L_{sf} I_d + L_{ff} I_f + L_{fkd} I_{kd} \\
\lambda_{kd} &= \frac{3}{2} L_{skd} I_d + L_{fkd} I_f + L_{kdkd} I_{kd} \\
\lambda_g &= \frac{3}{2} L_{sg} I_q + L_{gg} I_g + L_{gkq} I_{kq} \\
\lambda_{kq} &= \frac{3}{2} L_{skq} I_q + L_{gkq} I_g + L_{kqkq} I_{kq}
\end{aligned} \dots\dots\dots (3.45)$$

3.3.2 Persamaan Tegangan pada Acuan dq0 Rotor

Dengan mereferensikan rotor pada stator dengan menggunakan perbandingan lilitan seperti halnya pada transformator, maka akan diperoleh nilai induktansi sinkron untuk sumbu langsung maupun sumbu kuadratur sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
L_d &= L_{md} + L_{ls} \\
L_q &= L_{mq} + L_{ls}
\end{aligned} \dots\dots\dots (3.46)$$

Dan dengan mereferensikan parameter-parameter rotor pada stator, maka akan didapatkan persamaan tegangan pada sumbu dq0 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
V_q &= R_s I_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \lambda_d \frac{d\theta_r}{dt} \\
V_d &= R_s I_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \lambda_q \frac{d\theta_r}{dt} \\
V_0 &= R_s I_0 + \frac{d\lambda_0}{dt}
\end{aligned} \dots\dots\dots (3.47)$$

dengan

$$\begin{aligned}
\lambda_q &= L_q I_q + L_{mq} I'_g + L_{mq} I'_{kq} \\
\lambda_d &= L_d I_d + L_{md} I'_f + L_{md} I'_{kd} \\
\lambda_0 &= L_{ls} I_0
\end{aligned}$$

3.3.3 Persamaan Arus dari Fluks Bocor

Pada sumbu langsung dan sumbu kuadratur pemodelan mesin sinkron akan diperoleh persamaan arus sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 I_q &= \frac{1}{L_{ls}} (\lambda_q - \lambda_{mq}) \\
 I_d &= \frac{1}{L_{ls}} (\lambda_d - \lambda_{md})
 \end{aligned}
 \tag{3.48}$$

Sedangkan arus pada kumparan-kumparan rotor akan diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

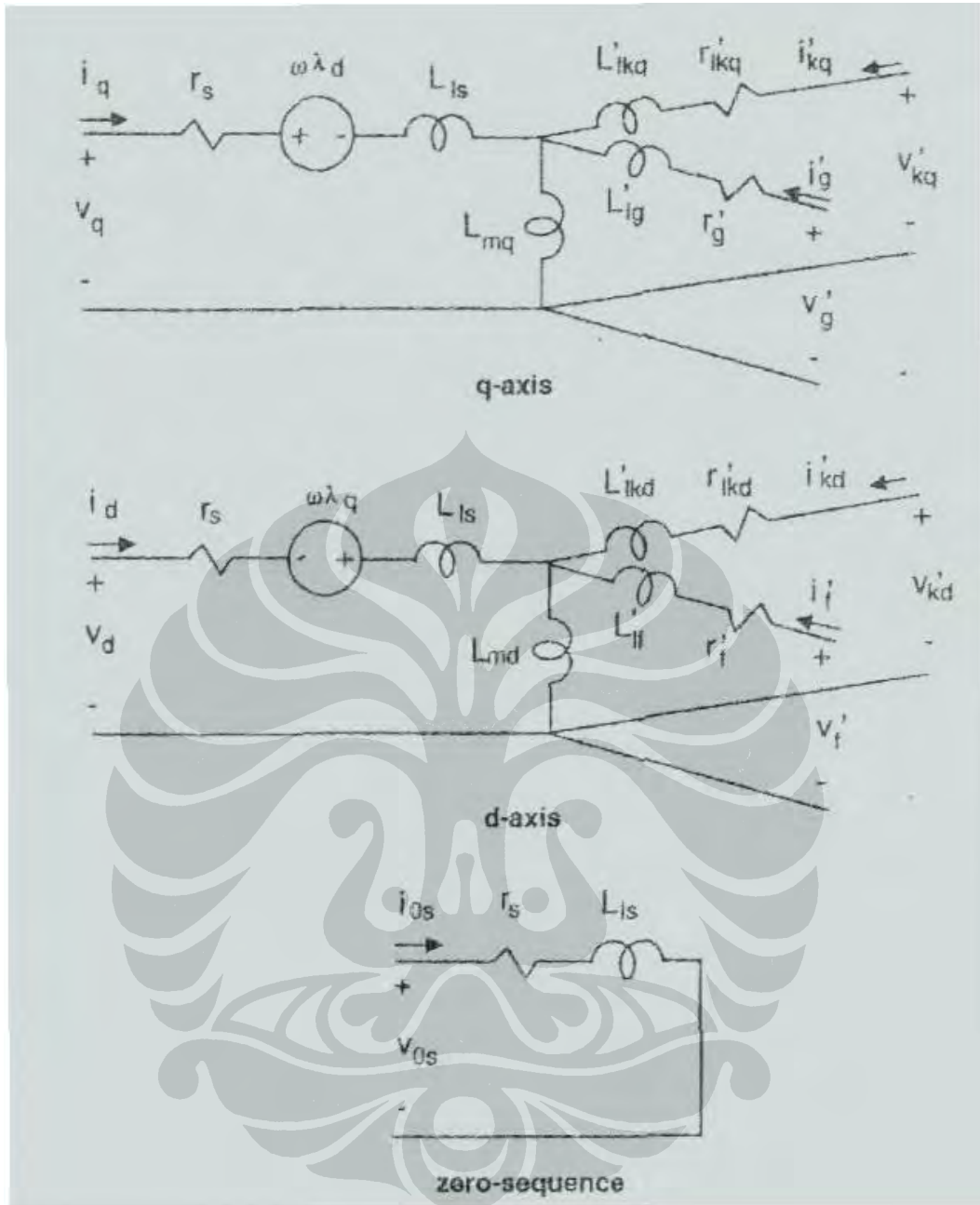
$$\begin{aligned}
 I'_g &= \frac{1}{L'_{lg}} (\lambda'_g - \lambda_{mq}) \\
 I'_f &= \frac{1}{L'_{lf}} (\lambda'_f - \lambda_{md}) \\
 I'_{kq} &= \frac{1}{L'_{lkq}} (\lambda'_{kq} - \lambda_{mq}) \\
 I'_{kd} &= \frac{1}{L'_{lkd}} (\lambda'_{kd} - \lambda_{md})
 \end{aligned}
 \tag{3.49}$$

Sehingga diperoleh nilai arus keseluruhan untuk pemodelan mesin sinkron sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I'_f \\ I'_{kd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 - \frac{L_{md}}{L_{ls}}\right) \frac{1}{L_{ls}} & -\frac{L_{md}}{L_{ls}L'_{lf}} & -\frac{L_{md}}{L_{ls}L'_{lkd}} \\ -\frac{L_{md}}{L_{ls}L'_{lf}} & \left(1 - \frac{L_{md}}{L'_{lf}}\right) \frac{1}{L'_{lf}} & -\frac{L_{md}}{L'_{lkd}L'_{lf}} \\ -\frac{L_{md}}{L_{ls}L'_{lf}} & -\frac{L_{md}}{L'_{lkd}L'_{lf}} & \left(1 - \frac{L_{md}}{L'_{lkd}}\right) \frac{1}{L'_{lkd}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda'_f \\ \lambda'_{kd} \end{bmatrix}
 \tag{3.50}$$

3.3.4 Rangkaian Ganti Pemodelan Mesin Sinkron

Dengan memperoleh nilai induktansi, tegangan, dan arus mesin sinkron pada sistem dq0, maka akan dapat ditentukan rangkaian ganti mesin sinkron pada sistem dq0.



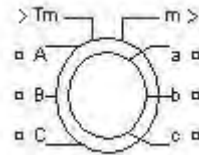
Gambar 3.6 Rangkaian ganti mesin sinkron pada sistem dq0

3.4 RANGKAIAN SISTEM SIMULASI

Pada skripsi ini simulasi hanya dilakukan pada perangkat lunak MATLAB R2007a dengan menggunakan SIMULINK yang terdapat dalam MATLAB. Percobaan dengan menggunakan mesin induksi merk Labvolt yang terdapat di laboratorium hanya dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter dari mesin induksi.

3.4.1 Simulasi Sistem Dengan MATLAB

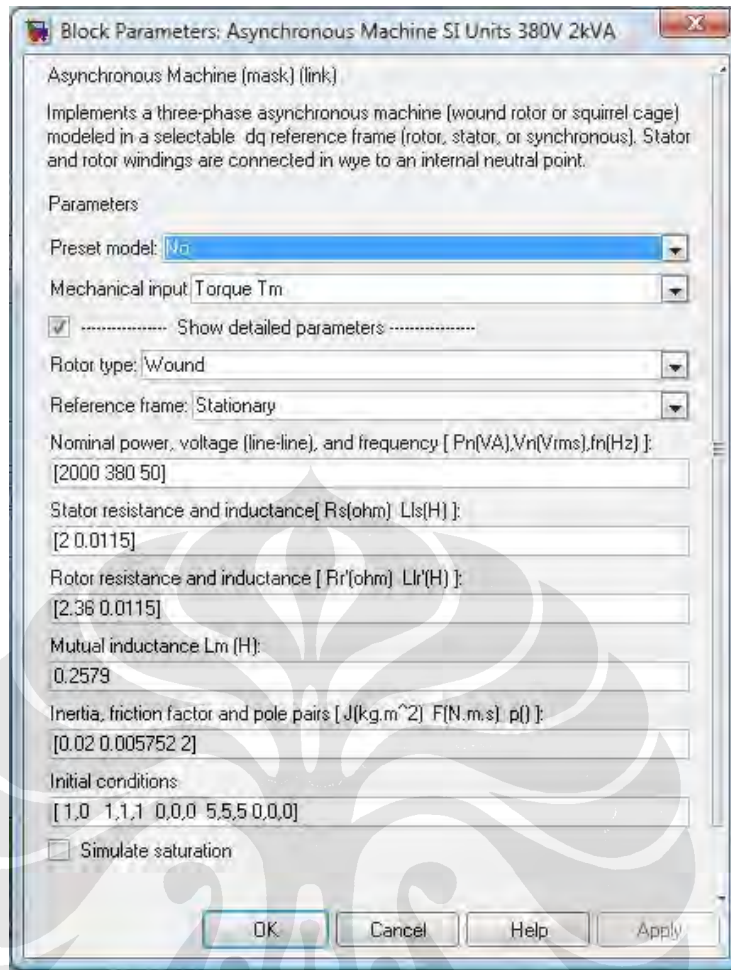
Model mesin induksi yang terdapat pada gambar 3.7 dibawah adalah model mesin induksi yang digunakan dalam simulasi dengan program MATLAB.



Gambar 3.7 Model mesin induksi yang digunakan pada MATLAB

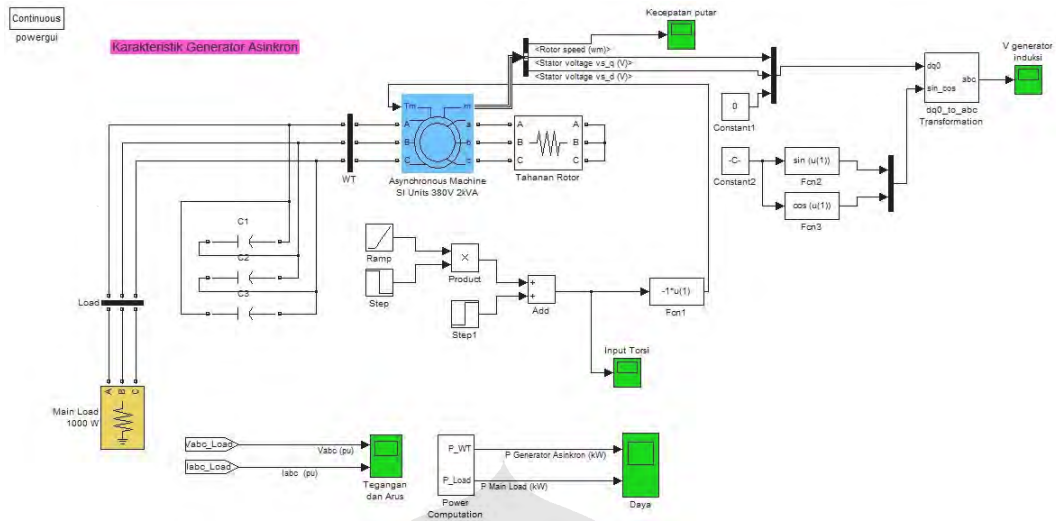
Model mesin induksi tersebut bekerja dengan menggunakan model persamaan 3.13 hingga 3.16 untuk model elektrisnya, dan menggunakan persamaan 3.22 dan 3.24 untuk model mekanisnya dengan memasukkan nilai torsi dengan nilai negatif agar mesin model bekerja sebagai generator. Dalam simulasi ini, persamaan yang digunakan dalam simulasi adalah persamaan 3.41 sehingga dapat langsung diperoleh model untuk generator induksi berpenguat sendiri.

Model mesin induksi dilengkapi dengan kotak dialog untuk memasukkan nilai parameter mesin induksi yang digunakan dalam simulasi. Kotak dialog tersebut tampak seperti pada gambar 3.8 berikut,



Gambar 3.8 Kotak Dialog Parameter Mesin Induksi Pada MATLAB

Nilai parameter yang dimasukkan pada kotak dialog merupakan nilai parameter mesin induksi yang telah disebutkan pada sub bab sebelumnya. Nilai induktansi (dalam Henry) diperoleh dengan menghitung besar rasio dari reaktansi induktif mesin dengan frekuensi tegangan nominal mesin. Nilai inersia dan faktor gesekan menggunakan nilai awal yang terdapat pada MATLAB. Hal ini dilakukan karena tidak dilakukan pengukuran terhadap nilai konstanta mekanis mesin. Kondisi awal yang digunakan pada simulasi ini merupakan nilai tebakan dari penulis. Nilai yang dimasukkan pada kondisi awal adalah slip awal = 1; tegangan stator = 1 V; dan tegangan rotor = 5 V dengan sudut tegangan awal masing-masing 0° . Berikut ini gambar simulasi sistem generator induksi berkuat sendiri,



Gambar 3.9 Simulasi generator induksi berpenguat sendiri

Simulasi dilakukan dengan menggunakan kerangka acuan stasioner sehingga pada simulasi ini nilai tegangan pada stator dan rotor dianggap seimbang untuk ketiga fasa.

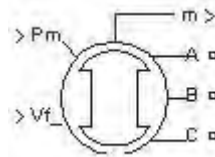
Mesin induksi pada simulasi ini bagian rotornya dihubungkan dengan tahanan sebesar 20Ω pada setiap fasanya. Hal ini dilakukan untuk mengurangi lonjakan arus saat mesin pertama kali dijalankan. Beban generator yang digunakan dalam simulasi ini menggunakan beban resistif murni sebesar 1000 Watt dengan konfigurasi bintang. Kapasitor eksitasi yang digunakan pada simulasi ini merupakan tiga buah kapasitor satu fasa dengan kapasitansi $39,31 \mu\text{F}$ dengan konfigurasi delta dan kemudian dihubungkan pada setiap fasa terminal generator induksi.

