

repository.ub.ac.id

**PERANCANGAN PENGOPERASIAN GENERATOR INDUKSI
UNTUK PLTM CHECK DAM V KALI JARI KABUPATEN BLITAR**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

WIDDY YUANTO
NIM. 0110630129

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
MALANG
2007**



**PERANCANGAN PENGOPERASIAN GENERATOR INDUKSI
UNTUK PLTM CHECK DAM V KALI JARI KABUPATEN BLITAR**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

WIDDY YUANTO
NIM. 0110630129

Telah diperiksa dan disetujui oleh

DOSEN PEMBIMBING:

Budiono Mismail, Ir, MSEE, PhD, Prof
NIP. 130 518 936

Hari Santoso, Ir, MS
NIP. 131 470 477

**PERANCANGAN PENGOPERASIAN GENERATOR INDUKSI
UNTUK PLTM CHECK DAM V KALI JARI KABUPATEN BLITAR**

Disusun oleh:

**WIDDY YUANTO
NIM. 0110630129**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 30 Maret 2007

DOSEN PENGUJI

Soemarwanto, Ir
NIP. 130 873 485

Hery Purnomo, Ir
NIP. 131 131 027

Mahfudz Shidiq, Ir, MT
NIP. 131 699 002

Rini Nur Hasanah, ST, MSc, PhD
NIP. 132 143 040

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Elektro

Ir. Purwanto, MT
NIP. 131 574 847

**DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2007**

KATA PENGANTAR

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan YME, sebab dengan berkat dan rahmatNya, skripsi yang berjudul Perancangan Pengoperasian Generator Induksi untuk PLTM Check Dam V Kali Jari Kabupaten Blitar dapat diselesaikan dengan baik.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya.

Dengan rasa hormat, penulis menyampaikan terima kasih yang tulus kepada :

1. Bapak Ir. Purwanto, MT sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
2. Bapak Ir. Hery Purnomo sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya.
3. Bapak Prof. Ir. Budiono Mismail, MSEE, PhD selaku dosen pembimbing skripsi ini.
4. Bapak Ir. Hari Santoso, MS selaku dosen pembimbing skripsi ini.
5. Bapak, Ibu dosen serta segenap staf dan karyawan Jurusan Teknik Elektro baik secara langsung maupun tidak langsung yang telah banyak membantu dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Rekan-rekan mahasiswa yang memberi dukungan dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari sepenuhnya atas keterbatasan serta kekurangan yang ada pada tulisan ini, untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat menyempurnakan tulisan ini.

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

Malang, 30 Maret 2007

Penulis

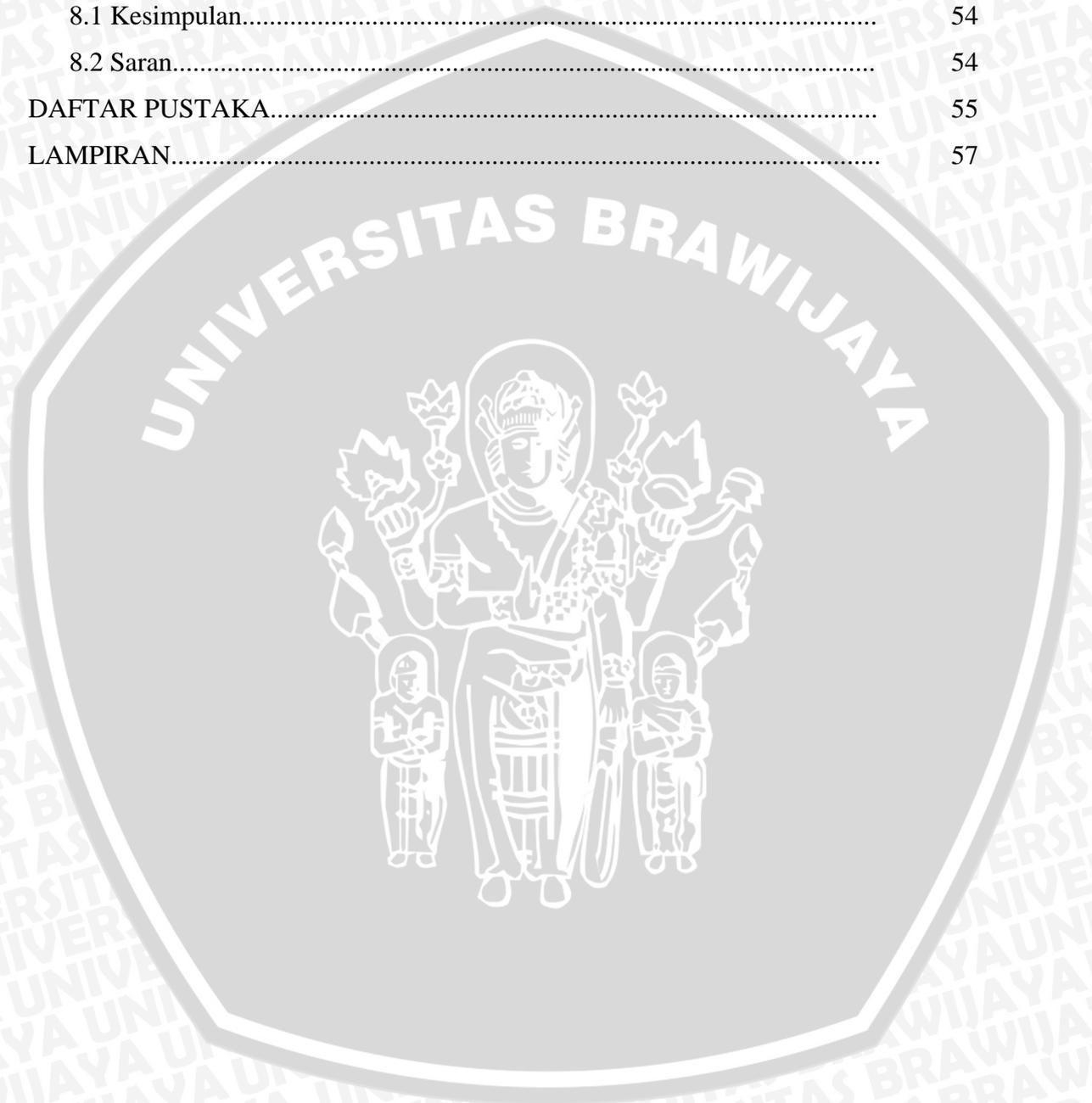
DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vi
DAFTAR LAMPIRAN.....	ix
ABSTRAK.....	x
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah.....	2
1.4. Tujuan.....	2
1.5. Sistematika pembahasan.....	3
II. GENERATOR INDUKSI	5
2.1. Umum.....	5
2.2. Konstruksi Mesin Induksi.....	5
2.3. Konsep Dasar Mesin Induksi.....	8
2.3.1. Medan magnet putar.....	8
2.3.2. Tegangan terinduksi pada mesin induksi.....	9
2.3.3. Prinsip kerja mesin induksi.....	9
2.4. Mesin Induksi Sebagai Generator Induksi.....	10
2.4.1. Generator induksi yang terhubung dengan jaringan.....	11
2.4.2. Generator induksi beroperasi sendiri.....	14
2.4.3. Kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron.....	16
2.5. Pengukuran Parameter Mesin Induksi Fasa Tiga.....	17
2.5.1. Pengukuran resistansi stator.....	17
2.5.2. Pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi tanpa beban.....	18
2.5.2. Pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi rotor ditahan.....	19
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	22
3.1. Studi Literatur.....	22

3.2.	Pengumpulan Data.....	22
3.3.	Perancangan Penempatan Generator Induksi.....	23
3.4.	Perencanaan Pengoperasian Mesin Induksi Menjadi Generator Induksi Beroperasi Sendiri.....	23
3.5.	Perencanaan Pengoperasian Kerja Paralel Generator Induksi Dengan Generator Sinkron.....	24
3.6.	Pengujian Dan Analisis Data.....	24
3.7.	Penarikan Kesimpulan.....	24
IV.	PERANCANGAN PENEMPATAN GENERATOR INDUKSI PADA PLTM CHECK DAM V KALI JARI.....	25
4.1.	PLTM Check Dam V Kali Jari.....	25
4.2.	Perancangan Penempatan Generator Induksi.....	28
V.	PERENCANAAN PENGOPERASIAN GENERATOR INDUKSI PADA PLTM CHECK DAM V KALI JARI.....	32
5.1.	Perencanaan Pengoperasian Generator Induksi Beroperasi Sendiri.....	32
5.2.	Perencanaan Pengoperasian Kerja Paralel Generator Induksi Dan Generator Sinkron.....	35
VI.	PEMASANGAN GENERATOR INDUKSI PADA PLTM CHECK DAM V KALI JARI.....	38
VII.	PENGUJIAN GENERATOR INDUKSI DAN ANALISIS DATA.....	41
7.1.	Umum.....	41
7.2.	Pengujian Pengoperasian Mesin Induksi 22 kW Sebagai Generator Induksi Beroperasi Sendiri.....	42
7.1.1.	Tujuan.....	42
7.1.2.	Peralatan yang digunakan.....	42
7.1.3.	Rangkaian pengujian.....	42
7.1.4.	Prosedur pengujian.....	44
7.1.5.	Hasil pengujian.....	45
7.1.6.	Analisis data.....	47
7.3.	Pengujian Pengoperasian Mesin Induksi 3 kW Sebagai Generator Induksi Yang Diparalel Dengan Generator Sinkron.....	48
7.3.1.	Tujuan.....	48
7.3.2.	Peralatan yang digunakan.....	48



7.3.3. Rangkaian pengujian.....	48
7.3.4. Prosedur pengujian.....	49
7.3.5. Hasil pengujian.....	50
7.3.6. Analisis data.....	52
VIII. PENUTUP.....	54
8.1 Kesimpulan.....	54
8.2 Saran.....	54
DAFTAR PUSTAKA.....	55
LAMPIRAN.....	57



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Aturan pembagian reaktansi rotor dan stator motor induksi	21
Tabel 7.1.	Data hasil pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator beroperasi sendiri	46
Tabel 7.2.	Data hasil pengujian pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron 15 kVA	51
Tabel 7.3.	Perbedaan arus beban hasil pengujian dengan hasil perhitungan	52
Tabel L-1.1.	Hasil pengukuran resistansi dc mesin induksi 22 kW	57
Tabel L-1.2.	Hasil pengukuran parameter mesin induksi 22 kW dengan kondisi tanpa beban	57
Tabel L-1.3.	Hasil pengukuran parameter mesin induksi 22 kW dengan kondisi rotor ditahan	57
Tabel L-1.4.	Hasil pengukuran resistansi dc mesin induksi 22 kW	58
Tabel L-1.5.	Hasil pengukuran parameter mesin induksi 22 kW dengan kondisi tanpa beban	58
Tabel L-1.6.	Hasil pengukuran parameter mesin induksi 22 kW dengan kondisi rotor ditahan	58
Tabel L-4.1.	Kapasitansi kapasitor pengujian generator induksi beroperasi sendiri pada beberapa keadaan beban	65
Tabel L-4.2.	Pendekatan kapasitansi kapasitor pengujian generator induksi beroperasi sendiri pada beberapa keadaan beban	65
Tabel L-6.1.	Data kapasitor yang digunakan dalam pengujian	68

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Bagian-bagian mesin induksi sangkar tupai	6
Gambar 2.2.	Laminasi stator	6
Gambar 2.3.	Laminasi-laminasi stator disatukan menjadi inti stator	7
Gambar 2.4.	Stator mesin induksi	7
Gambar 2.5.	Rotor belitan mesin induksi	7
Gambar 2.6.	(a) Rotor sangkar mesin induksi (b) Struktur rotor sangkar tupai setelah laminasi rotor dihilangkan secara kimia.	8
Gambar 2.7.	Kurva torsi-kecepatan mesin induksi tiga fasa secara lengkap	10
Gambar 2.8.	Generator induksi yang terhubung dengan jaringan fasa tiga	11
Gambar 2.9.	Diagram hubungan generator induksi dengan jaringan fasa tiga	12
Gambar 2.10.	Rangkaian ekivalen mesin induksi dengan rangkaian magnetisasi dalam hubungan seri	12
Gambar 2.11.	Kurva resistansi ekivalen dan reaktansi ekivalen terhadap slip	13
Gambar 2.12.	Generator induksi beroperasi sendiri	15
Gambar 2.13.	Rangkaian ekivalen generator induksi beroperasi sendiri	15
Gambar 2.14.	Penentuan titik operasi generator induksi	16
Gambar 2.15.	Rangkaian ekivalen mesin induksi	17
Gambar 2.16.	Rangkaian ekivalen mesin induksi fasa tiga	18
Gambar 2.17.	Rangkaian pengukuran resistansi stator	18
Gambar 2.18.	Rangkaian ekivalen pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi tanpa beban	19
Gambar 2.19.	Rangkaian ekivalen pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi rotor ditahan	20
Gambar 4.1.	PLTM Check Dam V Kali Jari	26