3.5 MODEL PENGENDALI TEGANGAN

Model pengendali tegangan yang digunakan pada simulasi ini adalah model peralatan yang digunakan untuk mengatur besar tegangan yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri sehingga tegangan yang diterima pada sisi beban tetap baik. Pada simulasi ini digunakan kondensor sinkron sebagai model pengendali tegangan. Model pengendali tegangan ini disimulasikan dengan menggunakan program SIMULINK yang terdapat pada MATLAB R2007a.

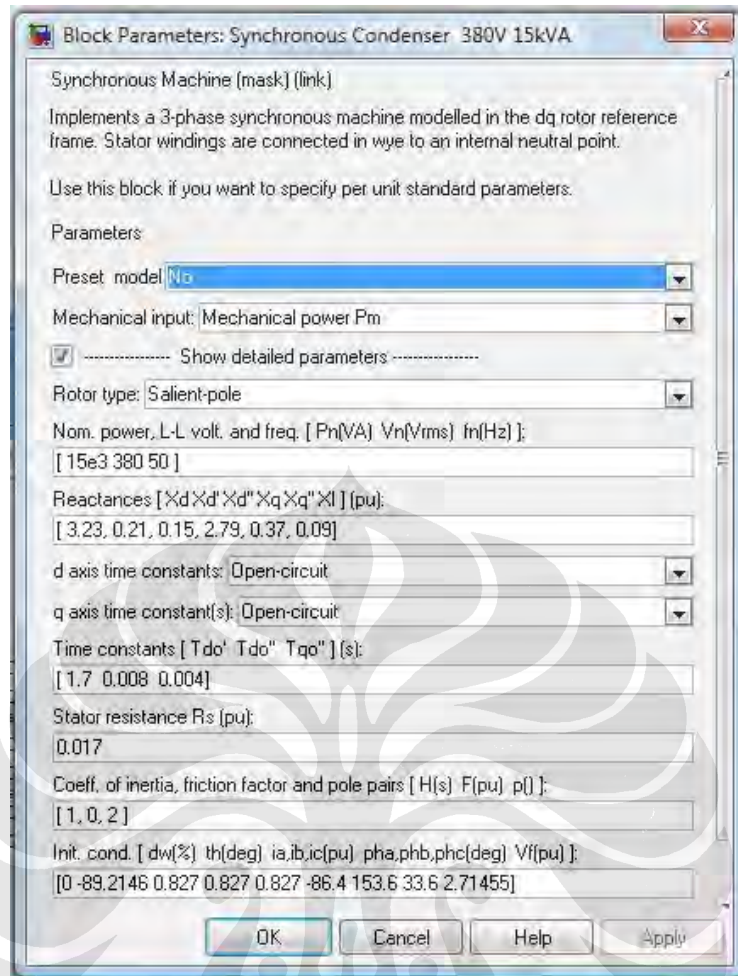
3.5.1 Kondensator Sinkron

Kondensator sinkron merupakan mesin sinkron yang dioperasikan tanpa beban. Maka model pengendali yang digunakan dalam simulasi ini adalah model mesin sinkron dengan masukan daya mekanis 0. Berikut ini gambar model mesin sinkron yang digunakan dalam simulasi,



Gambar 3.10 Model mesin sinkron pada MATLAB

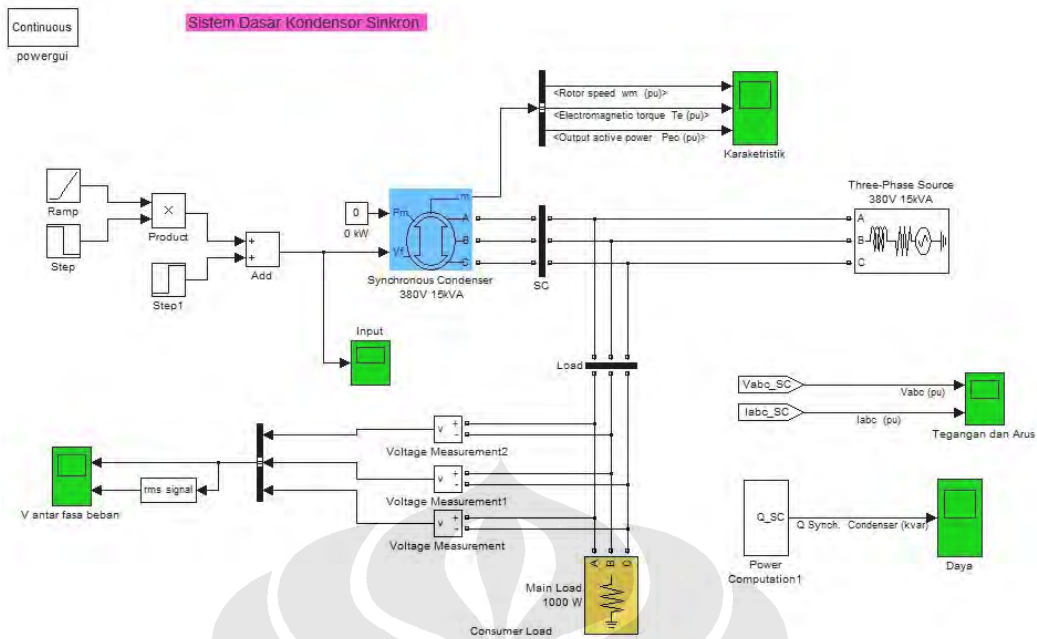
Model mesin sinkron ini menggunakan persamaan 3.42 hingga persamaan 3.50 untuk model elektrisnya. Model mesin sinkron yang digunakan dalam simulasi ini adalah model mesin sinkron dalam satuan pu (*per unit*) yang terdapat pada program SIMULINK dalam MATLAB R2007a. Hal ini dilakukan untuk mempermudah penulis dalam memberikan nilai masukan pada model mesin sinkron. Berikut ini gambar kotak dialog untuk memasukkan nilai parameter model mesin sinkron yang digunakan dalam simulasi,



Gambar 3.11 Kotak dialog mesin sinkron

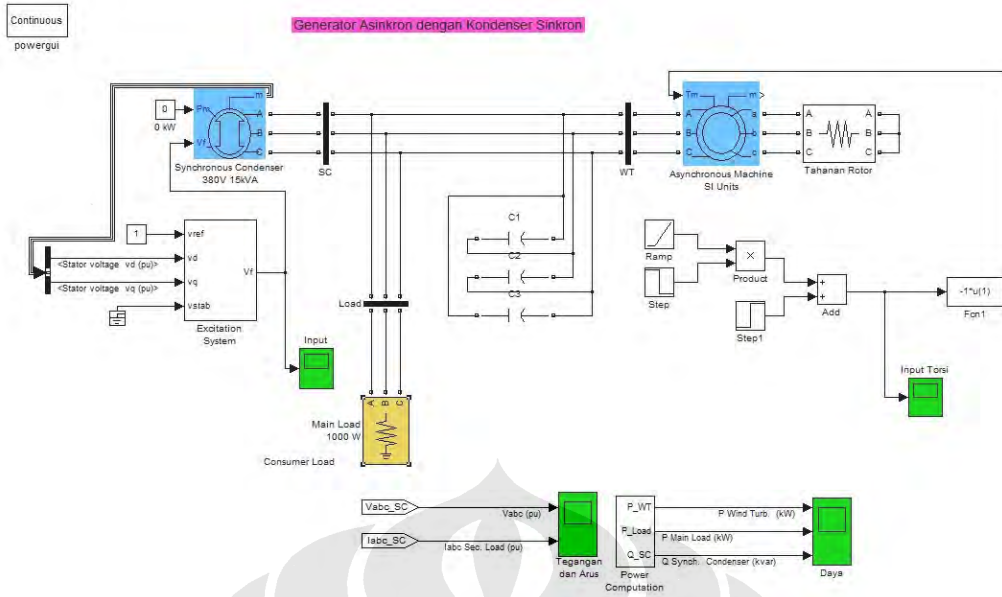
Nilai parameter yang dimasukkan merupakan nilai awal yang terdapat pada MATLAB. Mesin sinkron yang digunakan memiliki kemampuan menghasilkan daya 15 kVA dengan tegangan antar fasa 380 volt dan frekuensi listrik 50 Hertz. Parameter tegangan dan frekuensi pada model mesin sinkron disamakan dengan parameter tegangan dan frekuensi pada model mesin induksi agar kedua mesin tersebut dapat dihubungkan dalam satu sistem. Kondisi awal pada model mesin sinkron ini berdasarkan nilai awal pada MATLAB yaitu nilai arus sebesar 0,827 pu untuk tiap-tiap fasa dan tegangan medan pada rotor atau eksitasi sebesar 2.71455 pu. Nilai masukan daya mekanis yang diberikan pada model mesin sinkron bernilai 0 kW. Hal ini dilakukan karena mesin sinkron dioperasikan sebagai kondensor sinkron.

Berikut ini gambar rangkaian kondensor sinkron yang akan digunakan dalam simulasi untuk memperbaiki tegangan hasil keluaran generator induksi,



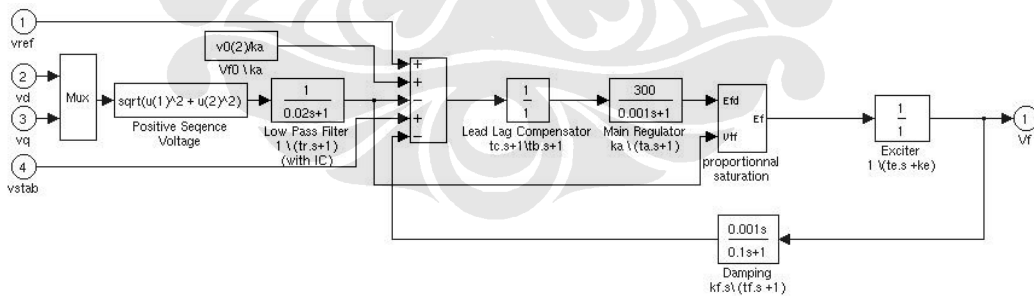
Gambar 3.12 Rangkaian simulasi kondensor sinkron sebagai pengendali tegangan

Dari gambar tersebut terlihat bahwa model mesin sinkron diberi masukan daya mekanis sebesar 0 W. Hal ini dilakukan karena mesin sinkron dioperasikan sebagai kondensor sinkron. Kondensor sinkron menghasilkan daya reaktif (Q) yang dapat diatur besarnya dengan mengatur besar tegangan medan pada rotor atau disebut juga eksitasi. Pada gambar di atas nilai masukan tegangan medan pada rotor pada model mesin sinkron merupakan nilai tebakan penulis yang divariasikan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui hubungan antara perubahan nilai tegangan medan pada rotor atau eksitasi dengan daya reaktif (Q) yang dihasilkan. Namun pada simulasi pengaturan tegangan generator induksi berpenguat sendiri dimana model mesin sinkron dan model generator induksi berpenguat sendiri digabungkan atau dihubungkan dalam satu sistem, masukan tegangan medan pada rotor pada mesin sinkron diatur besarnya berdasarkan tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator induksi dengan menggunakan sistem pengendali. Berikut ini gambar simulasi pengaturan tegangan generator induksi berpenguat sendiri dengan menggunakan kondensor sinkron,



Gambar 3.13 Simulasi pengaturan tegangan generator induksi berpenguat sendiri dengan menggunakan kondensor sinkron

Pengaturan besarnya nilai tegangan medan pada rotor atau eksitasi yang diberikan pada model mesin sinkron diatur dengan suatu pengendali. Sistem pengendali eksitasi tersebut menggunakan pengendali yang terdapat pada MATLAB. Berikut ini sistem pengendali yang digunakan untuk mengatur besarnya eksitasi yang diberikan pada mesin sinkron,



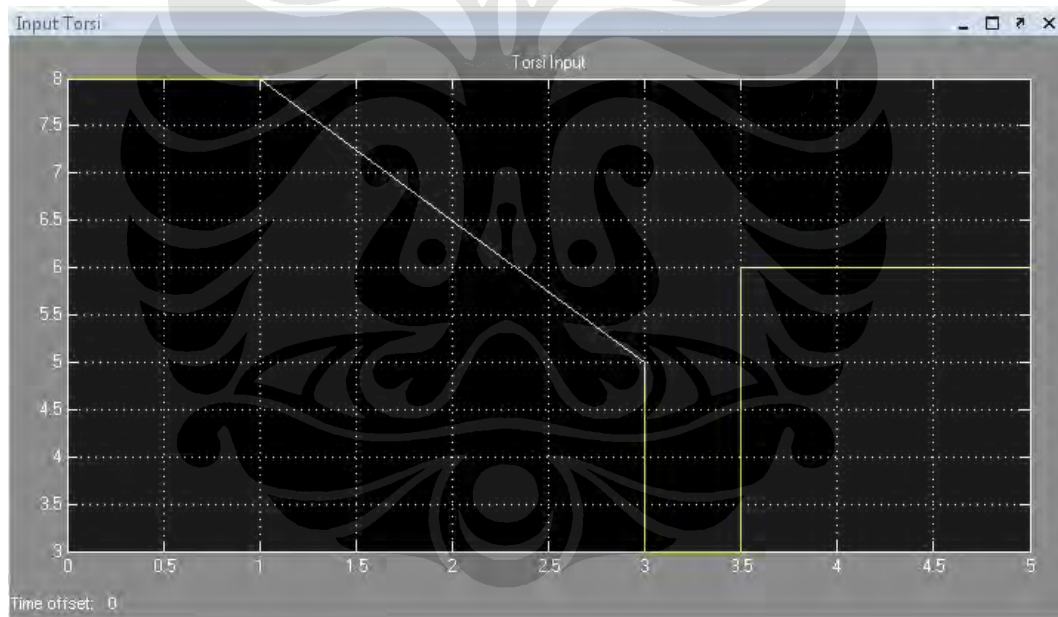
Gambar 3.14 Diagram blok fungsi pengendali eksitasi mesin sinkron

Dari gambar tersebut dapat kita lihat bahwa pengendali tersebut menghasilkan tegangan eksitasi sebagai keluaran dengan tegangan referensi dan tegangan stator sebagai masukan. Tegangan referensi diberi nilai 1 pu dan tegangan untuk menstabilkan (V_{stab}) dihubungkan ke tanah. Untuk tegangan keluaran stator dari mesin sinkron digunakan parameter V_d dan V_q stator.

3.6 SIMULASI SISTEM

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, simulasi pada skripsi ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak SIMULINK yang terdapat pada MATLAB R2007a.

Dengan menggunakan SIMULINK dilakukan beberapa simulasi. Simulasi pertama adalah simulasi dengan rangkaian dasar generator induksi berpenguat sendiri. Simulasi ini dilakukan selama 5 detik. Pada simulasi ini torsi masukan yang diberikan pada model mesin induksi dibuat berubah-ubah. Pada detik 0 hingga 1, nilai torsi yang diberikan 8 Nm. Mulai detik 1 hingga 3 nilai torsi diturunkan hingga mencapai 5 Nm, kemudian pada detik 3 nilai torsi langsung diturunkan menjadi 3 Nm dan nilai ini dipertahankan hingga detik 3,5. Kemudian pada detik 3,5 nilai torsi ditingkatkan kembali menjadi 6 Nm dan dipertahankan hingga detik ke 5.

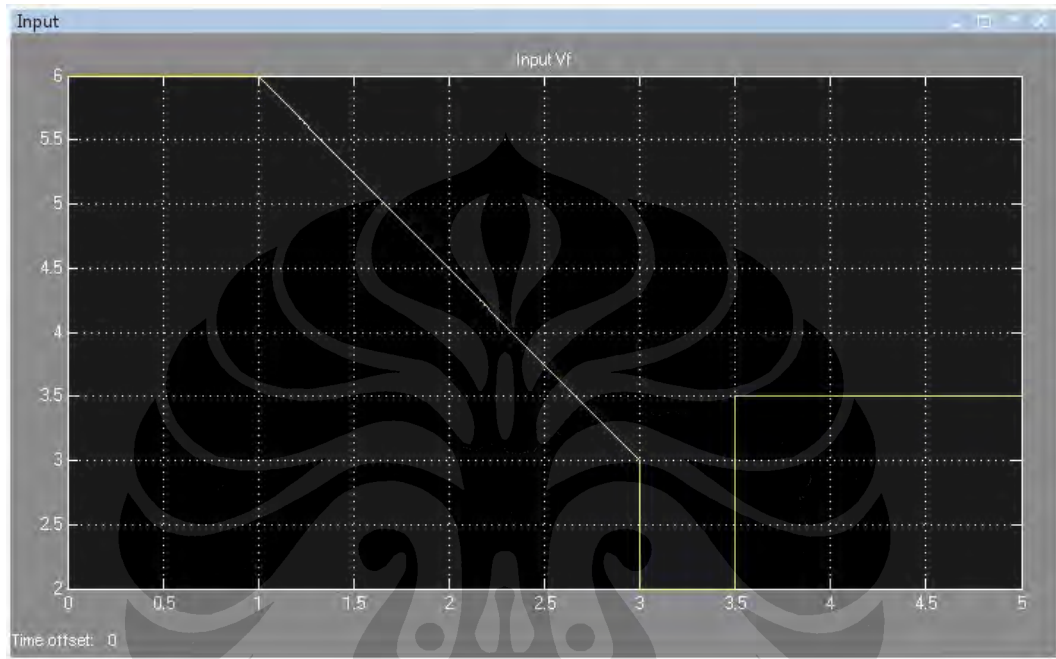


Gambar 3.15 Grafik Torsi Masukan Generator

Dari perubahan nilai torsi masukan ini kemudian akan dilihat perubahan pada keluaran generator seperti tegangan, arus, dan kecepatan putar. Diharapkan dari simulasi ini akan diperoleh karakteristik keluaran generator induksi berpenguat sendiri ketika torsi masukan berubah-ubah.

Simulasi kedua adalah simulasi dengan rangkaian dasar kondensor sinkron. Simulasi ini dilakukan dalam 5 detik. Pada simulasi ini nilai masukan daya mekanis yang diberikan adalah 0 W sedangkan nilai masukan tegangan medan

pada rotor atau eksitasi divariasikan. Pada detik 0 hingga 1 nilai tegangan medan atau eksitasi yang diberikan adalah 6 pu. Kemudian pada detik 1 hingga 3, nilai tegangan yang diberikan diturunkan hingga 3 pu. Pada detik 3 hingga nilai tegangan yang diberikan langsung diturunkan menjadi 2 pu dan nilai ini dipertahankan hingga detik 3,5. Kemudian pada detik 3,5 nilai tegangan ditingkatkan menjadi 3,5 pu dan dipertahankan hingga detik 5.



Gambar 3.16 Grafik Tegangan medan masukan mesin sinkron

Dari perubahan nilai masukan tegangan medan ini kemudian akan dilihat keluaran dari kondensor sinkron seperti tegangan, arus, kecepatan putar, torsi elektromagnetik, daya aktif dan daya reaktif yang dihasilkan. Diharapkan dari simulasi ini didapatkan karakteristik dari kondensor sinkron ketika masukan tegangan medannya diubah-ubah.

Simulasi ketiga merupakan simulasi pengaturan tegangan generator induksi berpenguat sendiri dengan menggunakan kondensor sinkron. Pada simulasi ini tegangan keluaran dari generator induksi berpenguat sendiri dihubungkan dengan bagian stator pada kondensor sinkron sebagai sumber 3 fasa. Pada simulasi ini yang diatur adalah nilai torsi masukan dari generator induksi dan nilai masukan tegangan medan pada kondensor sinkron. Nilai torsi masukan yang diberikan pada model generator induksi sama dengan simulasi pertama, sedangkan nilai masukan tegangan medan pada kondensor masukan diatur besarnya dengan menggunakan

pengendali. Pengendali tersebut membandingkan nilai tegangan referensi yang diinginkan dengan tegangan yang terukur pada stator kondensor sinkron sehingga diperoleh besar tegangan medan yang akan diberikan pada kondensor sinkron. Pada simulasi ini akan dilihat hasil keluaran berupa tegangan pada beban, arus pada beban, daya keluaran generator induksi, daya pada beban serta daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron.



BAB IV

ANALISIS HASIL SIMULASI PENGATURAN TEGANGAN GENERATOR INDUKSI BERPENGUAT SENDIRI DENGAN KONDENSOR SINKRON

Bab ini akan menjelaskan hasil simulasi sistem generator induksi berpenguat sendiri yang telah dilakukan. Hasil ini kemudian akan dianalisis sehingga dapat diketahui karakteristik pengaturan tegangan dengan menggunakan kondensor sinkron.

Simulasi pada skripsi ini dilakukan dengan menggunakan persamaan 3.41. Sebagai nilai awal diberikan nilai tegangan kapasitor sama dengan tegangan stator yaitu 1 Volt dan tegangan rotor sebesar 5 Volt dimana kedua nilai ini seimbang untuk setiap fasa. Nilai ini kemudian dirubah menjadi nilai $qd0$ dalam referensi kerangka acuan. Dari nilai tegangan ini kemudian akan diperoleh nilai arus stator dan rotor dalam referensi kerangka acuan. Nilai arus ini kemudian dimasukkan ke persamaan torsi 3.22. Dari persamaan ini kemudian diperoleh nilai torsi elektromagnetis yang dihasilkan generator. Nilai T_{em} ini kemudian dimasukkan ke persamaan 3.23. Dengan mengurangi nilai torsi masukan T_m dengan nilai T_{em} dapat diperoleh nilai kecepatan rotor ω_r . Nilai ω_r ini kemudian dimasukkan ke matriks A dalam persamaan 3.41. Dengan memasukkan nilai ω_r ini maka dapat dihitung nilai arus stator dan rotor yang baru. Nilai arus yang baru ini diperoleh dengan menyelesaikan persamaan 3.41 dengan memasukkan komponen I sebagai nilai awal arus stator dan rotor dan komponen K dan V sebagai tegangan awal pada rotor dan stator (kapasitor). Dengan nilai arus yang baru ini kemudian dihitung besar tegangan pada stator atau tegangan pada kapasitor terminal dan tegangan yang diinduksikan pada rotor. Menggunakan nilai arus yang baru ini proses diulang dengan menghitung nilai ω_r yang baru. Dengan nilai ω_r yang baru ini kemudian digunakan lagi untuk menghitung besar I yang baru. Proses ini dilakukan terus secara berulang-ulang selama simulasi dijalankan.

4.1 ANALISIS HASIL SIMULASI SISTEM TANPA PENGENDALI TEGANGAN

Simulasi pertama mensimulasikan sistem dasar generator induksi berpenguat sendiri tanpa dilengkapi dengan pengendali tegangan. Generator induksi pada simulasi ini dibebani dengan beban resistif sebesar 1000 Watt dengan konfigurasi bintang. Generator dilengkapi dengan kapasitor eksitasi sebesar 39,31 μF seimbang untuk ketiga fasa. Sehingga diharapkan pada simulasi ini diperoleh karakteristik keluaran generator induksi ketika torsi masukan yang diterima generator berubah-ubah. Pada simulasi ini nilai torsi yang dimasukkan adalah 8 Nm untuk detik 0 hingga detik ke 1. Kemudian dari detik ke 1 hingga detik ke 3, nilai torsi diturunkan secara linier hingga mencapai 5 Nm. Dari detik ke 3 nilai torsi diturunkan menjadi 3 Nm kemudian dipertahankan hingga detik ke 3,5. Kemudian pada detik ke 3,5 nilai torsi dinaikkan menjadi 6 Nm. Nilai torsi ini dipertahankan konstan hingga detik ke 5.

Nilai tegangan keluaran yang tercatat pada grafik memperlihatkan bahwa pada $t = 0$ hingga 0,55 detik tegangan keluaran yang terjadi bernilai 0. Kondisi ini menandakan bahwa pada saat tersebut generator sedang mengalami proses pembangkitan tegangan. Pada proses ini, nilai tegangan kapasitor akan meningkat secara bertahap hingga seluruh tegangan dapat dibangkitkan. Meningkatnya tegangan kapasitor ini akan meningkatkan besar tegangan yang diinduksikan pada rotor sehingga arus rotor juga meningkat karena nilai tahanan rotor tetap. Meningkatnya arus pada rotor akan meningkatkan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor. Meningkatnya besar medan magnet rotor akan membuat GGL yang terjadi pada stator semakin besar sehingga akan meningkatkan nilai arus stator generator atau arus yang mengalir ke kapasitor. Proses pembangkitan tegangan ini akan terus terjadi hingga seluruh tegangan dapat dibangkitkan.

Pada grafik, bangkitnya seluruh tegangan dapat terlihat pada saat grafik tegangan mencapai nilai puncaknya. Setelah tegangan mencapai nilai puncak, nilai ini kemudian turun dan berosilasi selama keadaan transiennya dan mencapai sebuah nilai tegangan, pada grafik sekitar 220 Volt, pada saat generator telah mencapai keadaan tunak.

Lamanya waktu transien dari generator induksi berpenguat sendiri tergantung dari besar kecilnya torsi masukan yang diberikan pada generator. Semakin besar torsi yang diberikan, proses pembangkitan tegangan akan semakin cepat sehingga generator juga akan lebih cepat mencapai keadaan tunak. Hal ini dapat terjadi karena ketika torsi masukan yang diberikan semakin besar maka kecepatan putar generator juga semakin besar. Semakin besar kecepatan putar maka nilai GGL yang dihasilkan pada terminal generator juga semakin besar sehingga arus yang terjadi pada terminal generator atau stator juga semakin besar. Semakin besar arus generator ini akan membuat torsi elektromagnetik generator semakin besar juga. Torsi elektromagnetik ini akan melawan arah torsi input generator sehingga akan menurunkan kecepatan putar generator. Torsi mekanik yang diberikan pada generator selanjutnya akan menyesuaikan besarnya dengan torsi elektromagnetik sehingga membuat grafik kecepatan berosilasi. Penyesuaian ini akan terjadi hingga generator mencapai keadaan tunak. Ketika telah mencapai keadaan tunak, nilai resultan antara torsi mekanik dan torsi elektromagnetik akan tetap. Hal ini terbukti dengan besar kecepatan putar generator yang sudah konstan. Dengan semakin besarnya torsi masukan yang diberikan, maka nilai torsi elektromagnetis yang terjadi ketika awal timbulnya arus akan semakin besar. Hal ini membuat penyesuaian besar resultan torsi akan semakin cepat sehingga keadaan tunak dapat tercapai dengan lebih cepat.

Bila nilai torsi masukan yang diberikan pada generator tetap, maka tegangan yang dihasilkan generator juga tetap besarnya. Dalam simulasi dilakukan percobaan dengan menurunkan besar torsi masukan generator. Penurunan torsi dilakukan pada detik ke 1 hingga detik ke 3 dengan penurunan total sebesar 3 Nm secara linier. Kemudian torsi langsung diturunkan menjadi 3 Nm pada detik ke 3. Ketika torsi masukan diturunkan besarnya, tegangan yang dihasilkan generator juga turun besarnya. Pada kondisi ini besar kecepatan putar generator tetap. Turunnya nilai tegangan ini dapat dijelaskan dengan menggunakan persamaan berikut,

$$P = \tau \cdot \omega_m \quad (4.1)$$

$$VI = \tau \cdot \omega_m \quad (4.2)$$

Sesuai dengan persamaan diatas, maka ketika nilai torsi masukan turun dan kecepatan putar tetap maka nilai daya yang dihasilkan generator akan turun. Daya merupakan hasil perkalian dari tegangan dan arus. Maka ketika nilai daya turun, nilai tegangan akan turun. Karena pada simulasi ini beban generator dibuat tetap maka penurunan tegangan akan mengakibatkan turunnya nilai arus sesuai yang dinyatakan oleh hukum Ohm berikut.

$$V = I \cdot R \tag{4.3}$$

Nilai kecepatan putar tetap meskipun torsi masukan yang diberikan turun besarnya. Hal ini disebabkan karena ketika torsi masukan berkurang, daya yang dihasilkan generator juga berkurang yang membuat arus di terminal generator turun besarnya. Semakin kecilnya arus di terminal ini membuat nilai torsi elektromagnetik yang dihasilkan generator juga turun. Sehingga pada akhirnya nilai selisih atau resultan torsi yang terjadi pada generator tetap. Resultan torsi yang tetap inilah yang membuat kecepatan putar generator tidak berubah. Pada setiap perubahan torsi terjadi osilasi pada grafik kecepatan, hal ini disebabkan terjadinya perubahan arus yang mengakibatkan terjadinya perubahan selisih torsi hingga generator kembali ke keadaan tunak dan selisih torsi menjadi konstan. Faktor yang mempengaruhi besar kecepatan putar generator salah satunya adalah perubahan arus seperti yang akan dijelaskan pada sub bab berikutnya. Berikut ini grafik kecepatan putar generator induksi pada simulasi,



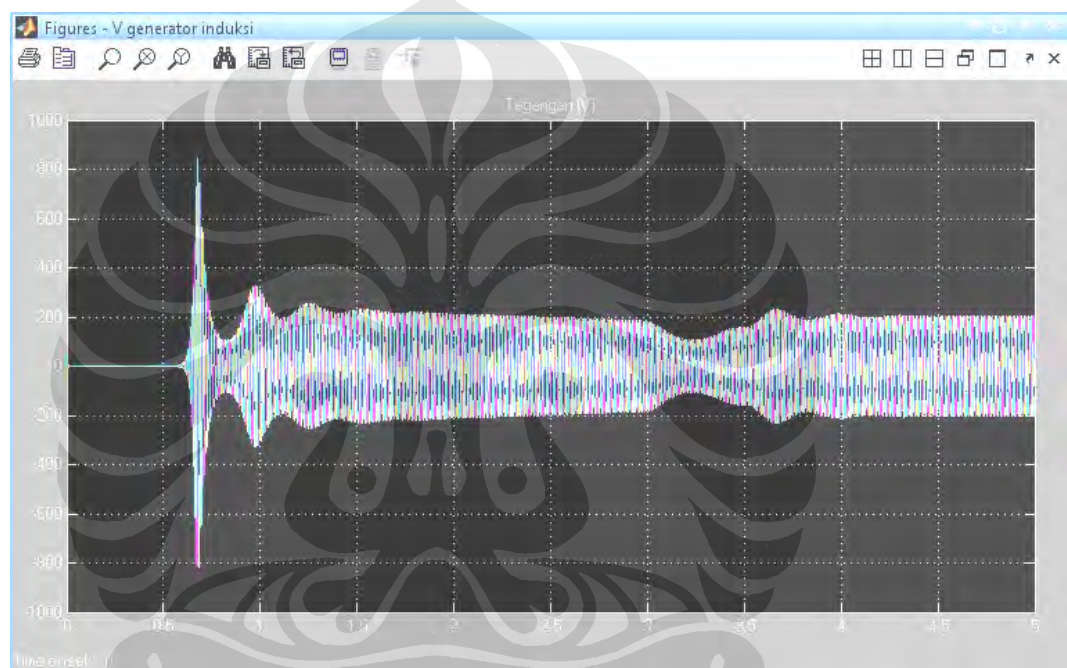
Gambar 4.1 Grafik kecepatan putar generator induksi berpenguat sendiri

Ketika torsi yang diberikan pada generator dibuat kembali konstan, tegangan yang dihasilkan generator tetap besarnya. Dari grafik hasil simulasi dapat dilihat bahwa penurunan torsi tidak membuat generator terganggu kinerjanya. Sebab ketika torsi kembali dibuat konstan, besar tegangan dan arus yang dihasilkan generator tetap sebanding dengan torsi yang diberikan. Tetap sebanding disini maksudnya adalah grafik tegangan dan arus yang dihasilkan generator serupa dengan grafik torsi yang diberikan. Sehingga dari kondisi ini dapat disimpulkan bahwa penurunan torsi tidak mengganggu kinerja generator induksi namun hanya mengurangi daya yang dihasilkan generator.