Gambar 4.2.	Gambar denah ruangan PLTM Check Dam V Kali Jari beserta peralatan di dalamnya tampak samping	26
Gambar 4.3.	Gambar denah ruangan PLTM Check Dam V Kali Jari beserta peralatan di dalamnya tampak atas	27
Gambar 4.4.	Diagram alir perancangan penempatan generator induksi 22 kW dan 3 kW pada PLTM Check Dam V Kali Jari	29
Gambar 4.5.	Gambar rancangan casis generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari	30
Gambar 4.6.	Gambar rancangan casis generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari tampak atas serta ukurannya	30
Gambar 4.7.	Gambar rancangan casis generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari tampak samping serta ukurannya	31
Gambar 5.1.	Diagram alir perhitungan kapasitansi kapasitor	33
Gambar 5.2.	Diagram alir pengoperasian generator induksi beroperasi sendiri pada PLTM Check Dam V Kali Jari	34
Gambar 5.3.	Diagram alir pengoperasian kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron pada PLTM Check Dam V Kali Jari	37
Gambar 6.1.	Diagram alir pemasangan generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari	39
Gambar 6.2.	Pemasangan mesin induksi 22 kW sebagai generator beroperasi sendiri pada PLTM Check Dam V Kali Jari	40
Gambar 6.3.	Pemasangan mesin induksi 3 kW sebagai persiapan kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron 15 kVA pada PLTM Check Dam V Kali Jari	40
Gambar 7.1.	Pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri pada keadaan tanpa beban	43
Gambar 7.2.	Pengujian pengoperasian mesin induksi sebagai generator induksi beroperasi sendiri pada keadaan berbeban	43

Gambar 7.3.	Pengujian mesin induksi sebagai generator induksi yang dioperasikan secara paralel dengan generator sinkron	49
Gambar L-2.1.	Gambar transmisi mekanik sabuk dan puli	59
Gambar L-7.1.	Casis generator induksi	69
Gambar L-7.2.	Pemasangan generator induksi pada casis	69
Gambar L-7.3.	Penempatan generador induksi 22 kW dan 3 kW pada PLTM Check Dam V Kali Jari	69
Gambar L-7.4.	Kapasitor eksitasi generator induksi	70
Gambar L-7.5.	Beban resistif berupa elemen listrik	70
Gambar L-7.6.	Pengukuran frekuensi dan tegangan	70
Gambar L-7.7.	Pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri	71
Gambar L-7.8.	Pengujian pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron 15 kVA	71



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul	Halaman
Lampiran 1.	Parameter mesin induksi 22 kW dan 3 kW	57
Lampiran 2.	Perhitungan kekuatan bahan casis generator induksi	59
Lampiran 3.	Penentuan ukuran puli	61
Lampiran 4.	Perhitungan kapasitansi kapasitor eksitasi	63
Lampiran 5.	Perhitungan penambahan kapasitor	67
Lampiran 6.	Data kapasitor yang digunakan dalam pengujian	68
Lampiran 7.	Foto obyek pengujian	69

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



ABSTRAK

WIDDY YUANTO, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Februari 2007, **Perancangan Generator Induksi untuk PLTM Check Dam V Kali Jari, Kabupaten Blitar**, Dosen Pembimbing: Prof. Ir. Budiono Mismail, M.S.E.E, Ph.D dan Ir. Hari Santoso, MS.

PLTM Check Dam V Kali Jari merupakan laboratorium lapangan Fakultas Teknik Brawijaya yang digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat dusun Jari. Generator sinkron 15 kVA yang digunakan di PLTM Check Dam V Kali Jari sekarang tidak mampu lagi memenuhi kebutuhan daya konsumen yang mengalami perkembangan. Karena PLTM tersebut masih memiliki potensi air yang dapat dibangkitkan, maka diperlukan adanya penambahan kapasitas daya pada pembangkit tersebut.

Pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri (*self excited*) dapat digunakan untuk alternatif pengganti generator sinkron yang ada dan menjadi salah satu pilihan penambahan kapasitas daya pada PLTM Check Dam V Kali Jari. Pengoperasian kerja paralel antara generator induksi 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA juga merupakan pilihan lain untuk menambah kapasitas daya PLTM Check Dam V Kali Jari.

Untuk mengoptimalkan fungsi PLTM Check Dam V Kali Jari sebagai laboratorium lapangan, maka kedua pilihan tersebut dilaksanakan dan dioperasikan ditempat yang sama pada PLTM Check Dam V Kali Jari. Dibutuhkan penempatan yang efektif untuk masing-masing generator induksi agar kedua pilihan dapat dioperasikan tanpa mengganggu operasi yang sudah berjalan pada PLTM Check Dam V Kali Jari. Sebelum dilakukan pengujian, terlebih dulu dilakukan perencanaan pengoperasian untuk kedua pilihan tersebut. Pada perencanaan pengoperasian, tegangan yang dibangkitkan dan frekuensi disesuaikan dengan SPLN 1 : 1995 untuk sistem jaringan tegangan rendah.

Pada pengujian yang dilakukan belum didapatkan hasil yang maksimum. Pengujian untuk kedua operasi dihentikan pada tahap beban resistif sebesar 2100 watt per fasa karena debit air pada saat pengujian kurang. Pengoperasian generator induksi 22 kW beroperasi sendiri pada tahap beban resistif 1400 watt per fasa, mampu membangkitkan tegangan 210 volt pada frekuensi 49,5 Hz dengan kapasitor sebesar 312,25 μF dan kecepatan putaran rotor generator induksi sebesar 1410 rpm. Pada tahap beban resistif 1400 watt per fasa arus generator induksi sebesar 18,4 A dan pada tahap beban 2100 watt per fasa, arus pada generator induksi sebesar 19,7 A. Pada tahap beban tersebut arus generator induksi masih dibawah arus nominalnya yakni 38 A. Dengan demikian, pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator menjadi pilihan penambahan daya pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

PLTM Check Dam V Kali Jari yang dibangun di desa Gadungan, kecamatan Gandusari, kabupaten Blitar merupakan Laboratorium Lapangan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. PLTM Check Dam V Kali Jari memiliki kapasitas pembangkit sebesar 15 kVA dengan menggunakan generator sinkron. PLTM tersebut digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik masyarakat dusun Jari. Saat ini kebutuhan energi listrik masyarakat dusun Kali Jari tersebut mengalami perkembangan. Dengan kapasitas yang ada, PLTM Check Dam V Kali Jari tidak mampu lagi memenuhi perkembangan kebutuhan beban listrik tersebut. Mengacu pada penelitian yang telah dilakukan Tomas Handrian, didapatkan bahwa PLTM Check Dam V Kali Jari masih memiliki potensi daya yang dapat dibangkitkan sebesar 22,5821 kW (Handrian, 2005: 26). Dengan demikian dapat dilakukan peningkatan kapasitas daya pada pembangkit.

Selain itu dalam perkembangan terakhir didapatkan bahwa jaringan PLN sudah dapat menjangkau masyarakat dusun Jari. Jika jaringan PLN dapat direncanakan masuk ke PLTM, maka PLTM Check Dam V Kali Jari dapat menjual energinya pada PLN pada siang hari. Namun mengingat generator yang ada di PLTM merupakan generator sinkron, maka untuk menghubungkan jaringan PLN dengan PLTM dibutuhkan biaya yang mahal karena dibutuhkan adanya sinkroniser. Oleh karena itu untuk mempersiapkan kemungkinan tersebut, direncanakan adanya generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari. Dengan adanya generator induksi, maka diharapkan pada perkembangan berikutnya koneksi dengan jaringan PLN lebih mudah dilakukan dan biaya yang dikeluarkanpun lebih murah jika dibandingkan dengan pengadaan sebuah sinkroniser.

Penggantian generator sinkron 15 kVA dengan mesin induksi 22 kW yang dioperasikan sebagai generator induksi beroperasi sendiri menjadi salah satu pilihan untuk mempersiapkan kemungkinan koneksi PLTM dengan jaringan PLN sekaligus untuk menambah kapasitas daya. Pengoperasian generator induksi dengan generator sinkron juga merupakan pilihan lain untuk menambah kapasitas daya pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

Untuk mengoptimalkan fungsi PLTM Check Dam V Kali Jari sebagai laboratorium lapangan, maka kedua pilihan tersebut akan dilaksanakan dan dipasang

ditempat yang sama di PLTM Check Dam V Kali Jari. Oleh karena itu dibutuhkan perancangan penempatan generator induksi yang akan digunakan untuk kedua operasi tersebut agar tidak mengganggu operasi yang sudah berjalan di PLTM Check Dam V Kali Jari.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah:

1. Bagaimana penempatan dua buah generator induksi fasa tiga rotor sangkar 22 kW dan 3 kW di PLTM Check Dam V Kali Jari.
2. Bagaimana pengoperasian mesin induksi fasa tiga 22 kW rotor sangkar menjadi generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari.
3. Bagaimana pengoperasian kerja paralel generator induksi fasa tiga rotor sangkar 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

1.3. Batasan Masalah

Pembahasan skripsi ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut:

1. Mesin induksi tiga fasa yang dioperasikan sebagai generator beroperasi sendiri, mempunyai daya 22 kW; 220/380 V; 1485 rpm; 50 Hz; 38 A; faktor daya 0,86; hubungan Δ/Y .
2. Mesin induksi yang dioperasikan sebagai generator induksi untuk operasi paralel dengan generator sinkron, mempunyai daya 3 kW; 380/220 V; 1410 rpm; 50 Hz; 12/7 A; faktor daya 0,83; hubungan Δ/Y .
3. Percobaan dilakukan di Laboratorium Mesin Listrik Fakultas Teknik Jurusan Teknik Elektro Universitas Brawijaya dengan cara simulasi dan diuji di Laboratorium Lapangan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya PLTM Check Dam V Kali Jari Kabupaten Blitar.
4. Beban pengujian berupa elemen setrika listrik yang merupakan beban resistif.
5. Kapasitor dan alat ukur yang digunakan dalam pengujian adalah kapasitor dan alat ukur yang telah tersedia di Laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

1.4. Tujuan

Tujuan pembahasan dalam skripsi ini adalah merancang pengoperasian mesin induksi fasa tiga 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri di PLTM Check

Dam V Kali Jari dan pengoperasian kerja paralel generator induksi 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA untuk menambah kapasitas daya PLTM Check Dam V Kali Jari.

1.5. Sistematika Pembahasan

BAB I : Pendahuluan

Memuat latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika pembahasan.

BAB II : Generator induksi beroperasi sendiri

Membahas tentang konstruksi mesin induksi, konsep dasar mesin induksi, mesin induksi sebagai generator induksi yang terhubung dengan jaringan, mesin induksi sebagai generator induksi beroperasi sendiri serta kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron.

BAB III : Metodologi penelitian

Membahas tentang metodologi yang dilakukan dalam rangka pencapaian tujuan penulisan skripsi.

BAB IV : Perancangan penempatan generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

Membahas tentang data teknis PLTM Check Dam V Kali Jari meliputi generator, turbin, serta denah ruang dan perencanaan penempatan generator induksi.

BAB IV : Perencanaan pengoperasian generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

Membahas tentang perencanaan pengoperasian mesin induksi sebagai generator induksi beroperasi sendiri dan perencanaan pengoperasian kerja paralel generator induksi dan generator sinkron.