Ketika torsi masukan diturunkan secara mendadak, seperti pada simulasi saat $t = 3$ detik, tegangan yang dihasilkan generator berkurang. Namun pengurangan ini tidak langsung menghasilkan nilai tegangan yang konstan. Ketika torsi tiba-tiba dinaikkan, seperti pada saat $t = 3,5$ detik, tegangan yang dihasilkan generator meningkat. Namun peningkatan ini tidak langsung menghasilkan nilai tegangan yang konstan. Tegangan yang dihasilkan generator meningkat kemudian berosilasi sejenak hingga pada akhirnya mencapai keadaan tunak yang baru dan nilai tegangan menjadi konstan.

Perubahan nilai tegangan ini dapat terjadi karena ketika torsi dinaikkan maka daya yang dihasilkan generator akan meningkat. Peningkatan daya ini membuat arus terminal generator meningkat walaupun beban tetap besarnya. Karena meningkatnya arus ini membuat torsi elektromagnetik yang dihasilkan generator meningkat. Torsi elektromagnetik meningkat namun torsi mekanik yang diberikan pada generator tidak berubah sehingga nilai torsi yang melawan arah putaran generator membesar sehingga membuat kecepatan putar generator menurun. Turunnya kecepatan putar membuat arus yang dihasilkan generator menurun sehingga torsi elektromagnetik yang terjadi mengecil. Mengecilnya torsi elektromagnetik membuat kecepatan putar meningkat karena torsi masukan tetap. Naiknya kecepatan putar membuat arus yang dihasilkan generator meningkat dan membuat torsi elektromagnetik membesar. Kondisi ini berlangsung berulang-ulang hingga pada akhirnya tercapai kondisi seimbang dimana resultan antara torsi elektromagnetik dan torsi mekanik tetap. Ketika mencapai keseimbangan torsi, kecepatan putar generator menjadi tetap.

Dari simulasi ini dapat disimpulkan bahwa tegangan terminal generator induksi turun ketika torsi masukan yang diberikan ke generator turun. Tegangan kembali naik ketika torsi masukan generator naik. Perubahan torsi yang terjadi secara tiba-tiba membuat terjadi fluktuasi tegangan sebelum akhirnya generator mencapai keadaan tunak atau nilai tegangan yang baru. Perubahan nilai torsi masukan generator tidak merubah kecepatan putar generator. Hal yang dapat merubah kecepatan generator adalah perubahan besar arus yang ditarik dari generator.



Gambar 4.2 Tegangan keluaran generator induksi berpenguat sendiri



Gambar 4.3 Daya keluaran generator induksi berpenguat sendiri dalam kW

4.2 ANALISIS HASIL SIMULASI KONDENSOR SINKRON

Pada simulasi ini menggunakan kondensor sinkron sebagai penghasil daya reaktif pada sistem jaringan listrik. Simulasi ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik dari kondensor sinkron. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan persamaan 3.47 dan 3.50. Parameter dari mesin sinkron yang digunakan pada simulasi ini mengikuti parameter yang ada pada program SIMULINK yang menggunakan satuan per unit. Nilai awal pada mesin sinkron dirubah menjadi q_d0 dalam referensi kerangka acuan. Nilai tegangan ini dimasukkan ke dalam persamaan 3.42. Dari persamaan ini diperoleh nilai Δs dan Δr , sehingga fluks bocor pada kumparan stator dan rotor dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 3.43. Kemudian dengan persamaan 3.44 dapat diperoleh nilai induktansi untuk sumbu langsung maupun kuadratur. Dari hasil perhitungan persamaan 3.43 dan 3.44 dapat diperoleh nilai tegangan kerangka acuan $dq0$ dengan menggunakan persamaan 3.47 dan dapat diperoleh nilai arus kerangka acuan $dq0$ dengan menggunakan persamaan 3.50. Pada simulasi ini kondensor sinkron tidak diberi daya mekanis atau daya mekanisnya bernilai nol. Kondensor sinkron dihubungkan dengan sumber arus searah pada rotor dan dihubungkan dengan sumber arus bolak balik pada stator. Dari nilai tegangan tersebut akan diperoleh nilai tegangan kerangka acuan $dq0$ pada bagian stator yang akan diberikan kepada sistem jaringan listrik berdasarkan perhitungan di atas. Proses ini terus terjadi selama simulasi dijalankan.

Pada simulasi ini kondensor sinkron dioperasikan pada sistem jaringan listrik tanpa menggunakan generator induksi berpenguat sendiri. Kondensor sinkron dihubungkan dengan beban resistif sebesar 1000 watt yang berkonfigurasi bintang. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, daya mekanik yang diberikan pada mesin sinkron bernilai nol. Sedangkan besar sumber arus searah yang diberikan pada bagian rotor diatur oleh penulis tanpa menggunakan pengendali. Nilai sumber arus searah atau arus eksitasi yang diberikan pada mesin sinkron ini divariasikan besarnya. Pada detik ke 0 hingga detik ke 1, nilai eksitasi yang diberikan 6 pu. Kemudian dari detik ke 1 hingga detik ke 3 nilai eksitasi diturunkan menjadi 3 pu. Pada detik ke 3 nilai eksitasi langsung diturunkan

menjadi 2 pu dan dipertahankan hingga detik ke 3,5. Pada detik ke 3,5 nilai eksitasi langsung dinaikkan menjadi 3,5 pu dan dipertahankan hingga detik ke 5.

Berdasarkan penjelasan di bab sebelumnya, perubahan arus eksitasi tidak akan merubah daya yang dihasilkan serta tidak mempengaruhi kecepatan putaran mesin sinkron. Hal ini terlihat dari grafik hasil simulasi dimana kecepatan putar mesin sinkron berada pada 1 pu. Hal ini menunjukkan mesin sinkron beroperasi pada kecepatan sinkronnya.

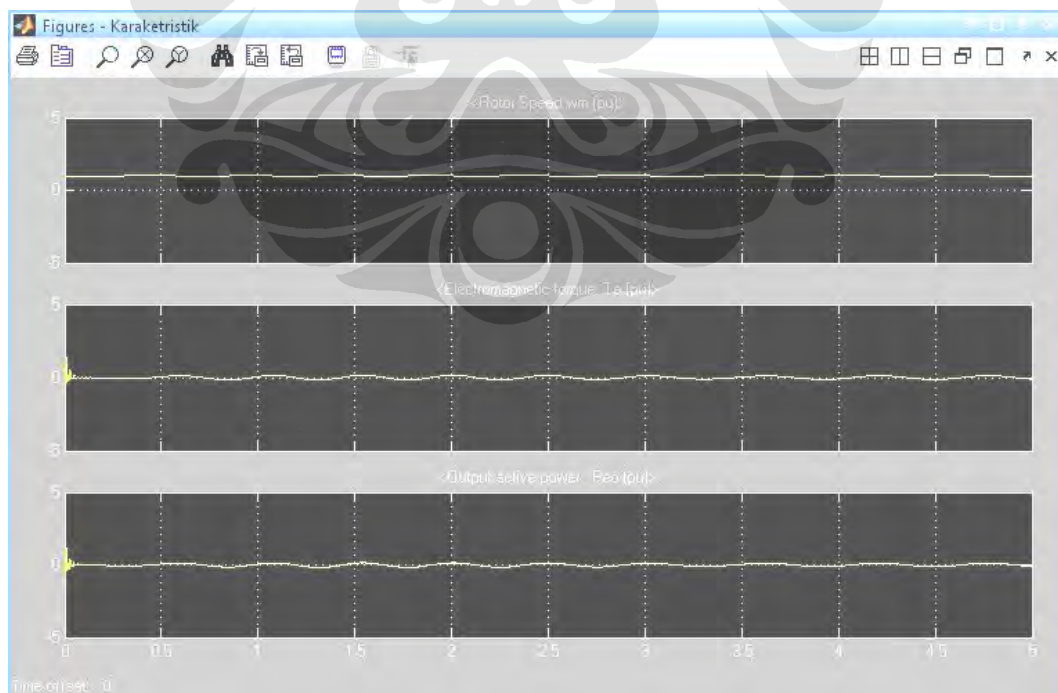
Sedangkan daya yang dihasilkan oleh mesin sinkron bernilai nol. Hal ini karena mesin sinkron tidak diberi daya mekanik sehingga besar sudut beban $\delta = 0$. Hal ini mengakibatkan besarnya torsi elektromagnetik bernilai nol sehingga daya yang dihasilkan juga bernilai nol. Hal tersebut diperoleh dari persamaan berikut,

$$\tau = \frac{3.V\theta.Ea.\sin \delta}{X_s} \quad (4.4)$$

Dimana,

τ = torsi elektromagnetik

Nilai daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh nilai torsi seperti dinyatakan pada persamaan 4.1. Pada grafik hasil simulasi diperoleh nilai torsi elektromagnetik dan daya yang dihasilkan bernilai nol.



Gambar 4.4 Grafik kecepatan putar, daya aktif dan torsi elektromagnetik dari kondensator sinkron

Pada grafik hasil simulasi memperlihatkan pada detik ke 0 hingga detik ke 1 ketika nilai eksitasi yang diberikan konstan, nilai daya reaktif yang dihasilkan mengalami peningkatan. Hal ini karena saat awal dioperasikan mesin sinkron bersifat sebagai beban, namun karena diberikan eksitasi yang tinggi (*over excitation*) akan menimbulkan arus eksitasi yang tinggi pula. Arus eksitasi ini akan meningkatkan fluks pada kumparan stator dan menghasilkan gaya gerak listrik (E_a) pada kumparan stator. Nilai eksitasi yang tinggi menghasilkan gaya gerak listrik yang tinggi pula. Karena mesin sinkron dioperasikan pada *over excitation* maka gaya gerak listrik yang dihasilkan lebih besar nilainya daripada tegangan pada stator. Hal ini mengakibatkan arah arus pada kumparan stator berubah. Arah arus yang semula menuju mesin sinkron berubah menjadi sebaliknya sehingga mesin sinkron menyuplai arus. Perubahan arus tersebut mengakibatkan berubahnya besar daya reaktif (Q). Pada awalnya mesin sinkron membutuhkan daya reaktif (Q), namun setelah diberi eksitasi berlebih mesin sinkron menjadi menghasilkan daya reaktif (Q). Pada detik ke 1 hingga detik ke 3, eksitasi yang diberikan diturunkan namun mesin sinkron tetap dioperasikan pada keadaan eksitasi berlebih. Maka nilai gaya gerak listrik pada kumparan stator berkurang dan mengakibatkan nilai arus pada kumparan stator juga berkurang. Hal ini mengakibatkan daya reaktif (Q) yang dihasilkan oleh mesin sinkron berkurang namun mesin sinkron tetap menyuplai daya reaktif (Q) pada sistem. Pada detik ke 3, eksitasi yang diberikan langsung diturunkan dan dipertahankan hingga detik ke 3,5. Pada kondisi ini daya reaktif (Q) yang dihasilkan oleh mesin sinkron semakin berkurang. Pada detik ke 3,5 besar eksitasi langsung ditingkatkan dan dipertahankan hingga detik ke 5. Pada kondisi tersebut, ketika eksitasi langsung ditingkatkan, daya reaktif (Q) yang dihasilkan mesin sinkron meningkat namun tidak secara langsung kemudian besarnya konstan hingga detik ke 5. Dari simulasi tersebut terlihat ketika besar eksitasi yang diberikan diturunkan atau ditingkatkan secara langsung, daya reaktif (Q) yang dihasilkan oleh mesin sinkron juga mengalami penurunan atau peningkatan namun tidak secara langsung. Hal ini karena terjadi perubahan arus sehingga mesin sinkron membutuhkan waktu agar mesin kembali dalam keadaan tunak.

Pada simulasi kita juga memperhatikan besarnya tegangan pada beban ketika daya reaktif (Q) yang dihasilkan oleh mesin sinkron berubah. Grafik hasil simulasi memperlihatkan saat detik ke 0 hingga detik ke 1 dimana daya reaktif (Q) yang dihasilkan mesin sinkron meningkat, besar tegangan antar fasa pada beban juga meningkat. Saat detik ke 1 hingga detik ke 3 dimana daya reaktif (Q) yang dihasilkan berkurang, besar tegangan antar fasa pada beban juga berkurang mengikuti penurunan daya reaktif (Q). Saat detik ke 3 hingga detik ke 3,5 dimana daya reaktif (Q) yang dihasilkan berkurang, tegangan antar fasa pada beban juga berkurang besarnya. Saat detik ke 3,5 hingga detik ke 5 dimana daya reaktif (Q) yang dihasilkan meningkat kemudian konstan besarnya, besar tegangan antar fasa pada beban juga meningkat kemudian konstan. Dari grafik hasil simulasi tersebut terlihat bahwa perubahan daya reaktif (Q) berbanding lurus secara linier dengan perubahan tegangan. Hal ini dapat dilihat berdasarkan persamaan berikut[7],

$$E - V = \frac{XQ}{V} \quad (4.5)$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{Q_{after} - Q_{before}}{V_{after} - V_{before}} \quad (4.6)$$

4.3 ANALISIS HASIL SIMULASI GENERATOR INDUKSI DENGAN KONDENSOR SINKRON

Simulasi ketiga adalah simulasi pengaturan tegangan pada sistem generator induksi berpenguat sendiri dengan menggunakan kondensor sinkron. Pada simulasi ini kondensor sinkron dihubungkan dengan generator induksi berpenguat sendiri dan beban resistif 1000 watt dengan konfigurasi bintang.

Pengaturan nilai eksitasi pada kondensor sinkron pada simulasi ini dilakukan dengan menggunakan sistem pengendali. Sistem pengendali ini menggunakan *low pass filter* untuk mengurangi gangguan (noise) pada frekuensi tinggi dan *lead/lag compensator* untuk mengurangi kesalahan dan mempercepat sistem menuju keadaan tunak. Namun pada skripsi ini tidak dibahas lebih detail tentang sistem pengendali yang digunakan. Skripsi ini dibatasi hanya menganalisis karakteristik

kondensor sinkron sebagai pengaturan tegangan pada generator induksi berpenguat sendiri. Torsi masukan yang diberikan ke generator induksi nilainya berubah-ubah sama seperti pada simulasi sebelumnya. Generator dibebani dengan beban resistif murni sebesar 1000 Watt dengan konfigurasi bintang. Kapasitor eksitasi yang diberikan pada simulasi ini memiliki nilai kapasitansi sebesar 39,31 μF . Kondensor sinkron dihubungkan dengan rangkaian pada titik antara kapasitor eksitasi dan beban.

Dari grafik tegangan terminal generator hasil simulasi terlihat bahwa secara umum tegangan keluaran generator pada simulasi ini berbeda dengan tegangan keluaran pada simulasi generator induksi berpenguat sendiri tanpa pengendali tegangan. Perbedaan yang terjadi antara simulasi generator induksi berpenguat sendiri tanpa pengendali tegangan dengan simulasi generator induksi berpenguat sendiri dengan menggunakan kondensor sinkron adalah pada tegangan yang dihasilkan pada ketiga fasa. Tegangan yang dihasilkan pada simulasi generator induksi berpenguat sendiri dengan menggunakan kondensor sinkron besarnya konstan. Tidak seperti tegangan yang dihasilkan pada simulasi generator induksi tanpa pengendali tegangan dimana besarnya berubah mengikuti perubahan torsi pada generator induksi berpenguat sendiri. Hal ini karena kondensor sinkron memberikan daya reaktif pada sistem sehingga bisa menjaga tegangan pada sisi beban maupun bagian stator generator induksi agar tetap konstan.

Grafik kecepatan putar generator induksi ketika dilakukan pengendalian tegangan menggunakan kondensor sinkron memperlihatkan bahwa ketika kondensor sinkron terhubung dengan rangkaian, mempengaruhi besar torsi elektromagnetik dari generator induksi. Pada simulasi ini, kondensor sinkron menghasilkan daya reaktif. Daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron terhubung dengan bagian stator pada generator induksi berpenguat sendiri. Hal ini menyebabkan arus pada bagian stator generator induksi berpenguat sendiri mengalami perubahan akibat daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron. Apabila daya reaktif yang dihasilkan kondensor sinkron semakin tinggi maka arus pada bagian stator generator induksi berpenguat sendiri juga semakin tinggi. Demikian pula sebaliknya apabila daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron berkurang maka arus pada bagian stator generator induksi berpenguat

sendiri juga berkurang. Perubahan arus tersebut juga mempengaruhi besar torsi elektromagnetik pada generator induksi berpenguat sendiri. Apabila besar arus bertambah maka torsi elektromagnetik yang dihasilkan juga bertambah, demikian pula sebaliknya. Hal ini sesuai dengan persamaan torsi elektromagnetik pada generator induksi yang dinyatakan pada persamaan di bawah ini,

$$\tau_{em} = k \cdot \phi \cdot I_a \quad (4.7)$$

Dimana,

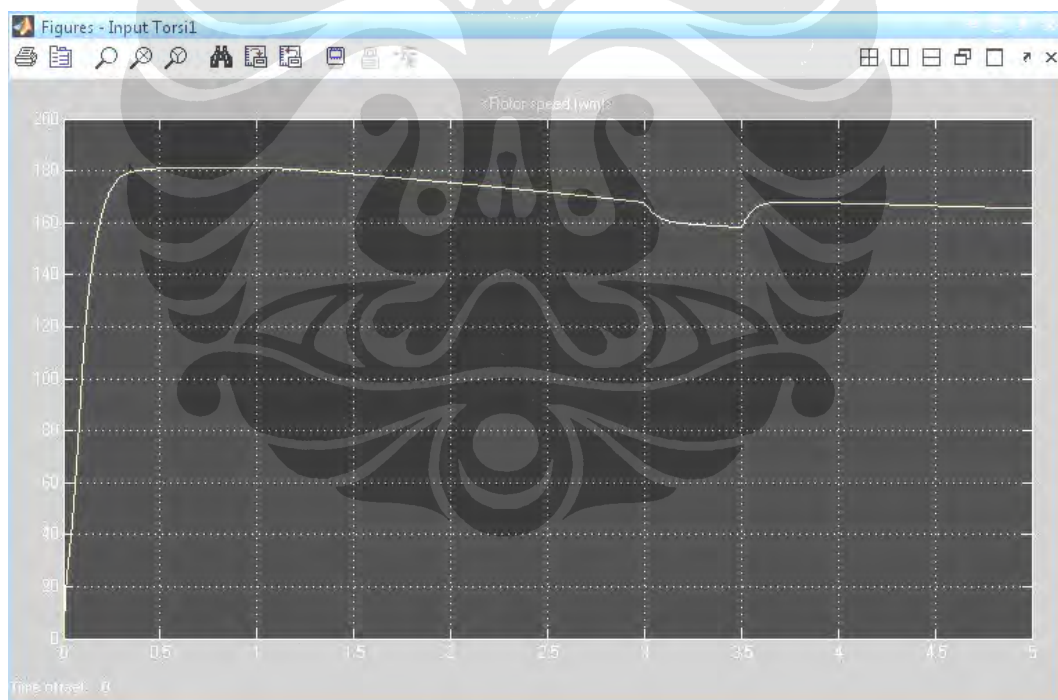
τ_{em} = torsi elektromagnetik

ϕ = fluks magnetik

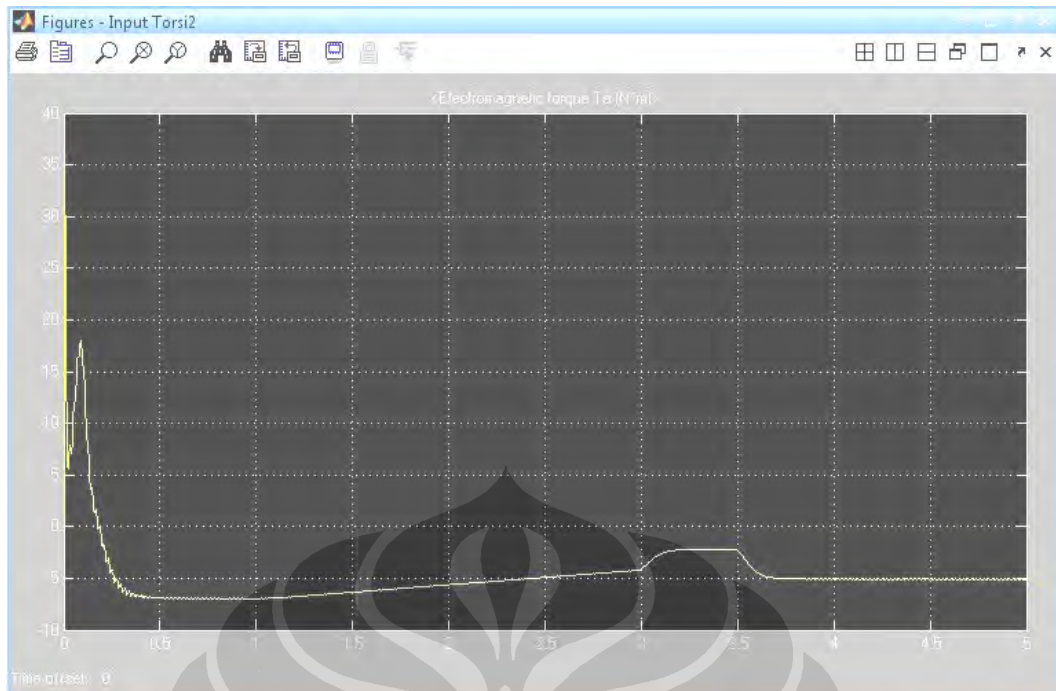
I_a = arus pada bagian stator

Besarnya torsi elektromagnetik ini akan mempengaruhi kecepatan putar dari generator induksi berpenguat sendiri, karena kecepatan putar generator induksi dipengaruhi oleh selisih antara nilai torsi mekanik yang diberikan dengan torsi elektromagnetik yang dihasilkan atau resultan torsi. Pada simulasi ini, nilai torsi yang diberikan pada generator induksi berpenguat sendiri divariasikan besarnya. Pada detik ke 0 hingga detik ke 1 torsi yang diberikan konstan. Demikian pula dengan torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri bernilai konstan setelah generator induksi beroperasi pada keadaan tunak. Pada kondisi ini kecepatan putar generator induksi berpenguat sendiri juga konstan. Pada detik ke 1 hingga detik ke 3, torsi yang diberikan pada generator induksi berpenguat sendiri berkurang. Sedangkan besar torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh generator induksi meningkat. Hal ini karena daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron meningkat. Dengan meningkatnya torsi elektromagnetik yang dihasilkan serta berkurangnya torsi mekanik yang diberikan mengakibatkan nilai resultan torsi berkurang. Hal ini mengakibatkan kecepatan putar generator induksi berpenguat sendiri juga berkurang, seperti terlihat pada grafik hasil simulasi. Pada detik ke 3 besar torsi mekanik yang diberikan langsung diturunkan dan dipertahankan hingga detik ke 3,5. Sedangkan torsi elektromagnetik yang dihasilkan langsung meningkat karena daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron juga meningkat. Perubahan torsi elektromagnetik yang langsung meningkat serta besar torsi mekanik yang langsung diturunkan mengakibatkan besar resultan torsi langsung berkurang. Hal

ini mengakibatkan kecepatan putar generator induksi berpenguat sendiri langsung menurun dan tetap konstan hingga detik ke 3,5 seperti terlihat pada grafik hasil simulasi. Pada detik ke 3,5 besar torsi mekanik yang diberikan pada generator induksi berpenguat sendiri langsung ditingkatkan dan dipertahankan hingga detik ke 5. Sedangkan torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh generator induksi langsung berkurang dan tetap nilainya hingga detik ke 5. Hal ini karena daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron berkurang kemudian tetap nilainya hingga detik ke 5. Perubahan besar torsi elektromagnetik dan torsi mekanik yang diberikan tersebut mengakibatkan besar resultan torsi langsung meningkat pada detik ke 3,5 kemudian konstan nilainya hingga detik ke 5. Hal ini mengakibatkan kecepatan putar pada generator induksi berpenguat sendiri langsung meningkat pada detik ke 3,5 kemudian konstan hingga detik ke 5 seperti terlihat pada grafik hasil simulasi.



Gambar 4.5 Grafik kecepatan putar generator induksi berpenguat sendiri pada simulasi dengan Kondensor sinkron



Gambar 4.6 Grafik torsi elektromagnetik generator induksi berpenguat sendiri pada simulasi dengan Kondensator sinkron

Waktu yang dibutuhkan generator induksi berpenguat sendiri untuk mencapai keadaan tunak pada simulasi ini lebih cepat daripada simulasi generator induksi berpenguat sendiri tanpa pengendali tegangan. Hal ini dapat terjadi karena kondensator sinkron menyuplai daya reaktif ke generator induksi berpenguat sendiri. Hal ini mengakibatkan generator induksi berpenguat sendiri mendapat daya reaktif yang tinggi sehingga waktu yang dibutuhkan untuk membangkitkan tegangan seluruhnya lebih cepat.

Seperti telah dijelaskan pada analisis sebelumnya, bahwa perubahan torsi yang diberikan mengakibatkan daya yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri juga berkurang sesuai dengan persamaan 4.1. Hal ini terlihat pada grafik hasil simulasi. Pada detik ke 0 hingga detik ke 1, ketika besar torsi yang diberikan konstan, daya yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri juga konstan. Pada detik ke 1 hingga detik ke 3, torsi yang diberikan berkurang sehingga daya yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri juga berkurang. Pada detik ke 3 torsi yang diberikan langsung diturunkan dan dipertahankan hingga detik ke 3,5 mengakibatkan daya yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri juga berkurang kemudian konstan hingga

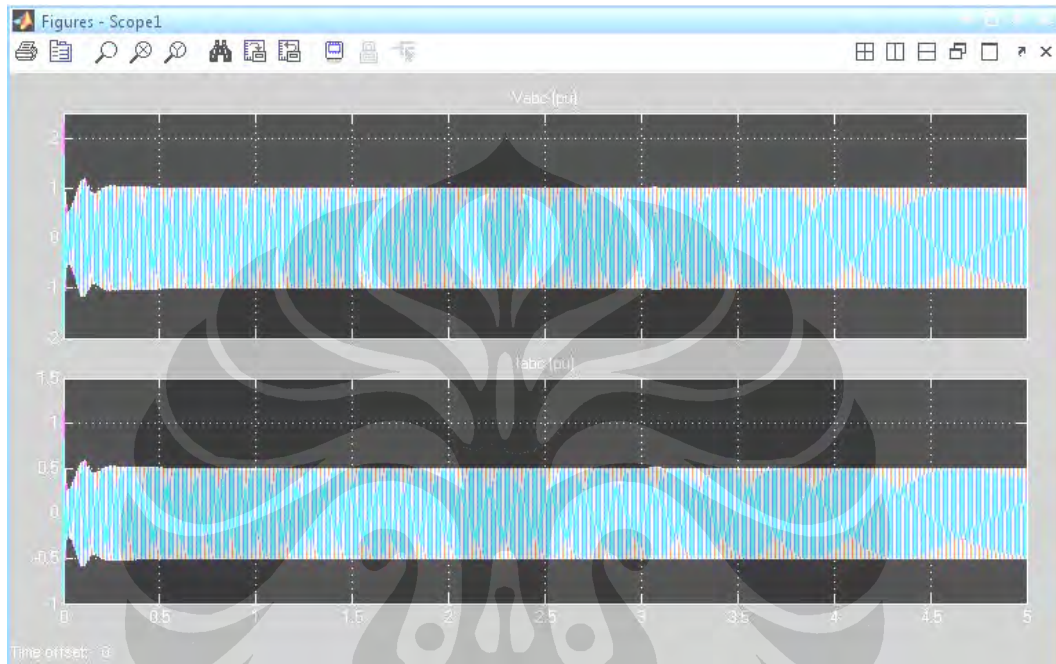
detik ke 3,5. Pada detik ke 3,5 torsi yang diberikan langsung ditingkatkan kemudian konstan hingga detik ke 5 mengakibatkan daya yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri juga meningkat kemudian konstan hingga detik ke 5.

Perubahan daya yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri mengakibatkan tegangan keluaran dari generator induksi berpenguat sendiri berubah sesuai dengan persamaan 4.2. Perubahan tegangan tersebut tidak diinginkan, karena perubahan tegangan tersebut mengakibatkan arus yang ditarik oleh beban juga berubah. Apabila tegangan berkurang mengakibatkan arus yang ditarik oleh beban meningkat dan hal ini mengakibatkan rugi daya di jaringan bertambah. Oleh karena itu dibutuhkan pengaturan tegangan dan pada simulasi ini digunakan kondensor sinkron untuk pengaturan tegangan.