BAB IV : Pemasangan generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

Membahas tentang realisasi perencanaan penempatan generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari

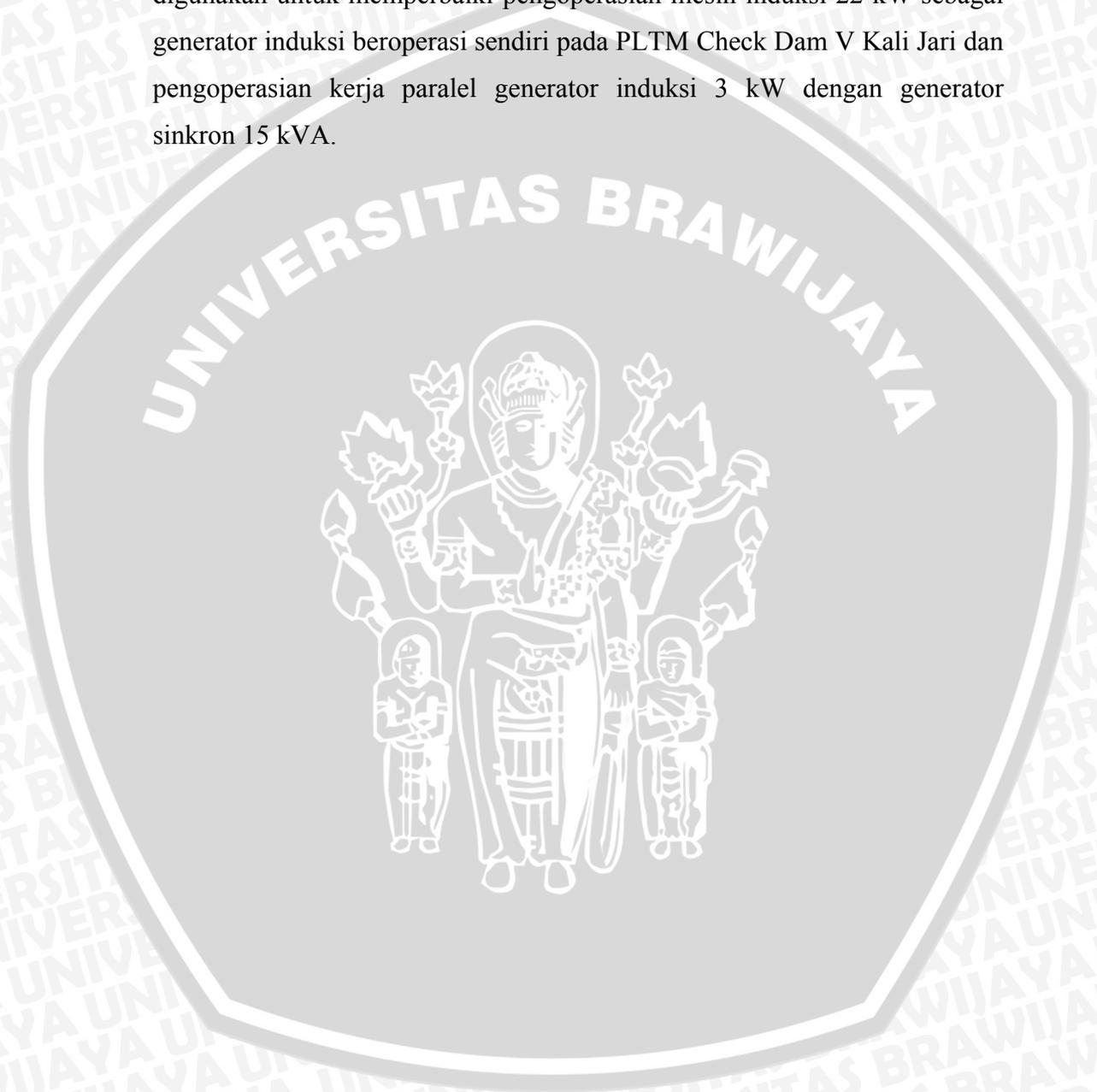
BAB V : Pengujian alat dan analisis data

Membahas tentang pengujian serta analisis pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri dan pengoperasian kerja paralel generator induksi 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA pada

PLTM Check Dam V Kali Jari. Membahas pula tentang hasil penempatan generator induksi

BAB VII: Penutup

Penutup memuat kesimpulan dari keseluruhan isi skripsi yang menjawab mengenai rumusan masalah. Selain itu juga memuat saran yang dapat digunakan untuk memperbaiki pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri pada PLTM Check Dam V Kali Jari dan pengoperasian kerja paralel generator induksi 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA.



BAB II

GENERATOR INDUKSI

2.1. Umum

Mesin induksi ditemukan oleh Galileo Ferraris pada tahun 1885 dan Nicola Tesla pada tahun 1886 (Boldea and Nasar, 2001: 2). Mesin induksi terdiri atas stator dan rotor, yang dipisahkan oleh celah udara (Nasar and Unnewehr, 1983: 226). Pada penemuan Ferraris dan Tesla mesin induksi berupa motor dengan belitan fasa dua yang terpusat pada inti stator feromagnetik yang dicatu oleh sumber tegangan arus bolak-balik fasa dua. Pada paten Ferraris, bagian rotor terbuat dari tembaga berbentuk silinder. Sedangkan pada paten Tesla, bagian rotor terbuat dari feromagnetik berbentuk silinder, dilengkapi dengan belitan yang dihubungkan singkat (Boldea and Nasar, 2001: 3).

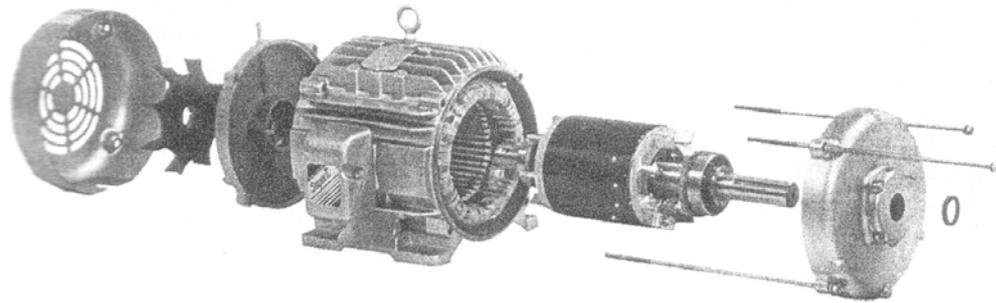
Mesin induksi pada dasarnya merupakan mesin arus bolak-balik. Arus bolak-balik dialirkan ke belitan stator secara langsung dan ke belitan rotor secara induksi dari stator (Bala, 1994: 263).

Mesin induksi dapat dioperasikan sebagai generator maupun sebagai motor. Mesin induksi akan bekerja jika dihubungkan pada sumber tegangan bolak-balik tiga fasa dengan frekuensi yang konstan. Biasanya mesin induksi bekerja sebagai motor pada kecepatan sedikit lebih rendah dari kecepatan sinkron. Namun, jika mesin induksi dihubungkan dengan sumber tegangan fasa tiga dan diputar menggunakan penggerak pada kecepatan lebih tinggi dari kecepatan sinkron, maka mesin induksi akan bekerja sebagai generator induksi (Slemon, 1992: 105).

Generator induksi dapat digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin dan pembangkit listrik tenaga mikrohidro skala kecil (Boldea and Nasar, 2001: 5).

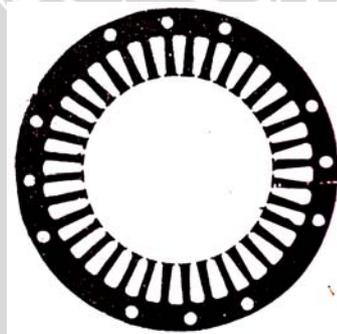
2.2. Konstruksi Mesin Induksi

Mesin induksi mempunyai dua bagian utama, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian mesin induksi yang diam dan rotor merupakan bagian mesin induksi yang berputar. Stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara (Wildi, 2002: 263). Bagian-bagian mesin induksi dapat dilihat pada Gambar 2.1. Gambar 2.1 memperlihatkan bagian stator, rotor, kipas pendingin, kotak terminal, bantalan, dan bagian lain. Kipas pada mesin induksi berfungsi untuk menghembuskan udara pada rangka stator sebagai sistem pendingin pada mesin induksi (Wildi, 2002: 264).



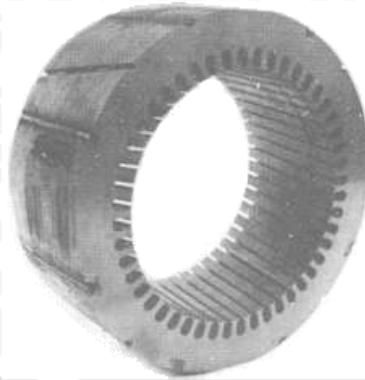
Gambar 2.1. Bagian-bagian mesin induksi sangkar tupai
Sumber: Wildi, 2002: 264

Inti stator terdiri dari beberapa laminasi yang membentuk struktur silinder (Sawhney, 1990: 594). Laminasi merupakan lapisan baja listrik (Kadir, 1983: 299) atau pelat tipis yang sama bentuknya terbuat dari bahan feromagnetik (Wasito, 1996: 349). Gambar 2.2 memperlihatkan laminasi stator. Bagian tengah laminasi dimanfaatkan untuk laminasi rotor, agar tidak terbuang. (Sawhney, 1990: 594). Pada lingkaran dalam laminasi stator dibentuk alur-alur sebagai tempat belitan stator (Wildi, 2002: 263). Laminasi-laminasi disatukan menjadi inti stator dengan cara dilas pada bagian tertentu di permukaan luar dan dilapisi pernis sebagai isolasi. Bentuk inti stator dari laminasi yang telah disatukan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3

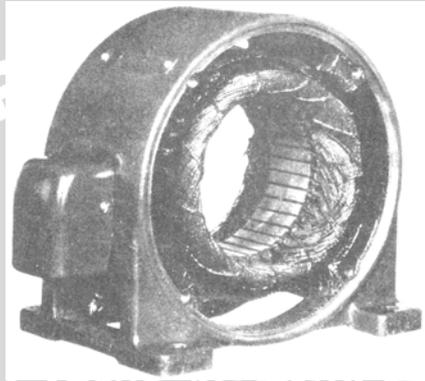


Gambar 2.2. Laminasi stator
Sumber: Sawhney, 1990: 594

Pada beberapa konstruksi, setelah belitan stator terpasang, inti stator beserta belitan dimasukkan ke rumah stator (Siskind, 1959: 348). Isolasi pada kawat dapat menggunakan bahan seperti lak, asbes, atau kertas. Isolasi pada alur biasanya menggunakan kertas yang agak kuat (Kadir, 1983: 309). Stator dapat dilihat pada Gambar 2.4.



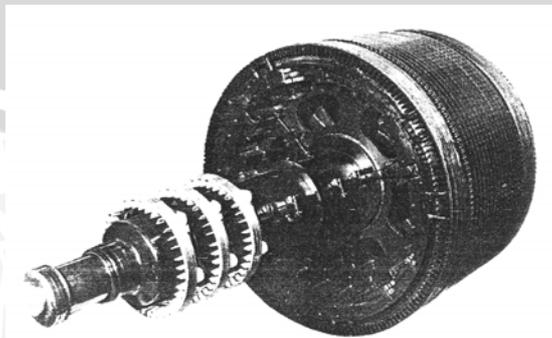
Gambar 2.3. Laminasi-laminasi stator disatukan menjadi inti stator
Sumber: Kadir, 1983: 304



Gambar 2.4. Stator mesin induksi
Sumber: Siskind, 1959: 349

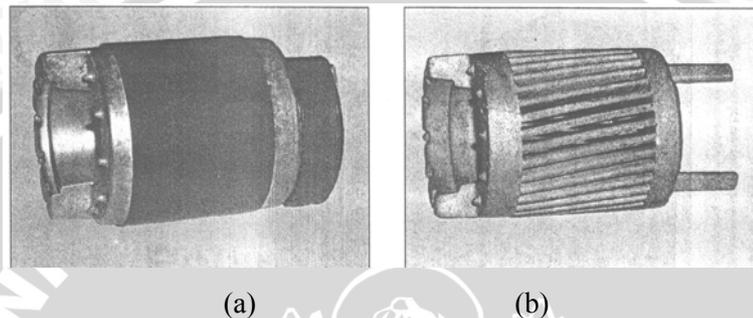
Terdapat dua tipe rotor mesin induksi yang ditempatkan di dalam stator, yakni rotor sangkar tupai atau secara sederhana disebut rotor sangkar dan rotor belitan (Chapman, 2002: 288).