Kondensor sinkron mampu menghasilkan daya reaktif yang dapat diatur besarnya dengan mengatur eksitasi yang diberikan pada kondensor sinkron. Besarnya daya reaktif yang dihasilkan dapat mengatur tegangan yang diterima pada sisi beban sesuai dengan persamaan 4.5 dan 4.6. Pada simulasi ini kondensor sinkron dioperasikan dengan menggunakan pengendali untuk mengatur eksitasi yang diberikan pada kondensor sinkron. Seperti telah dijelaskan sebelumnya bahwa daya yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri mempengaruhi besar tegangan keluaran dari generator induksi. Tegangan keluaran tersebut diterima sebagai masukan pada pengendali eksitasi kondensor sinkron. Kemudian dengan menggunakan *low pass filter*, gangguan atau *noise* dari tegangan tersebut dikurangi. Tegangan yang telah melewati *low pass filter* tersebut dibandingkan dengan tegangan yang diinginkan atau tegangan referensi untuk mengetahui besarnya jatuh tegangan. Besarnya jatuh tegangan ini digunakan untuk memperoleh besarnya daya reaktif yang dibutuhkan. Kemudian untuk mengurangi kesalahan yang terjadi serta mempercepat sistem mencapai keadaan tunak digunakan *lead/lag compensator*. Dari daya reaktif tersebut dapat ditentukan besarnya eksitasi yang dibutuhkan. Hal ini karena besarnya eksitasi mempengaruhi besarnya daya reaktif yang dihasilkan seperti telah dijelaskan pada subbab 4.2. Pada pengendali ini juga terdapat umpan balik untuk mengetahui apakah besar eksitasi yang dihasilkan oleh pengendali tersebut sesuai dengan yang

dibutuhkan. Penjelasan lebih detail mengenai pengendali tersebut tidak dibahas pada skripsi ini. Skripsi ini dibatasi hanya membahas karakteristik dari kondensor sinkron sebagai pengatur tegangan generator induksi berpenguat sendiri. Pada detik ke 0 hingga detik ke 1, daya yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri konstan sehingga tegangan keluaran dari generator induksi juga konstan. Karena tegangan keluaran dari generator induksi konstan maka besar eksitasi yang diberikan pada kondensor sinkron juga konstan. Pada detik ke 1 hingga detik ke 3 daya yang dihasilkan oleh generator induksi berpenguat sendiri menurun, sehingga tegangan keluaran dari generator induksi menurun. Untuk mengatur agar besar tegangan yang diterima oleh beban konstan, maka diperlukan penambahan daya reaktif. Sehingga besar eksitasi yang diberikan pada kondensor sinkron ditingkatkan untuk meningkatkan daya reaktif yang dihasilkan. Akibat penambahan daya reaktif, maka tegangan antar fasa pada beban konstan demikian pula dengan tegangan pada bagian stator generator induksi. Hal ini karena daya reaktif yang dihasilkan oleh kondensor sinkron terhubung dengan bagian stator generator induksi. Pada grafik hasil simulasi terlihat bahwa ketika besar eksitasi ditingkatkan, daya reaktif yang dihasilkan juga meningkat. Namun setelah tegangan mencapai nilai yang diinginkan besarnya eksitasi yang diberikan pada kondensor sinkron menjadi konstan. Demikian pula daya reaktif yang dihasilkan menjadi konstan. Pada detik ke 3 daya yang dihasilkan berkurang kemudian konstan hingga detik ke 3,5, demikian pula dengan tegangan keluaran dari generator induksi. Hal ini mengakibatkan besar eksitasi yang diberikan pada kondensor sinkron ditingkatkan agar daya reaktif yang dihasilkan meningkat. Setelah tegangan mencapai nilai yang diinginkan, besar eksitasi yang diberikan pada kondensor sinkron konstan sehingga daya reaktif yang dihasilkan juga konstan. Pada detik ke 3,5 daya yang dihasilkan oleh generator induksi meningkat kemudian konstan hingga detik ke 5. Demikian pula dengan tegangan keluaran generator induksi berpenguat sendiri meningkat pada detik ke 3,5 kemudian konstan hingga detik ke 5. Untuk menstabilkan tegangan pada beban maupun pada bagian stator generator induksi, besar eksitasi yang diberikan pada kondensor sinkron diturunkan sehingga daya reaktif berkurang. Setelah tegangan mencapai tegangan yang diinginkan maka besar eksitasi yang diberikan dan daya

reaktif yang dihasilkan pada kondensor sinkron menjadi konstan. Dari hasil simulasi pengaturan tegangan generator induksi dengan menggunakan kondensor sinkron diperoleh nilai tegangan antar fasa pada beban konstan besarnya. Demikian pula dengan tegangan yang terukur pada bagian stator generator induksi besarnya konstan. Hal ini karena kondensor sinkron terhubung dengan beban dan generator induksi berpenguat sendiri.



Gambar 4.7 Grafik tegangan dan arus antar fasa pada beban dalam satuan pu

Dari simulasi ini dapat disimpulkan bahwa penggunaan kondensor sinkron sebagai pengaturan tegangan pada generator induksi berpenguat sendiri mampu menghasilkan besar tegangan yang konstan pada sisi beban. Kondensor sinkron juga tidak memiliki masalah harmonik. Namun kondensor sinkron tidak murah harganya seperti kapasitor serta bentuk fisiknya lumayan besar. Sehingga kondensor sinkron lebih efektif digunakan untuk pengaturan tegangan pada tegangan menengah dan tegangan tinggi. Selain itu karakteristik kondensor sinkron yang mampu mengatur tegangan untuk beban induktif maupun kapasitif, efektif digunakan pada tegangan tinggi.

BAB V

KESIMPULAN

1. Tegangan keluaran yang dihasilkan generator induksi berpenguat sendiri dipengaruhi oleh besar torsi masukan generator dan besar kapasitansi kapasitor eksitasi.
2. Metode pengaturan tegangan generator induksi berpenguat sendiri yang menghasilkan pengaturan tegangan yang paling baik adalah dengan menggunakan kondensor sinkron karena mampu memberikan maupun menarik daya reaktif. Namun metode ini lebih efektif jika diaplikasikan pada tegangan tinggi dimana karakteristik beban dapat bersifat induktif maupun kapasitif.
3. Untuk pengaturan tegangan dengan tingkatan yang lebih kecil dapat digunakan kapasitor bank atau kompensator var statis dengan spesifikasi parameter yang sesuai dengan sistem.
4. Dari hasil simulasi pengaturan tegangan diperoleh tegangan antar fasa pada beban konstan nilainya sesuai dengan yang diinginkan, sehingga dapat disimpulkan pengaturan tegangan dengan kondensor sinkron dapat menjaga kestabilan besar tegangan.
5. Sistem pengendali eksitasi pada kondensor sinkron mampu mengendalikan daya reaktif yang dihasilkan sesuai dengan yang dibutuhkan.

DAFTAR ACUAN

- [1] Shekar, T. Chandra dan Bishnu P. Muni, "Voltage Regulators for Self Excited Induction Generator" IEEE Power Engineering Journal, 2004.
- [2] Bansal, R. C., "Three-Phase Self-Excited Induction Generators: An Overview" IEEE Transactions on Energy Conversion, Juni, 2005.
- [3] Isnaeni, M. B. S., "Motor Induksi Sebagai Generator (MISG)" Seminar Nasional Teknik Ketenagalistrikan, Semarang, November, 2005.
- [4] Hardika, Alfredo "Analisis Karakteristik Pengaturan Tegangan Generator Induksi Berpenguat Sendiri Dengan Bank Kapasitor" Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, Gasal 2007/2008.
- [5] Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery and Power System Fundamentals*" McGraw-Hill, New York, 2002.
- [6] I. M. Canay, "Determination of the Model Parameters of Machines from the Reactance Operators $X_d(p)$, $X_q(p)$," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 2, Juni 1993.
- [7] Weedy, B. M., Cory, B. J., "*Electric Power Systems Fourth Edition*" John Wiley & Sons, Singapore, November 2001.
- [8] Marsudi, Djiteng, "*Operasi Sistem Tenaga Listrik*" Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006.
- [9] Shibata, Fukuo, Taka, Koji, "A Self-Cascaded Induction Generator Combined With A Separately Controlled Inverter And A Synchronous Condenser" Department of Electrical Engineering, Kanazawa Institute of Technology, Japan, 1990.

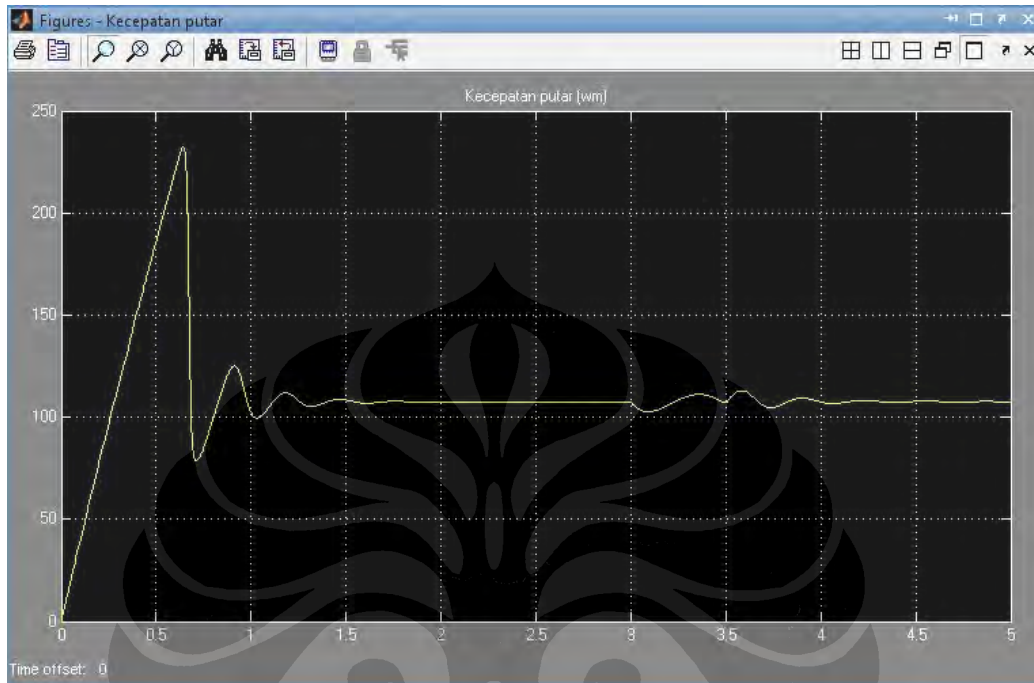
DAFTAR PUSTAKA

- Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery and Power System Fundamentals*" McGraw-Hill, New York, 2002.
- Hardika, Alfredo "Analisis Karakteristik Pengaturan Tegangan Generator Induksi Berpenguat Sendiri Dengan Bank Kapasitor" Skripsi, S1 Departemen Teknik Elektro FTUI, Depok, Gasal 2007/2008.
- Kundur, Prabha, "*Power System Stability and Control*" McGraw-Hill, California, 1993.
- Mohan, N., Undeland, Tore M., Robbins, William P., "*Power Electronics, Converters, Applications, and Design Third Edition*" John Wiley & Sons, New Jersey, 2003.
- Ong, Chee Mun, "*Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab / Simulink*", Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1997.
- Slootweg, Johannes Gerlof, "Wind Power Modeling and Impact on Power System Dynamics", Technische Universiteit Delft, Holland, 2003.
- Stevenson, William D. Jr., "*Analisis Sistem Tenaga Listrik Edisi Keempat (terjemahan)*" Penerbit Erlangga, Jakarta, 1983.
- Vas, Peter, "*Electrical Machines and Drives A Space-Vector Theory Approach*", Oxford University Press, New York, 1992.
- Weedy, B. M., Cory, B. J., "*Electric Power Systems Fourth Edition*" John Wiley & Sons, Singapore, November 2001.
- Marsudi, Djiteng, "*Operasi Sistem Tenaga Listrik*" Penerbit Graha Ilmu, Yogyakarta, 2006.
- Rajput, R. K., "*Electrical Machines In S.I Units Fourth Edition*" Laxmi Publications (P) LTD, New Delhi, 2006.

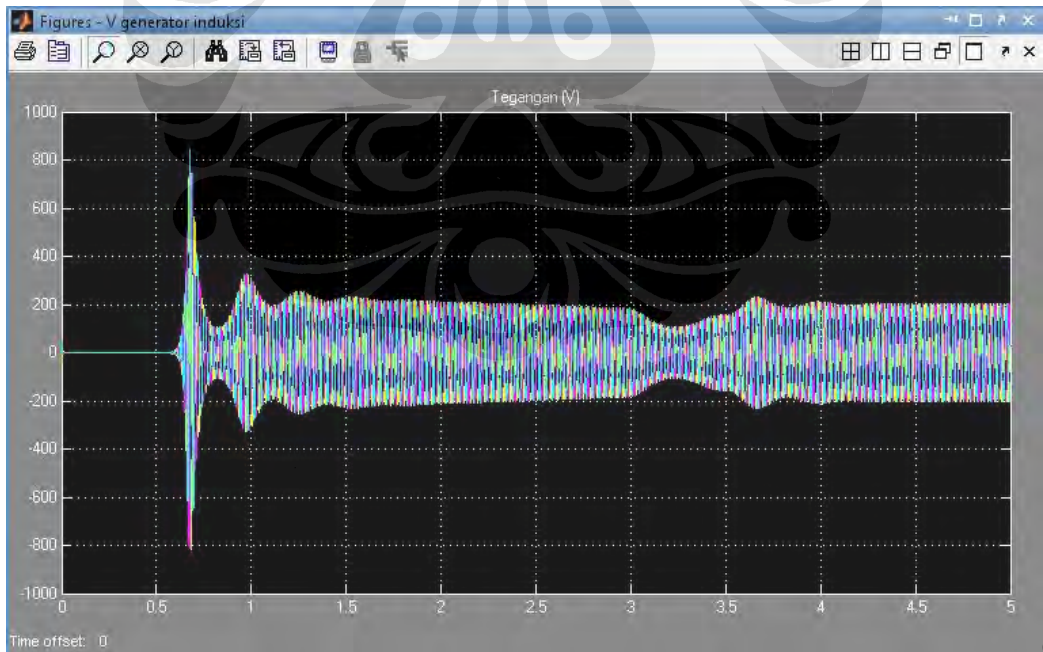
LAMPIRAN

Lampiran 1 Gambar Grafik Hasil Simulasi

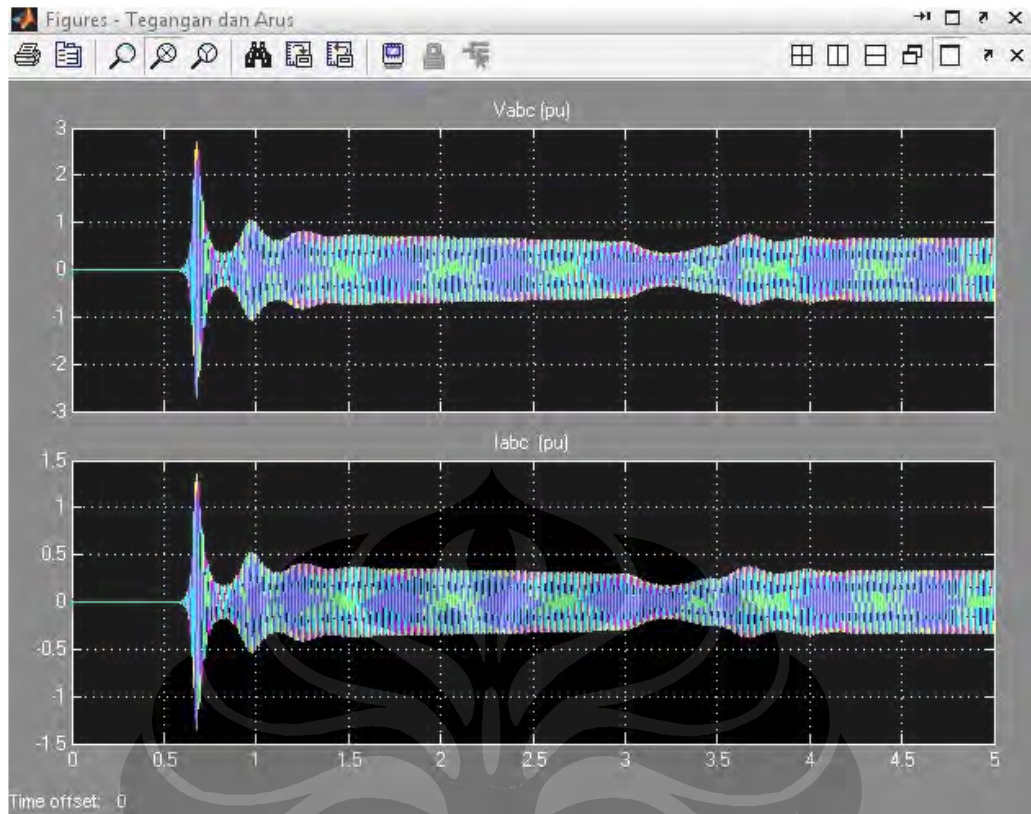
Hasil Simulasi Sistem Tanpa Pengendali Tegangan



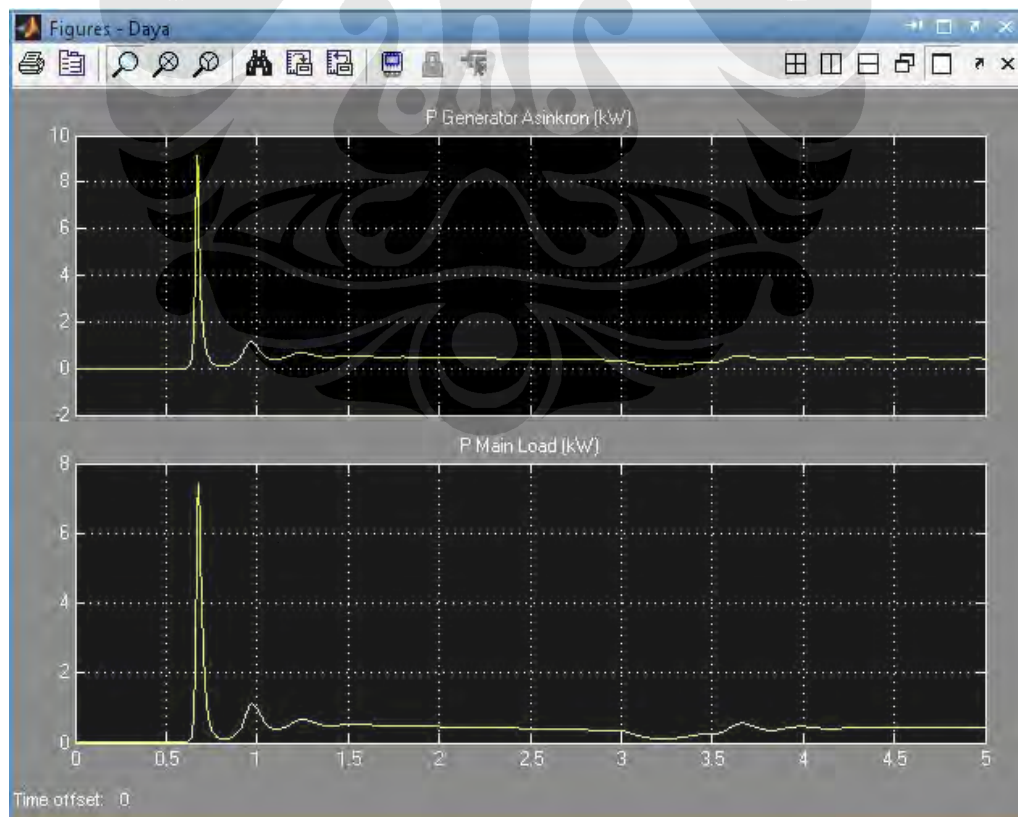
Grafik Kecepatan Putar Generator Induksi Tanpa Pengendali Tegangan



Grafik Tegangan Terminal Generator Induksi Tanpa Pengendali Tegangan

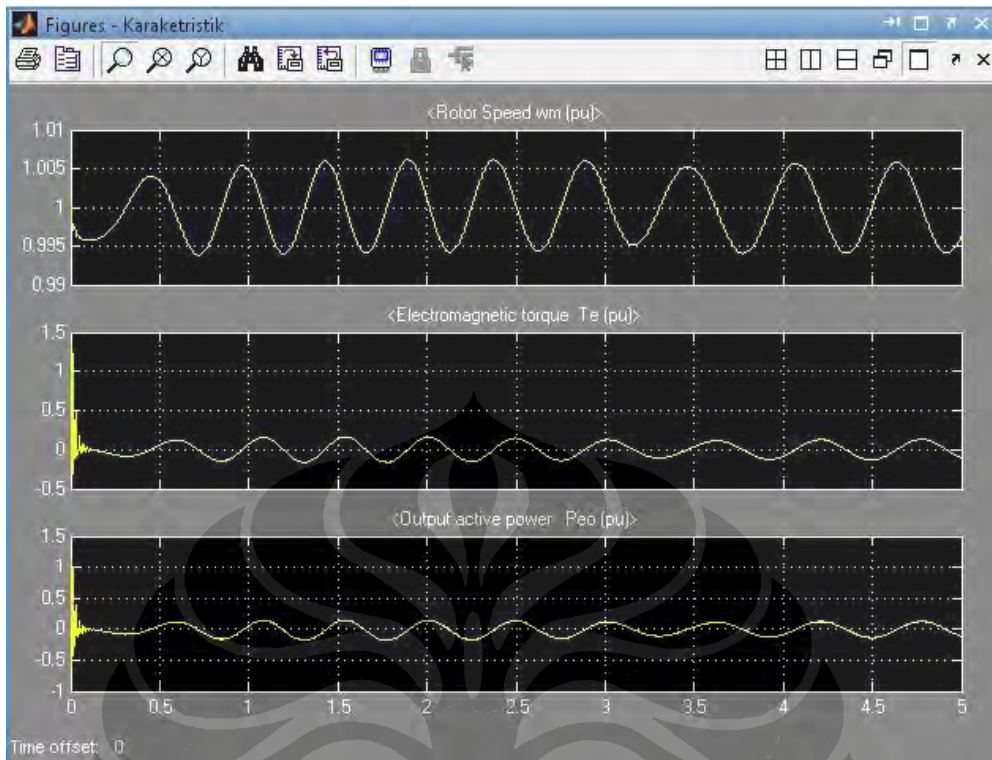


Grafik Tegangan (atas) dan Arus (bawah) Beban Generator Induksi Tanpa Pengendali Tegangan

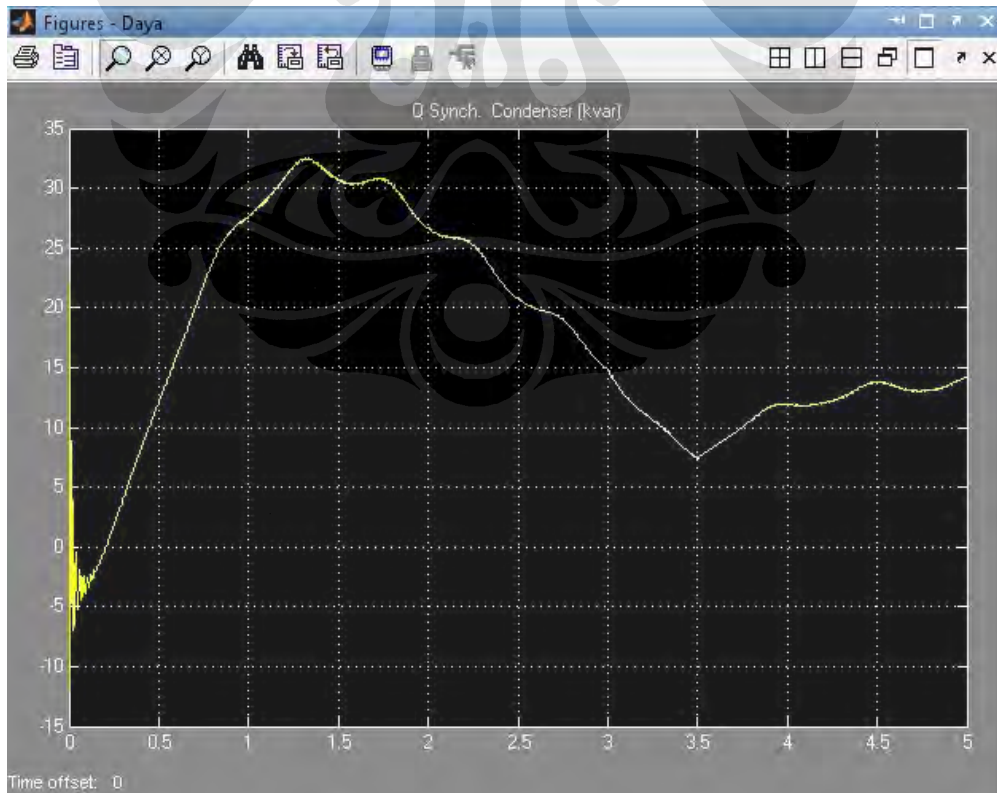


Grafik Daya Generator Induksi (atas) dan Daya Beban (bawah) Tanpa Pengendali Tegangan

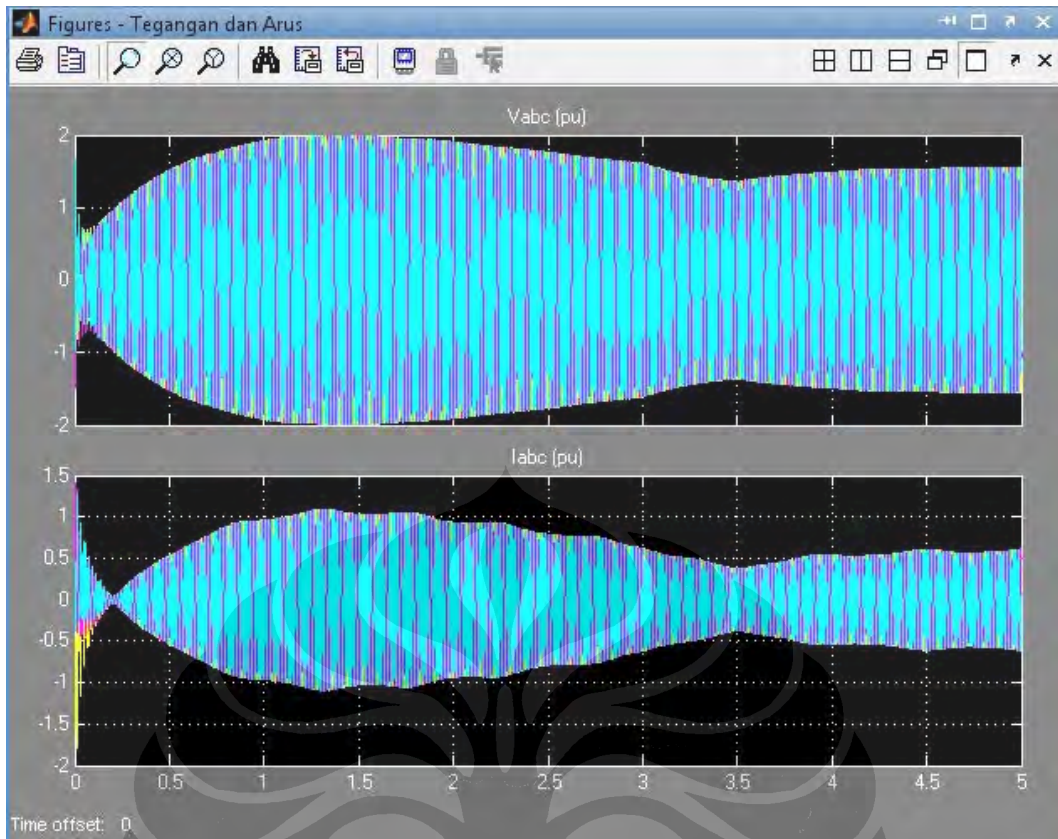
Hasil Simulasi Kondensor Sinkron



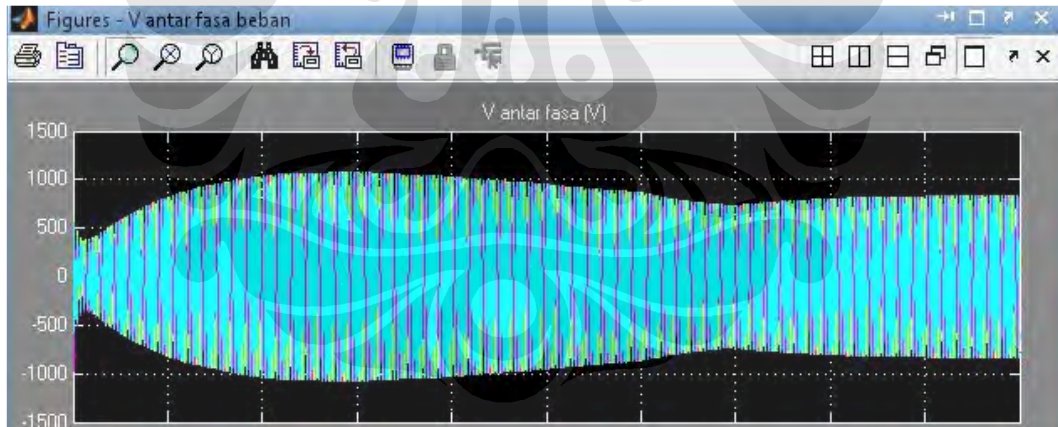
Grafik Kecepatan Putar, Torsi Elektromagnetik dan Daya Keluaran dari Kondensor Sinkron