Rotor belitan mempunyai lilitan fasa tiga yang serupa dengan belitan stator. Belitan terdistribusi pada alur dan pada umumnya dihubung bintang (Wildi, 2002: 264). Terminal belitan rotor dihubungkan pada *slip ring* yang dipasang pada poros rotor. (Bala, 1994: 262). Gambar rotor belitan dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Rotor belitan mesin induksi
Sumber: Chapman, 2002: 383

Rotor sangkar terdiri atas batang-batang yang biasanya terbuat dari tembaga. Batang-batang tersebut dihubungkan singkat pada tiap ujungnya dengan gelang penghantar. Dengan demikian dua batang yang bertetangga dapat dinyatakan sebagai lilitan. Pada batang tersebut diinduksikan gaya gerak listrik, yang menyebabkan arus induksi mengalir. Batang-batang rotor dan gelang berbentuk silinder menyerupai sangkar tupai, sehingga dinamakan rotor sangkar tupai (Kadir, 1983: 63). Gambar rotor sangkar dapat dilihat pada Gambar 2.6.a dan 2.6.b.



Gambar 2.6. (a) Rotor sangkar mesin induksi. (b) Struktur rotor sangkar tupai setelah laminasi rotor dihilangkan secara kimia.
Sumber: Fitzgerald et.al, 2003: 308

2.3 Konsep Dasar Mesin Induksi

2.3.1 Medan magnet putar

Pada mesin induksi fasa tiga, lilitan dari masing-masing fasa terpisah satu sama lain sebesar 120° . Tiap fasa dicatu arus bolak-balik yang magnitudnya berubah-ubah secara sinusoida menurut waktu (Fitzgerald, et.al, 1997: 153). Tiap belitan yang dialiri arus akan menghasilkan gaya gerak magnetik (Slemon, 1992: 171). Gaya gerak magnetik (ggm) keseluruhan merupakan jumlah dari ketiga ggm pada masing-masing belitan dan merupakan fungsi tempat dan waktu (Kadir, 1981: 5).

$$F(\theta, t) = \frac{3}{2} F_m \cos(\theta - \omega t) \quad (2.1)$$

dengan : $F(\theta, t)$ = gaya gerak magnetik total sebagai fungsi ruang dan waktu
 F_m = nilai maksimum gaya gerak magnetik
 θ = sudut listrik yang diukur terhadap sumbu magnet dari lilitan
 ω = kecepatan sudut listrik
 t = waktu

Besar kecepatan sudut ggm yang merupakan gelombang berjalan ω_s adalah (Fitzgerald, et.al, 2003: 206)

$$\omega_s = \frac{2}{p} \omega \text{ rad/s} \quad (2.2)$$

Kecepatan sudut pada Persamaan (2.2) ditentukan oleh frekuensi dari sumber tegangan listrik. Pada mesin induksi kutub p , perubahan arus dalam satu daur akan membuat gelombang ggm berputar dalam $2/p$ daur. Putaran per menit (rpm) medan magnet putar pada mesin kutub p untuk frekuensi f (putaran per detik) disebut dengan kecepatan sinkron (Sen, 1989: 225). Kecepatan sinkron dapat dinyatakan sebagai n_s dengan f merupakan frekuensi dalam Hz dari sumber tegangan listrik (Cathey, 2001: 328)

$$n_s = \frac{60}{2\pi} \omega_s = \frac{60}{2\pi} \left(\frac{2}{p} \right) 2\pi f = \frac{120f}{p} \text{ r/min} \quad (2.3)$$

2.3.2 Tegangan terinduksi pada mesin induksi

Menurut Faraday medan magnet putar akan menginduksikan tegangan antara kedua ujung lilitan tiap fasa. Nilai rms tegangan induksi terinduksi adalah (Fitzgerald, 1997: 162)

$$E_{rms} = 4,44 f k_w N_{ph} \Phi \quad (2.4)$$

dengan : f = frekuensi

k_w = faktor lilitan (untuk lilitan fasa tiga, besarnya k_w sekitar 0,85 sampai dengan 0,95)

N_{ph} = jumlah dari lilitan seri tiap fasa

Φ = fluks celah udara

2.3.3 Prinsip kerja mesin induksi

Pada saat sumber tegangan arus bolak-balik seimbang dihubungkan pada stator mesin induksi, timbul medan magnet putar. Medan magnet putar yang menginduksi rotor akan menimbulkan tegangan induksi pada rotor. Jika belitan rotor dihubungkan singkat, maka akan mengalir arus pada rotor. Arus pada rotor akan berinteraksi dengan medan yang dihasilkan stator dan menyebabkan timbulnya torsi (Sawhney, 1990: 594).

Kecepatan rotor n_r tidak sama dengan kecepatan sinkron n_s . Perbedaan kecepatan tersebut ditentukan sebagai slip s (Bala, 1994: 263)

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.5)$$

Untuk mesin induksi dengan kutub p , frekuensi rotor f_r tergantung pada kecepatan rotor (Chatey, 2001: 330)

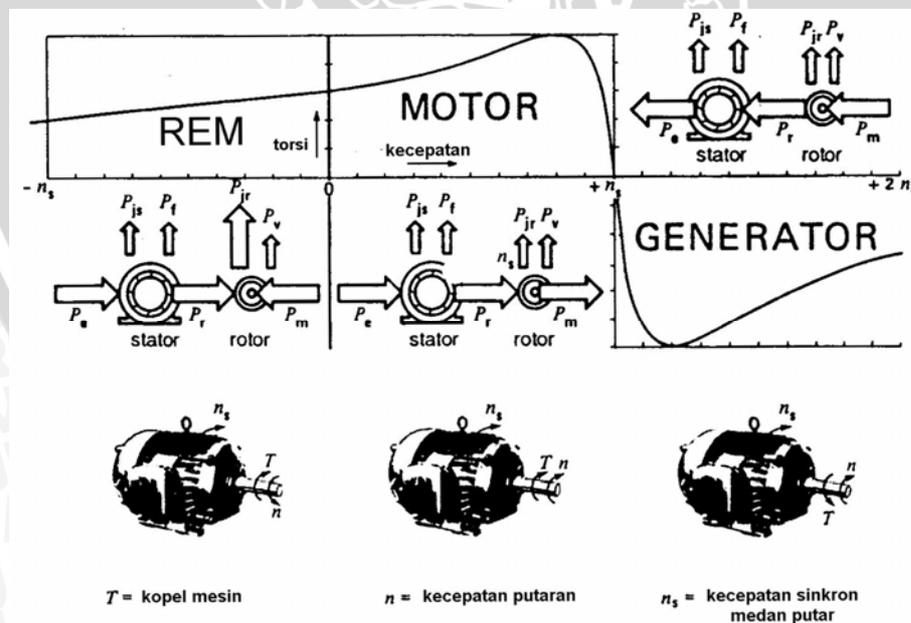
$$\omega_r = \frac{p}{2} (s \omega_s) = s \left(\frac{p}{2} \omega_s \right) = s \omega \quad (2.6)$$

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{s \omega}{2\pi} = s f \quad (2.7)$$

2.4 Mesin Induksi Sebagai Generator

Gambar 2.7 memperlihatkan kurva torsi sebagai fungsi dari kecepatan serta diagram aliran daya. Dari kurva torsi-kecepatan dapat diketahui tiga cara bekerja dari mesin induksi yakni mesin induksi sebagai motor, generator dan rem.

Pada saat putaran rotor searah dengan putaran medan putar, mesin induksi bekerja pada dua mode, motor dan generator. Namun, agar mesin induksi bekerja pada mode generator, putaran rotor harus melebihi kecepatan sinkron (Wildi, 2002: 314). Jadi menurut Persamaan (2.5) pada saat slip bernilai negatif, mesin induksi bekerja sebagai generator (Nasar, 1995: 182).



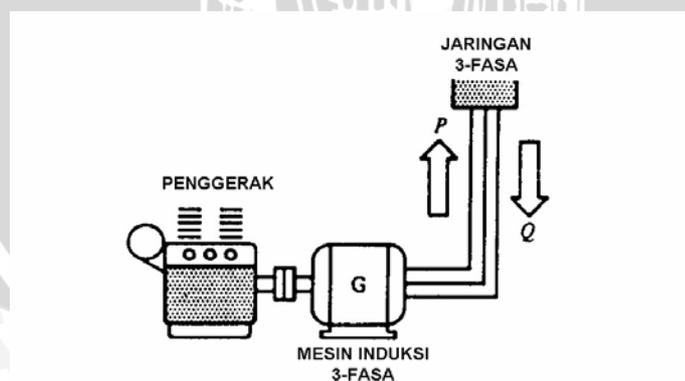
Gambar 2.7. Kurva torsi-kecepatan mesin induksi tiga fasa secara lengkap
 Sumber: Wildi, 2002: 314

Generator induksi mengirimkan daya aktif P ke sistem listrik yang terhubung dan membutuhkan daya reaktif Q untuk menghasilkan medan magnet putar. Pada generator induksi yang terhubung dengan jaringan listrik fasa tiga, daya reaktif didapatkan dari jaringan. Sedangkan pada generator induksi yang beroperasi sendiri, daya reaktif didapatkan dari kapasitor yang dihubungkan dengan terminal generator induksi (Wildi, 2002: 312)

2.4.1 Generator induksi yang terhubung dengan jaringan

Medan magnet putar dihasilkan arus magnetisasi yang disuplai ke stator dari sumber fasa tiga. Pada Gambar 2.8 dan 2.9 memperlihatkan bahwa generator induksi dikopel secara mekanik dengan suatu penggerak dan beroperasi secara paralel dengan sumber fasa tiga. Saat stator sudah tereksitasi, medan magnet akan timbul dan rotor mulai berputar seperti motor induksi saat daya elektrik mulai mengalir dari sumber. Penggerak kemudian memutar rotor dengan arah yang sama dengan medan putar. Saat kecepatan putaran rotor melebihi kecepatan sinkron, aliran daya berbalik arah. Daya mulai mengalir ke jaringan dan mesin induksi mulai beroperasi sebagai generator (Nasar, 1995: 182).

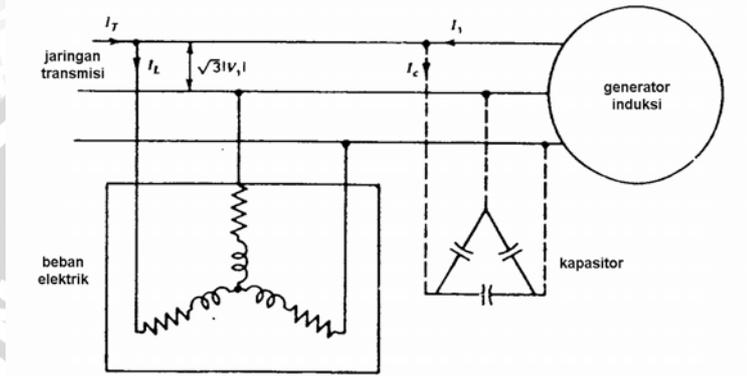
Pada generator yang dioperasikan paralel dengan sumber fasa tiga, daya reaktif Q mengalir berlawanan arah dengan daya aktif P seperti yang dapat dilihat pada Gambar 2.8. Daya aktif yang dikirimkan ke jaringan sebanding dengan slip pada saat kecepatan rotor lebih besar daripada kecepatan sinkron. Namun daya keluaran tersebut tercapai pada slip yang kecil, yakni kurang dari 3% (Wildi, 2002: 313).



Gambar 2.8. Generator induksi yang terhubung dengan jaringan fasa tiga
Sumber: Wildi, 2002: 312

Pada Gambar 2.8 tersebut penggerak generator induksi dapat berupa turbin air dan sistem jaringan diasumsikan *stiff* (tegangan dan frekuensi konstan).

Agar didapatkan persamaan arus generator induksi yang terhubung dengan jaringan, maka generator induksi yang dihubungkan dengan jaringan dapat pula digambarkan seperti pada Gambar 2.9. Pada beberapa jaringan yang memiliki faktor daya rendah dapat dipasang pula kapasitor sebagai sumber daya reaktif bagi generator induksi. Dengan demikian hubungan kapasitor pada Gambar 2.9 di gambarkan dengan garis hubungan titik.



Gambar 2.9. Diagram hubungan generator induksi dengan jaringan fasa tiga.
Sumber: Mc. Person, 1981: 303

Generator induksi yang terhubung dengan jaringan tanpa penambahan kapasitor, mendapatkan daya reaktif dari jaringan. Persamaan arus untuk hubungan tersebut adalah:

$$I_L = I_1 + I_T \quad (2.8)$$

dengan: I_L = arus yang mengalir pada beban

I_T = arus jaringan transmisi

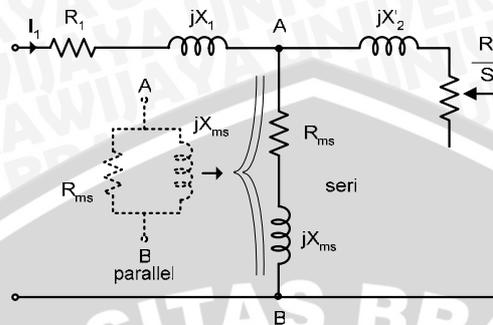
I_1 = arus generator induksi

Namun untuk meningkatkan faktor daya pada jaringan dapat ditambahkan kapasitor. Dengan demikian Persamaan 2.8 menjadi: (Boldea and Nasar, 2001: 179)

$$I_L = I_1 - I_C + I_T \quad (2.9)$$

dengan: I_C = arus yang mengalir pada kapasitor

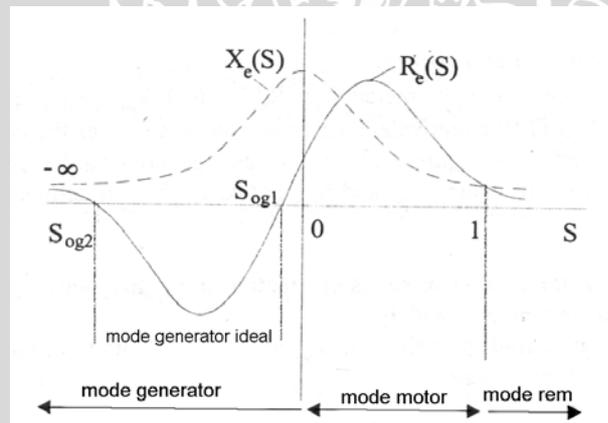
Untuk mengetahui penampilan generator induksi saat terhubung dengan jaringan, dapat dilakukan analisa melalui rangkaian ekivalen mesin induksi. Rangkaian cabang magnetisasi dirubah terlebih dahulu dalam hubungan seri seperti pada Gambar 2.10 agar mempermudah proses perhitungan



Gambar 2.10. Rangkaian ekivalen mesin induksi dengan rangkaian magnetisasi dalam hubungan seri

Sumber: Boldea, 2001: 181

Dari rangkaian ekivalen didapatkan nilai resistansi ekivalen R_e dan reaktansi ekivalen X_e dengan nilai yang bervariasi terhadap slip.



Keterangan:

s_{0g1} = batas nilai negatif minimum slip, saat mesin induksi mengirimkan daya aktif ke jaringan

s_{0g2} = batas nilai negatif maksimum slip, saat mesin induksi mengirimkan daya aktif ke jaringan

Gambar 2.11. Kurva resistansi ekivalen dan reaktansi ekivalen terhadap slip.

Sumber: Boldea, 2001: 179

Pada Gambar 2.11 dapat dilihat bahwa pada saat nilai slip s lebih besar daripada s_{0g2} dan lebih kecil daripada s_{0g1} ($s_{0g2} < s < s_{0g1}$) resistansi ekivalen bernilai negatif yang berarti bahwa mesin induksi mengalirkan daya aktif ke jaringan dan beroperasi sebagai generator.

Nilai s_{0g1} dan s_{0g2} didapatkan pada saat nilai reaktansi ekivalen terhadap slip sama dengan nol $R_e(s_{0g}) = 0$: (Boldea, 2001: 181)

$$\begin{aligned} (R_{ms} + R_1) \left(\frac{R'_2}{s_{0g}} \right)^2 + \frac{R'_2}{s_{0g}} (R_{ms}^2 + X_{ms}^2 + 2R_{ms}R_s) + \\ + R_{ms}^2 X'_2 + R_{ms}^2 R_s + R_s (X_{ms} + X'_2)^2 = 0 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Pada generator induksi yang dioperasikan terhubung dengan jaringan, masukan daya mekanik generator induksi P_m adalah (Wildi, 2002: 330)

$$P_m = P_r + P_{jr} \quad (2.11)$$

dengan: P_r = daya aktif yang dikirim ke rotor

P_{jr} = rugi daya tahanan belitan rotor

Daya aktif yang dikirimkan generator induksi ke jaringan P_e adalah (Wildi, 2002: 330)

$$P_e = P_r - P_{js} - P_f - P_v \quad (2.12)$$

dengan: P_{js} = rugi daya tahanan belitan stator

P_f = rugi mekanik

P_v = rugi daya inti besi pada stator

Daya reaktif yang dibutuhkan generator induksi dari jaringan Q merupakan jumlah daya reaktif yang dibutuhkan reaktansi bocor Q_1 dan daya reaktif yang dibutuhkan reaktansi magnetisasi Q_2 (Wildi, 2002: 331)

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (2.13)$$

$$Q = I_2^2 X + \frac{V^2}{X_m} \quad (2.14)$$

dengan: X = reaktansi bocor ($X_l + X'_2$)

X_m = reaktansi magnetik

V = tegangan terminal generator

Daya pada terminal generator S adalah (Wildi, 2002: 331)

$$S = \sqrt{P_e^2 + Q^2} \quad (2.15)$$

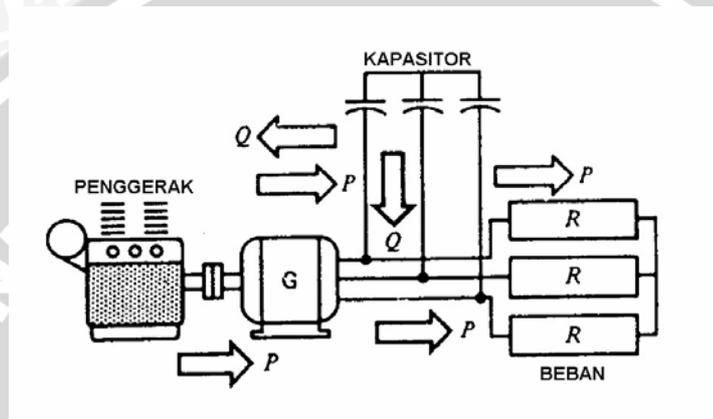
Faktor daya pada terminal generator (Wildi, 2002: 331)

$$\cos \theta = \frac{P_e}{S} \quad (2.16)$$

Efisiensi generator induksi (Wildi, 2002: 331)

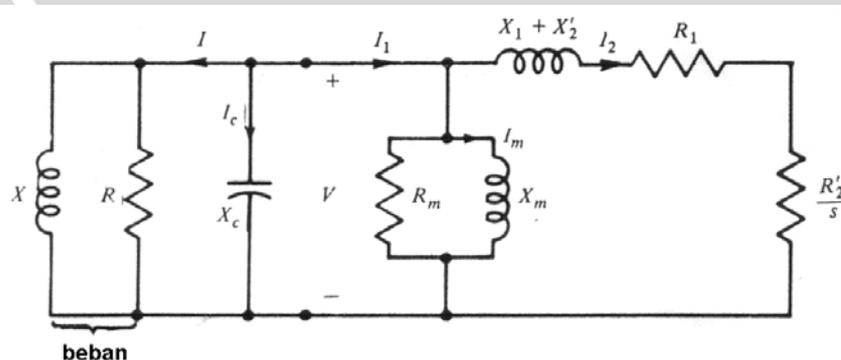
$$\eta = \frac{P_e}{P_m} = \frac{P_e}{P_r + P_{jr}} = \frac{P_e}{P_e + P_{js} + P_f + P_v} \quad (2.17)$$

2.4.2 Generator induksi beroperasi sendiri



Gambar 2.12. Generator induksi beroperasi sendiri
Sumber: Wildi, 2002: 314

Generator induksi beroperasi sendiri memerlukan kapasitor untuk memenuhi daya reaktif magnetisasi. Tegangan dan frekuensi operasi generator ditentukan oleh kecepatan generator, beban generator serta rating dari kapasitor (Nasar, 1995: 182). Dengan demikian rangkaian ekuivalen generator induksi beroperasi sendiri merupakan rangkaian ekuivalen mesin induksi dengan penambahan kapasitor secara paralel sebagai sumber daya reaktif. Rangkaian ekuivalen generator induksi beroperasi sendiri yang sudah dihubungkan dengan beban dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. Rangkaian ekuivalen generator induksi beroperasi sendiri
Sumber: Nasar, 1995: 183

Pada keadaan beban nol, besarnya arus magnetisasi I_m sama dengan arus yang mengalir pada kapasitor I_c . Arus tersebut masing masing dinyatakan dengan: (Nasar, 1995: 183)

$$I_m = \frac{V_1}{X_m} \quad (2.18)$$

$$I_c = \frac{V_1}{X_c} \quad (2.19)$$

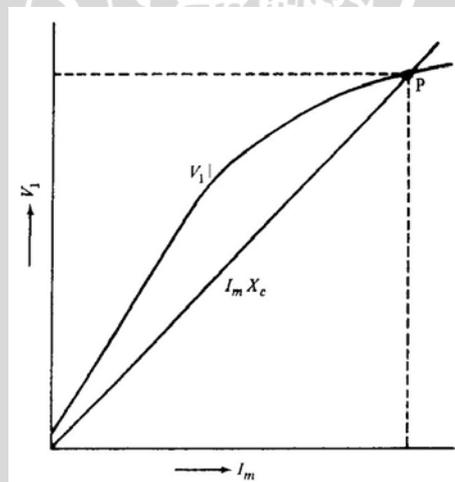
dengan: V_1 = tegangan terminal generator

X_m = reaktansi magnetisasi

X_c = reaktansi kapasitor

Dari Persamaan (2.9) dan Persamaan (2.10) didapatkan $I_m X_m = I_c X_c$, karena $I_m = I_c$ maka $X_m = X_c$.

Karena V_1 merupakan fungsi I_m , maka dalam keadaan operasi yang stabil pada kurva V_1 fungsi I_m , garis $I_c X_c = I_m X_c$ harus berpotongan dengan kurva magnetisasi di titik operasi P seperti pada Gambar 2.14 (Nasar, 1995: 183).



Gambar 2.14. Penentuan titik operasi generator induksi
Sumber: Nasar, 1995: 183

Hubungan antara tegangan terminal generator dengan arus magnetisasi adalah

$$V_1 = I_m X_c \quad (2.20)$$

karena $X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$, maka

$$I_m = 2\pi f C V_1 \quad (2.21)$$

Sehingga frekuensi operasi adalah (Nasar, 1995: 183)

$$f = \frac{I_m}{2\pi CV_1} \quad (2.22)$$

2.4.3 Kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron

Pada suatu pembangkit tenaga listrik yang melayani beban berkembang, memparalelkan dua atau lebih generator merupakan salah satu cara untuk memperbesar kapasitas daya yang dibangkitkan (Zuhal, 1991: 106).

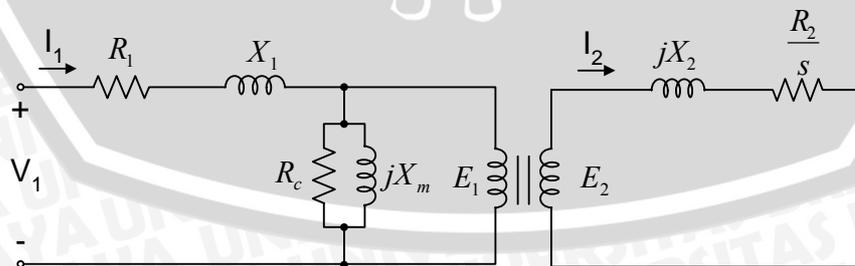
Pada operasi paralel generator sinkron dan generator induksi, kebutuhan arus magnetisasi disuplai dari sistem jaringan generator sinkron (Budiono, Purwanto, 2002: 17).

Pada operasi paralel generator induksi dengan generator sinkron, kecepatan putaran rotor generator induksi dibuat sedikit lebih tinggi dari kecepatan sinkronnya. Dengan demikian, generator induksi akan memberikan daya aktif (daya nyata) ke jaringan yang mengakibatkan beban generator sinkron menjadi berkurang (Santoso, 1992: 13).