Grafik Daya Reaktif Keluaran Kondensor Sinkron

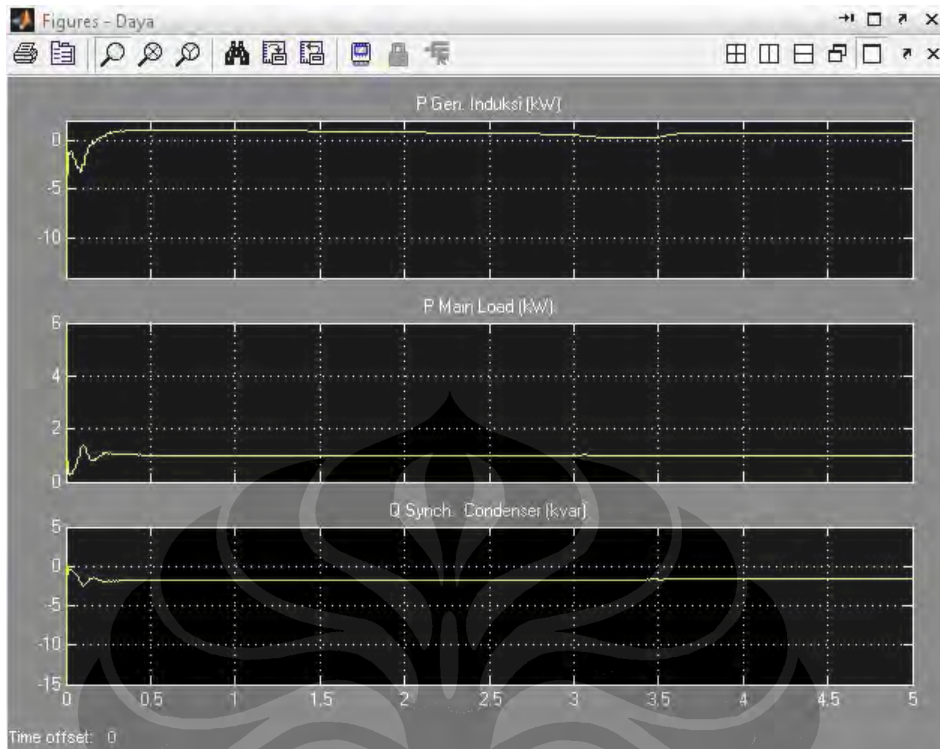


Grafik Tegangan (atas) dan Arus (bawah) yang dihasilkan oleh kondensator sinkron

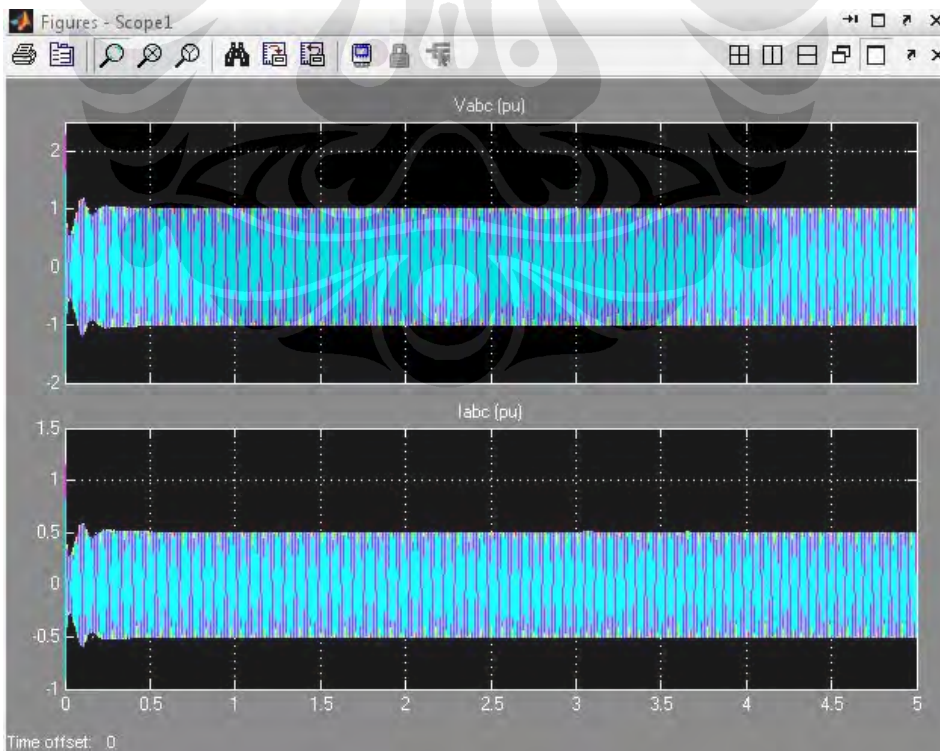


Grafik Tegangan Antar Fasa Pada Beban

Hasil Simulasi Dengan Kondensor Sinkron

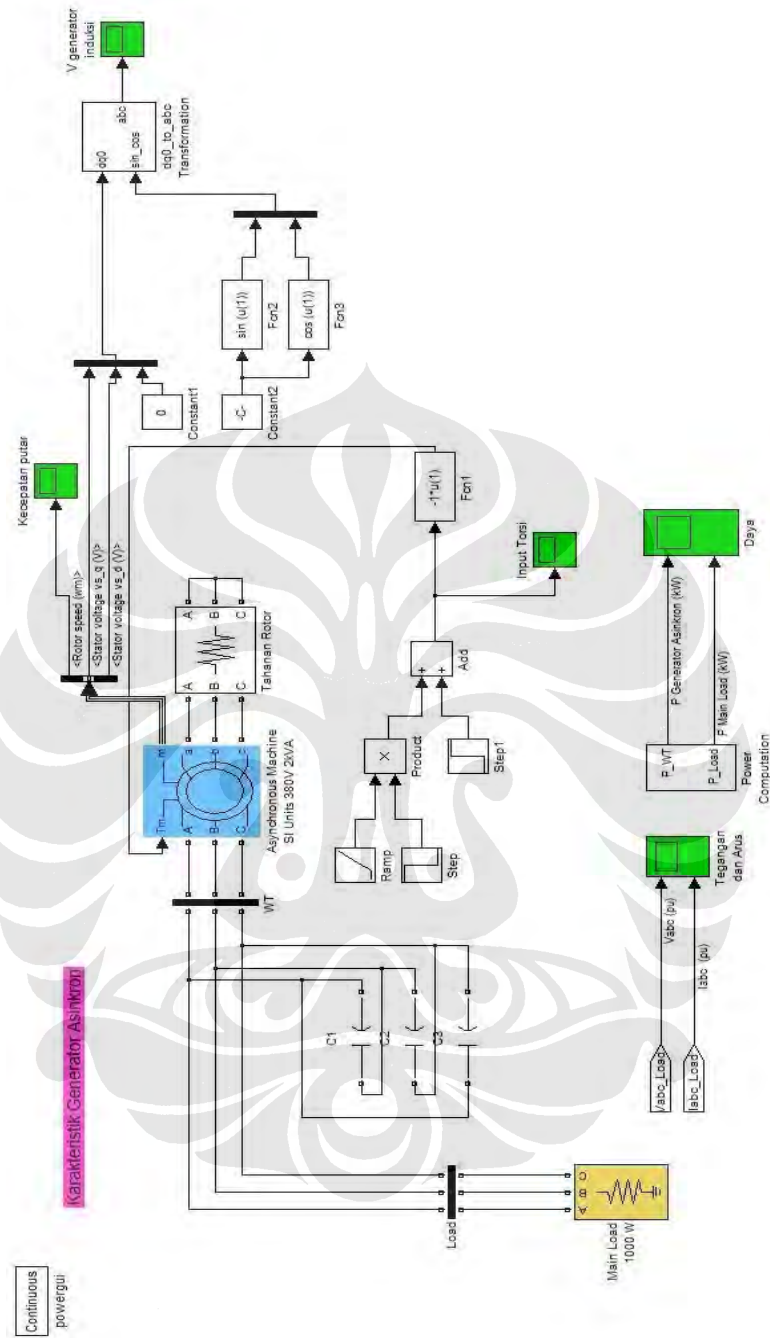


Grafik Daya Keluaran Generator Induksi (atas), Daya Beban (tengah) dan Daya Reaktif Kondensor Sinkron (bawah)

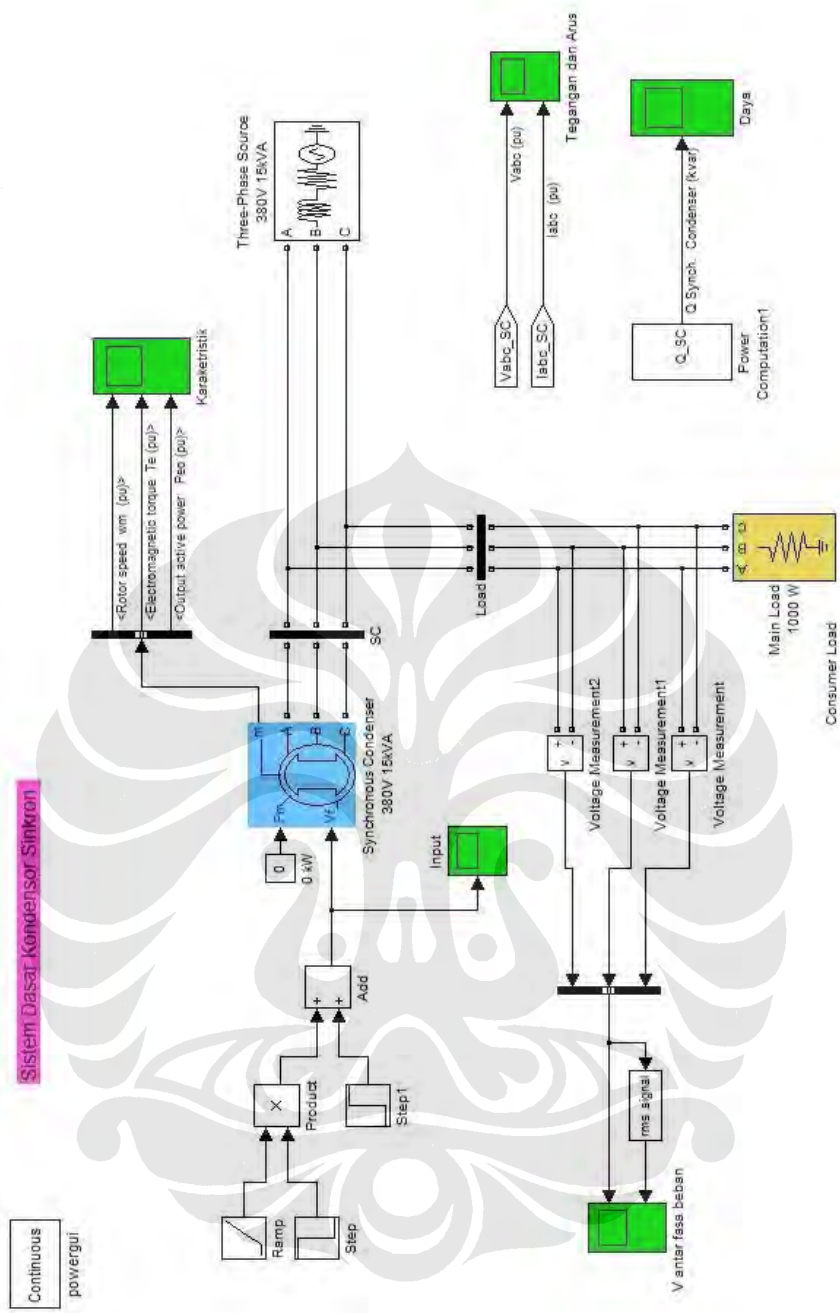


Grafik Tegangan (atas) dan Arus (bawah) pada beban dengan pengendali tegangan menggunakan kondensor sinkron

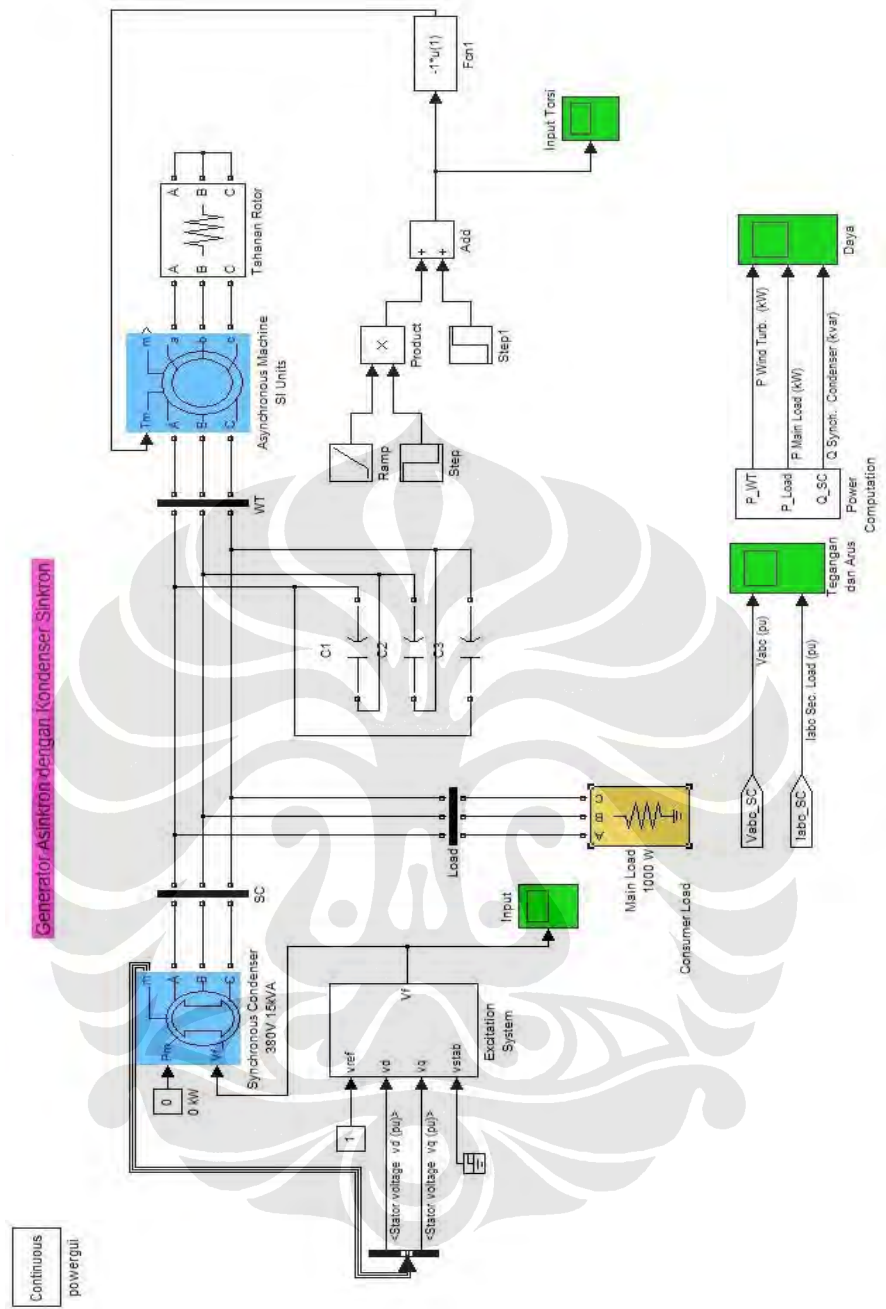
Lampiran 2 Rangkaian Simulasi



Rangkaian Simulasi Sistem Tanpa Pengendali Tegangan



Rangkaian Simulasi Kondensor Sinkron



Rangkaian Simulasi Generator Induksi dengan Kondensur Sinkron Sebagai Pengendali Tegangan