2.5 Pengukuran Parameter Mesin Induksi Fasa Tiga

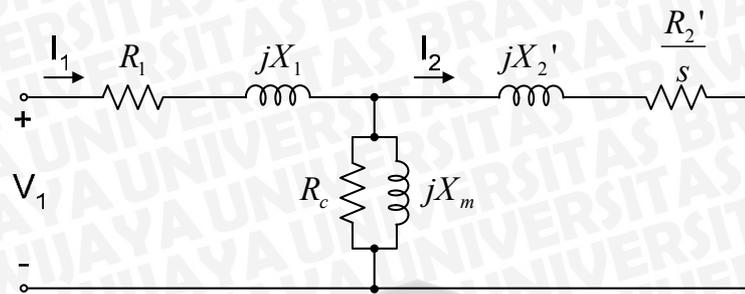
Parameter masing-masing generator induksi beroperasi sendiri diperlukan dalam perhitungan kerja paralel generator induksi (Boldea, 2001: 663)

Kerja mesin induksi seperti juga kerja transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Oleh karena itu dianggap sebagai transformator dengan rangkaian sekunder yang berputar. Dengan demikian rangkaian ekuivalen mesin induksi dapat dilukiskan pada Gambar 2.15 (Zuhal, 1991: 71)



Gambar 2.15. Rangkaian ekuivalen mesin induksi
Sumber: Purnomo: 12

Jika sisi primer sebagai referensi, maka rangkaian ekuivalen menjadi Gambar 2.16 (Purnomo: 12)

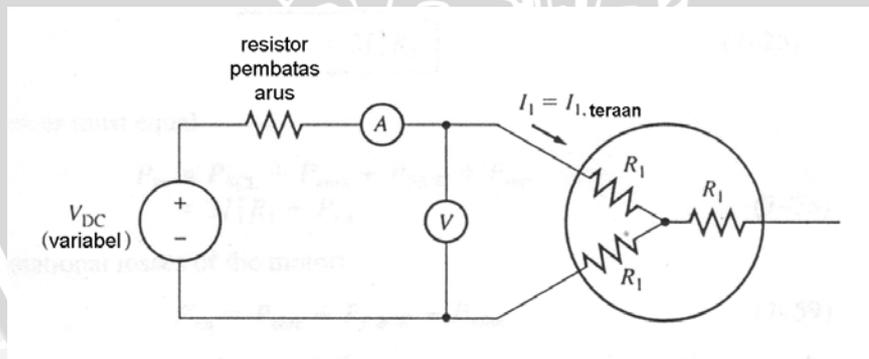


Gambar 2.16. Rangkaian ekivalen mesin induksi fasa tiga
Sumber: Bola, 1994: 263

Parameter mesin induksi dapat dilihat dalam rangkaian ekivalen seperti pada Gambar 2.17. Parameter pada mesin induksi yakni : X_1 , R_1 , X_2' , R_2' dan X_m . Untuk mendapatkan nilai-nilai tersebut, dilakukan pengukuran resistansi stator serta pengukuran parameter mesin induksi pada kondisi tanpa beban dan rotor ditahan

2.5.1 Pengukuran resistansi stator

Pengukuran resistansi stator dilakukan dengan menghubungkan sumber arus searah pada dua terminal belitan stator mesin induksi yang terhubung bintang. Karena arus yang dialirkan merupakan arus searah, maka reaktansi mesin induksi bernilai nol, tidak ada tegangan yang diinduksikan ke rotor dan tidak ada arus yang mengalir pada rotor.



Gambar 2.17. Rangkaian pengukuran resistansi stator
Sumber: Chapman, 2002: 338

Arus yang mengalir pada rotor diatur sama dengan arus teraan mesin induksi dan tegangan pada dua terminal diukur. Pada Gambar 2.17 dapat dilihat bahwa nilai resistansi total adalah

$$R_1 = \frac{V_{DC}}{2I_{DC}} \quad (2.23)$$

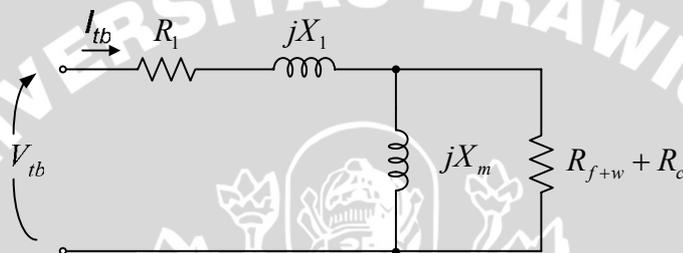
dengan: R_1 = resistansi belitan stator

V_{DC} = sumber tegangan arus searah

I_{DC} = besarnya arus searah yang mengalir

2.5.2 Pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi tanpa beban

Pada pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi tanpa beban, rotor mesin induksi ini dibiarkan berputar bebas tanpa beban mekanik dan terminal stator dicatu sumber tegangan fasa tiga seimbang. Beban yang ada hanya rugi gesek dan angin P_{f+w} , sehingga daya yang dikonversikan hanya digunakan untuk rugi-rugi mekanik. Rangkaian ekivalen pengujian tanpa beban dapat dilihat pada Gambar 2.18 (Chapman,2002: 339).



Gambar 2.18. Rangkaian ekivalen pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi tanpa beban
Sumber: Chapman, 2002: 340

Karena slip pada kondisi tanpa beban s_{tb} sangat kecil, maka resistansi rotor ekivalen R_2/s_{tb} mempunyai nilai yang sangat besar. Sehingga kombinasi hubungan paralel antara rotor dan rangkaian cabang magnetisasi menjadi hubungan paralel antara jX_m dan reaktansi rotor X_2 yang seri dengan resistansi yang memiliki nilai sangat besar, disamping itu nilai reaktansi kombinasi hubungan paralel tersebut hampir sama dengan X_m . Dengan demikian nilai reaktansi yang muncul di terminal stator X_{tb} pada kondisi tanpa beban hampir sama dengan $X_1 + X_m$ (Fitzgerald, et.al, 2003: 331)

$$X_{tb} = X_1 + X_m \quad (2.24)$$

Dalam pengujian tanpa beban ini hubungan terminal stator dihubung bintang, sehingga resistansi per fasa R_{tb} dinyatakan (Bala, 1994: 274):

$$R_{tb} = \frac{P_{tb}}{3I_{tb}^2} \quad (2.25)$$

dengan: P_{tb} = daya masukan pengujian tanpa beban

I_{tb} = arus stator per fasa pengujian tanpa beban

Impedansi per fasa pengujian tanpa beban Z_{tb} dinyatakan (Bala, 1994: 274):

$$Z_{tb} = \frac{V_{tb}}{\sqrt{3}I_{tb}} = R_{tb} + jX_{tb} \quad (2.26)$$

dengan: V_{tb} = tegangan terminal *line-to-line* pengujian tanpa beban

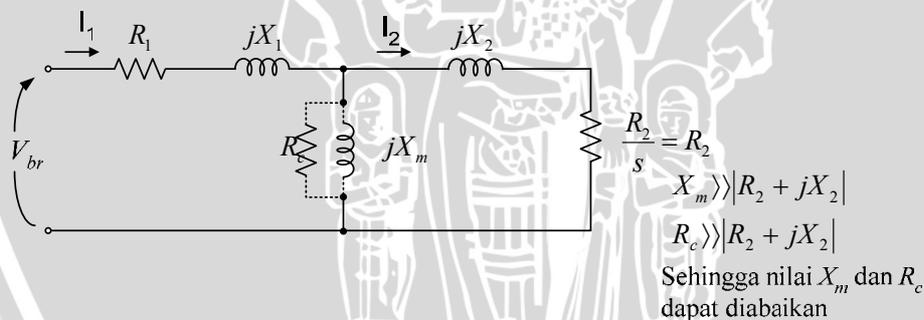
I_{tb} = arus stator per fasa pengujian tanpa beban

Maka reaktansi per fasa pengujian tanpa beban X_{tb} dinyatakan (Bala, 1994: 274):

$$X_{tb} = \sqrt{Z_{tb}^2 - R_{tb}^2} \quad (2.27)$$

2.5.3 Pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi rotor ditahan

Pada pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi rotor ditahan, rotor dijaga tidak berputar sehingga slip $s = 1$, jadi $R_2/s = R_2$ dan mempunyai nilai yang kecil. Rangkaian ekivalen rotor ditahan dapat dilihat pada Gambar 2.19 (Chapman, 2002: 341).



Gambar 2.19. Rangkaian ekivalen pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi rotor ditahan
Sumber: Chapman, 2002: 341

Resistansi rotor ditahan dinyatakan (Bala, 1994: 275):

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{3I_{br}^2} \quad (2.28)$$

dengan: R_{br} = resistansi per fasa pengujian rotor ditahan

P_{br} = daya masukan pengujian rotor ditahan

I_{br} = arus stator per fasa pengujian rotor ditahan

Impedansi per fasa pengujian tanpa beban Z_{tb} dinyatakan (Bala, 1994: 275):

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{\sqrt{3}I_{br}} \quad (2.29)$$

dengan: V_{tb} = tegangan terminal *line-to-line* pengujian rotor ditahan

I_{tb} = arus stator per fasa pengujian rotor ditahan

Maka reaktansi per fasa pengujian rotor ditahan X_{tb} dinyatakan (Bala, 1994: 275):

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^2 - R_{br}^2} \quad (2.30)$$

Nilai resistansi pengujian rotor ditahan ini sama dengan (Bala, 1994: 275):

$$R_{br} = R_1 + R_2 \quad (2.31)$$

Dan reaktansi pengujian rotor ditahan sama dengan (Bala, 1994: 275):

$$X_{br} = X_1 + X_2 \quad (2.32)$$

Dengan persamaan yang didapatkan dari pengujian-pengujian diatas, maka parameter-parameter mesin induksi fasa tiga bisa didapatkan. Namun dibutuhkan nilai X_1 dan X_2 sebagai fungsi X_{br} yang tergantung pada jenis desain mesin induksi seperti ditunjukkan dalam tabel 2.1 (Chapman, 2002: 343).

Tabel 2.1. Aturan pembagian reaktansi rotor dan stator motor induksi

Desain Rotor	X_1 dan X_2 sebagai fungsi X_{br}	
	X_1	X_2
Rotor belitan	0,5 X_{br}	0,5 X_{br}
Rotor sangkar desain kelas A	0,5 X_{br}	0,5 X_{br}
Rotor sangkar desain kelas B	0,4 X_{br}	0,6 X_{br}
Rotor sangkar desain kelas C	0,3 X_{br}	0,7 X_{br}
Rotor sangkar desain kelas D	0,5 X_{br}	0,5 X_{br}

Sumber: Chapman, 2002: 343

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam pembahasan skripsi ini dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

3.1. Studi Literatur

Studi ini bertujuan untuk mempelajari teori-teori yang diperlukan dalam pembahasan mengenai generator induksi beroperasi sendiri serta kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron.

3.2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data bertujuan untuk mendapatkan data-data yang digunakan sebagai dasar penentuan rancangan penempatan generator induksi serta perhitungan perancangan pengoperasian generator induksi.

Pengumpulan data didapatkan dengan cara peninjauan tempat penelitian, yakni PLTM Check Dam V Kali Jari serta pengukuran parameter mesin induksi yang dilakukan di Laboratorium Mesin Fakultas Teknik Elektro Universitas Brawijaya. Dari peninjauan tempat penelitian diperoleh data denah ruang dan dimensi peralatan PLTM Check Dam V Kali Jari.

Data denah ruang dan data parameter mesin induksi merupakan data primer yang didapatkan dengan cara peninjauan langsung dan pengukuran.

Dalam penelitian ini diperlukan pula data sekunder yang didapatkan dari penelitian Irwansyah Teguh Wibisono, ST. (2006) dan hasil penelitian Hadrian Thomas, ST. (2005).

Data yang didapatkan dari hasil penelitian Irwansyah Teguh Wibisono, ST. adalah data jaringan distribusi listrik yang diperoleh dari Dusun Jari Desa Gadungan Kecamatan Gandusari Kabupaten Blitar dan data pengukuran peralatan listrik. Data pengukuran peralatan listrik ini digunakan untuk menghitung besarnya daya sebenarnya pada tiap beban.

Data sekunder yang didapatkan dari hasil penelitian Handrian Thomas, ST. adalah potensi sumber daya air yang tersedia pada PLTM Check Dam V Kali Jari, data turbin, data tegangan dan arus terminal generator sinkron.

3.3. Perancangan Penempatan Generator Induksi

Perancangan penempatan generator induksi bertujuan untuk mendapatkan posisi yang tepat bagi generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

Mesin induksi yang akan digunakan adalah mesin induksi 22 kW dan 3 kW. Mesin Induksi 22 kW akan dioperasikan sebagai generator beroperasi sendiri. Sedangkan mesin induksi 3 kW akan dioperasikan sebagai generator yang dioperasikan secara paralel dengan generator sinkron.

Setelah data denah ruang dan dimensi peralatan PLTM Check Dam V Kali Jari didapatkan, akan dilakukan perancangan penempatan generator induksi 22 kW dan 3 kW pada PLTM Check Dam V Kali Jari. Dalam perancangan penempatan generator induksi terdapat beberapa kondisi yang harus dipenuhi, yakni:

1. Penempatan generator induksi diusahakan tidak mengganggu operasi generator sinkron yang sudah ada pada PLTM Check Dam V Kali Jari.
2. Generator induksi 22 kW dapat dioperasikan secara bergantian dengan generator sinkron tanpa mengubah posisi masing-masing generator.
3. Generator induksi 3 kW dan generator sinkron 15 kVA dapat dioperasikan secara paralel dengan menggunakan satu penggerak turbin air pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

3.4. Perencanaan Pengoperasian Mesin Induksi Menjadi Generator Induksi Beroperasi Sendiri

Perencanaan pengoperasian mesin induksi menjadi generator induksi beroperasi sendiri bertujuan untuk mendapatkan cara pengoperasian mesin induksi agar dapat bekerja pada mode generator dan mampu memenuhi kebutuhan beban PLTM Check Dam V Kali Jari.

Setelah data parameter mesin induksi dan data daya reaktif sebenarnya pada tiap kelompok beban PLTM Check Dam V Kali Jari didapatkan, akan dilakukan penentuan kapasitansi kapasitor. Kapasitor digunakan sebagai sumber daya reaktif generator induksi dan beban. Kapasitor dengan nilai kapasitansi yang telah ditentukan kemudian akan dihubungkan pada terminal mesin induksi. Pada pengoperasian generator induksi beroperasi sendiri yang akan dilakukan, kecepatan putaran rotor mesin induksi akan dibuat sedikit lebih tinggi dari kecepatan sinkronnya agar bekerja pada mode generator.

3.5. Perencanaan Pengoperasian Kerja Paralel Generator Induksi Dengan Generator Sinkron

Perencanaan pengoperasian kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron bertujuan untuk meningkatkan kapasitas daya PLTM Check Dam V Kali Jari.

Dari data parameter mesin yang didapatkan, akan dilakukan penentuan kapasitansi kapasitor. Kapasitor digunakan untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif sistem jaringan paralellisasi generator induksi dengan generator sinkron. Kapasitor dengan nilai kapasitansi yang telah ditentukan akan dihubungkan pada sistem paralelisasi generator induksi dan generator sinkron.

Pada operasi kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron, kecepatan putaran rotor generator sinkron akan diusahakan tetap pada kecepatan putaran nominalnya dan kecepatan putaran rotor generator induksi dibuat sedikit lebih tinggi daripada kecepatan sinkronnya.

3.6. Pengujian Dan Analisis Data

Penempatan generator induksi 22 kW dan 3 kW pada PLTM Check Dam V Kali Jari yang telah dirancang dengan pengadaan casing, direalisasikan dan diuji apakah dapat berfungsi dengan baik.

Perancangan pengoperasian mesin induksi sebagai generator beroperasi sendiri dan kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron diuji apakah telah sesuai dengan tujuan yang diinginkan, selanjutnya dilakukan analisis data.

3.7. Penarikan Kesimpulan

Dari analisis data didapatkan kesimpulan mengenai:

1. Perancangan penempatan generator induksi pada PLTM .
2. Pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri.
3. Pengoperasian kerja paralel generator induksi fasa tiga rotor sangkar 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA dengan menggunakan satu sumber penggerak.
4. Peningkatan kapasitas daya PLTM Check Dam V Kali Jari.

BAB IV

PERANCANGAN PENEMPATAN GENERATOR INDUKSI PADA PLTM CHECK DAM V KALI JARI

4.1. PLTM Check Dam V Kali Jari

Check Dam V Kali Jari dibangun oleh Direktorat Jenderal Pengairan, Proyek Pengendalian Banjir Lahar Gunung Kelud Semeru di Desa Gadungan, Kecamatan Gandusari, Kabupaten Blitar. Check Dam V Kali Jari memiliki fungsi utama sebagai bangunan pengendali sedimen, namun untuk mengoptimalkan manfaat bangunan dan memanfaatkan potensi sumber daya air yang ada serta tinggi jatuh yang memadai, dibangun Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTM) oleh Direktorat Jenderal Pengairan Proyek Pengendalian Banjir Lahar Gunung Kelud Semeru. Kemudian pada perkembangan selanjutnya menjadi Laboratorium Lapangan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Saat ini PLTM Check Dam V Kali Jari digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik masyarakat dusun Jari.

PLTM Check Dam V Kali Jari memiliki data teknis sebagai berikut (Direktorat Jenderal Pengairan Proyek Pengendalian Banjir Lahar Gunung Kelud Semeru):

1. Generator : DENYO AC.GENERATOR MODEL FA-15F

Kapasitas keluaran	: 15 kVA
Phasa	: 3 (4 kawat)
Tegangan	: 220/380 V
Arus	: 22,8 A
Frekuensi	: 50 Hz
Faktor daya	: 0,8
Putaran	: 1500 rpm
Berat	: 175 kg
No. seri	: 0465567

2. Turbin

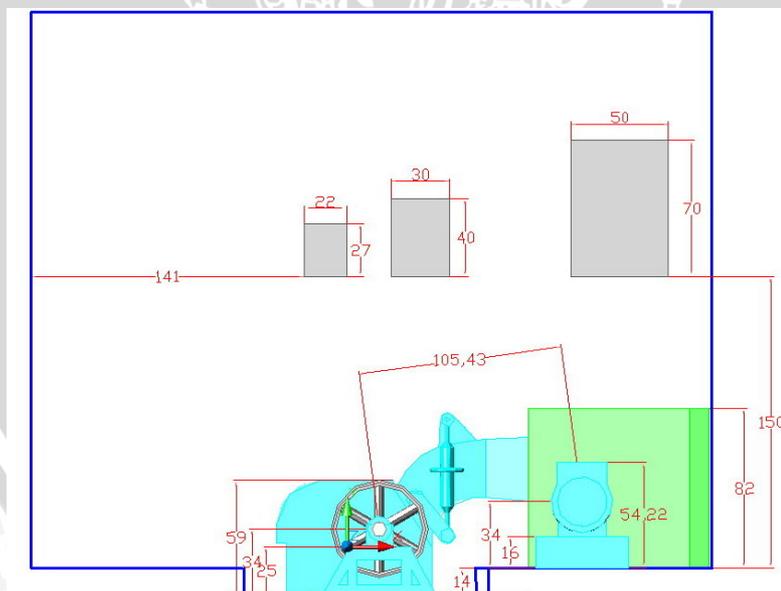
Jenis	: Banki (turbin arus lintang/cross flow)
Diameter dalam	: 300 mm
Diameter dalam	: 260 mm
Lebar runner	: 410 mm
Putaran	: 300 rpm

3. Denah ruang PLTM Check Dam V Kali Jari

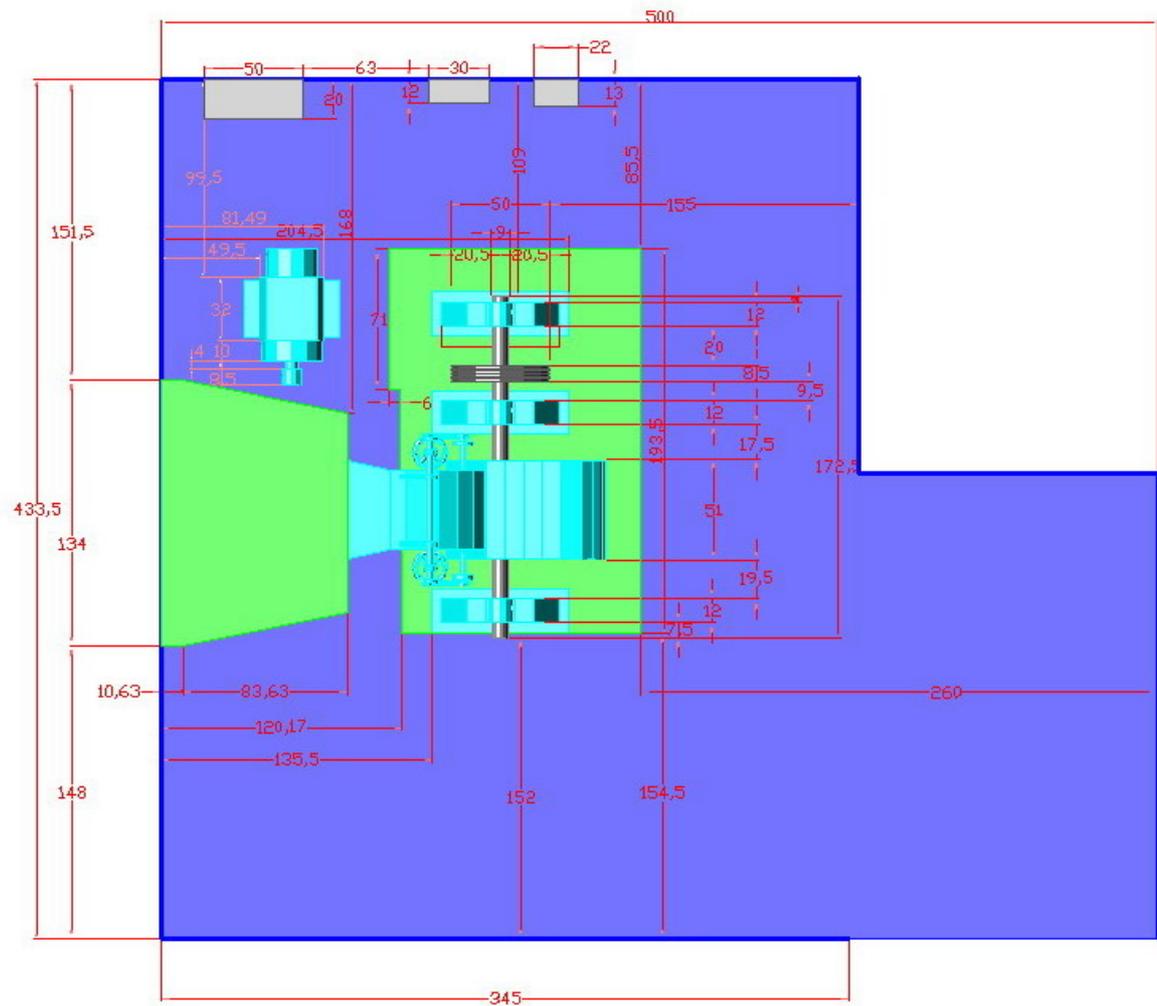
Gambar denah ruangan PLTM Check Dam V Kali Jari beserta peralatan di dalamnya tampak atas serta tampak samping dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan 4.3.



Gambar 4.1. PLTM Check Dam V Kali Jari
Sumber: Hasil pengumpulan data



Gambar 4.2. Gambar denah ruangan PLTM Check Dam V Kali Jari beserta peralatan di dalamnya tampak samping
Sumber: Hasil pengumpulan data



Gambar 4.3. Gambar denah ruangan PLTM Check Dam V Kali Jari beserta peralatan di dalamnya tampak atas
Sumber: Hasil pengumpulan data

PLTM Check Dam V Kali Jari yang memiliki kapasitas pembangkit sebesar 15 kVA atau 12 kW dengan menggunakan generator sinkron, masih memiliki potensi daya yang dapat dibangkitkan sebesar 22,5821 kW (Handrian, 2005:26). Dengan adanya perkembangan beban listrik dibutuhkan adanya penambahan kapasitas daya pada pembangkit. Penggantian generator sinkron dengan mesin induksi yang dioperasikan sebagai generator induksi beroperasi sendiri menjadi salah satu pilihan penambahan kapasitas daya. Pengoperasian kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron juga merupakan pilihan lain untuk menambah kapasitas daya PLTM Check Dam V Kali Jari.

4.2 Perancangan Penempatan Generator Induksi

Untuk mengoptimalkan fungsi PLTM Check Dam V Kali Jari sebagai laboratorium lapangan, maka kedua pilihan tersebut akan dilaksanakan dan dipasang pada tempat yang sama di PLTM Check Dam V Kali Jari.

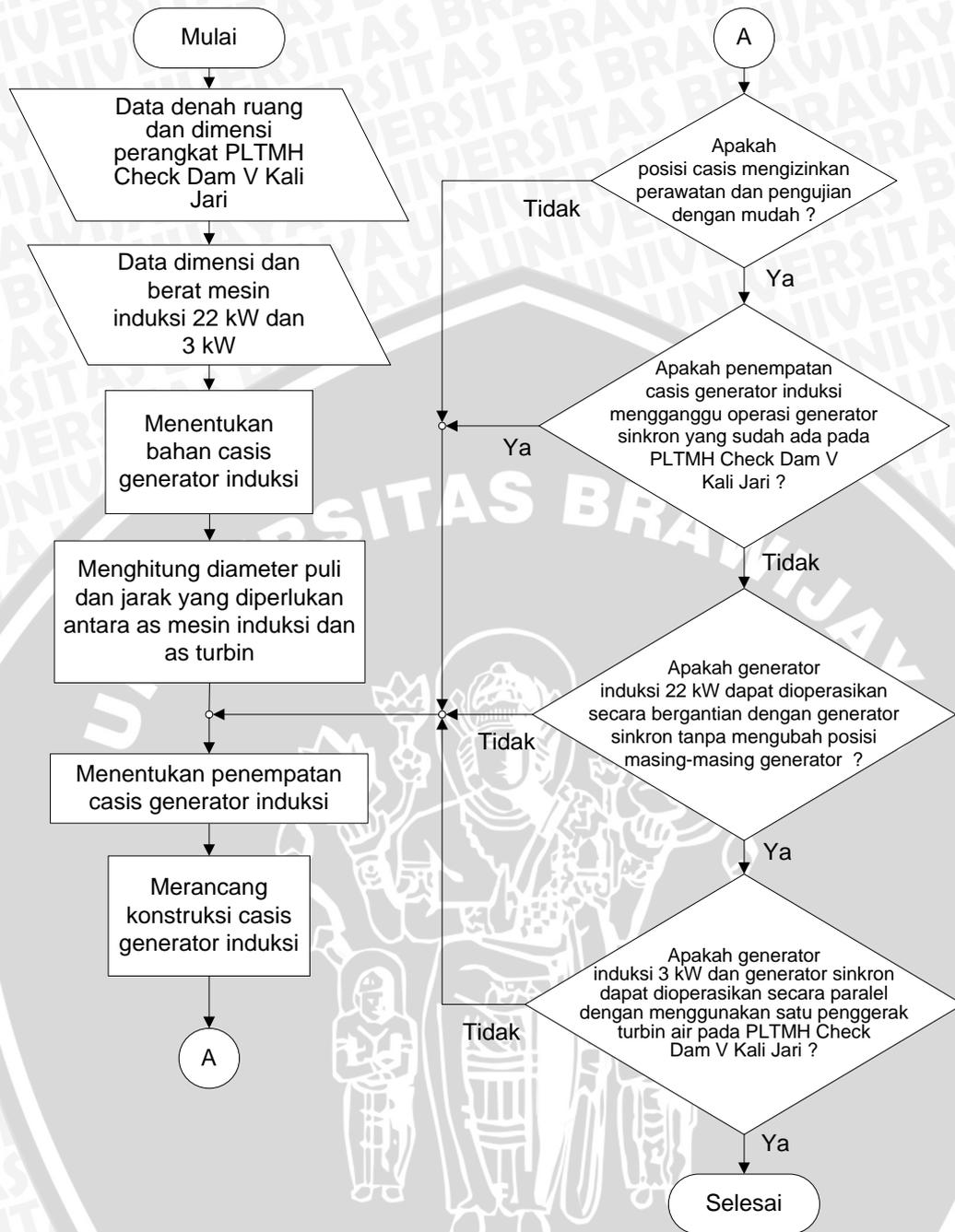
Agar kedua pilihan tersebut dapat dilaksanakan dan dapat dilakukan pengujian dengan mudah tanpa harus mengubah posisi masing-masing generator, diperlukan perancangan penempatan generator induksi. Selain itu, dengan adanya perancangan penempatan generator induksi, pengujian generator induksi beroperasi sendiri serta kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron dapat dilakukan tanpa mengganggu operasi yang sudah berjalan pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

Mesin induksi yang dipakai direncanakan menggunakan mesin induksi 22 kW untuk dioperasikan sebagai generator beroperasi sendiri dan mesin induksi 3 kW untuk kerja paralel dengan generator sinkron.

Pada perancangan penempatan generator induksi akan dilakukan perancangan konstruksi casis untuk generator induksi 22 kW dan 3 kW. Bentuk dan konstruksi casis akan mengikuti dimensi generator induksi dan perencanaan penempatan generator induksi. Casis akan ditempatkan dekat turbin untuk memudahkan pengujian generator induksi beroperasi sendiri dan operasi kerja paralel dengan generator sinkron. Selain itu casis diusahakan ditempatkan pada tempat yang bebas dijangkau agar perawatan ataupun bongkar pasang mesin mudah dilakukan.

Kekuatan bahan casis perlu diperhitungkan karena casis ini akan menjadi tempat untuk dua generator induksi yang merupakan beban bergerak. Berat dan dimensi kedua generator induksi menjadi dasar pemilihan bahan yang akan digunakan sebagai casis. Perhitungan kekuatan bahan casis dapat dilihat pada Lampiran 2.

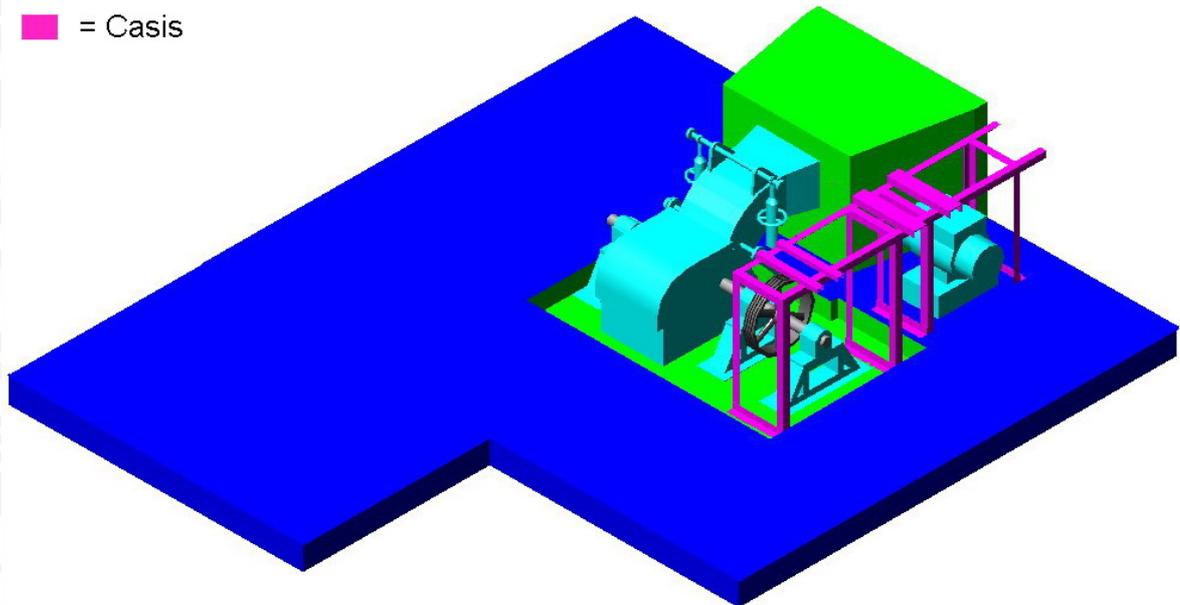
Ukuran diameter puli generator dan turbin menentukan bentuk dan ukuran casis generator induksi. Ukuran puli akan ditentukan berdasarkan kecepatan mesin induksi yang dibutuhkan dan kecepatan turbin yang ada pada PLTM Check Dam V Kali. Penentuan ukuran puli dapat dilihat pada Lampiran 3. Proses perancangan penempatan generator induksi pada PLTM Check dam V Kali Jari dalam bentuk diagram alir dapat dilihat pada Gambar 4.4



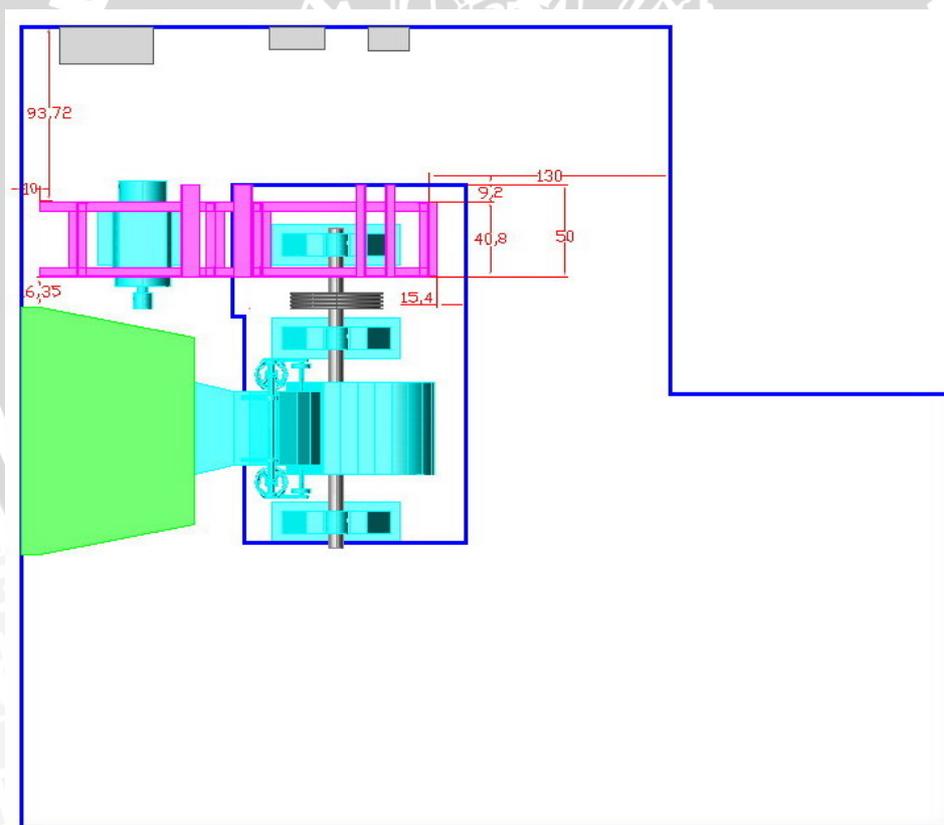
Gambar 4.4. Diagram alir perancangan penempatan generator induksi 22 kW dan 3 kW pada PLTM Check Dam V Kali Jari

Hasil rancangan ditunjukkan pada Gambar 4.5, sedangkan ukuran rancangan casis dapat dilihat pada Gambar 4.6 dan 4.6.

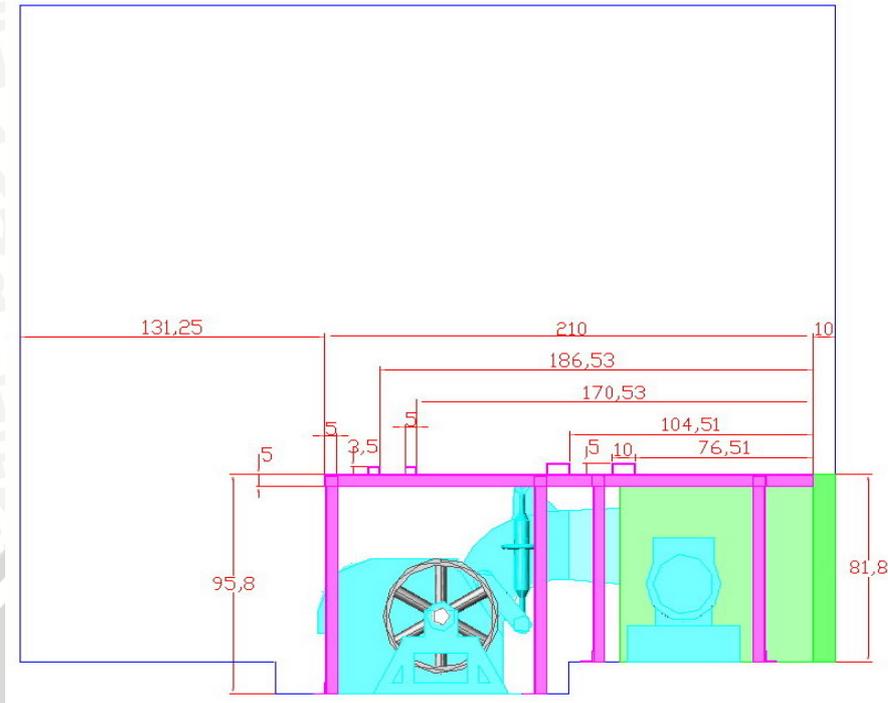
Setelah perancangan konstruksi casis generator induksi memenuhi kondisi yang ditentukan, dapat dilakukan pembuatan casis serta penempatan generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari.



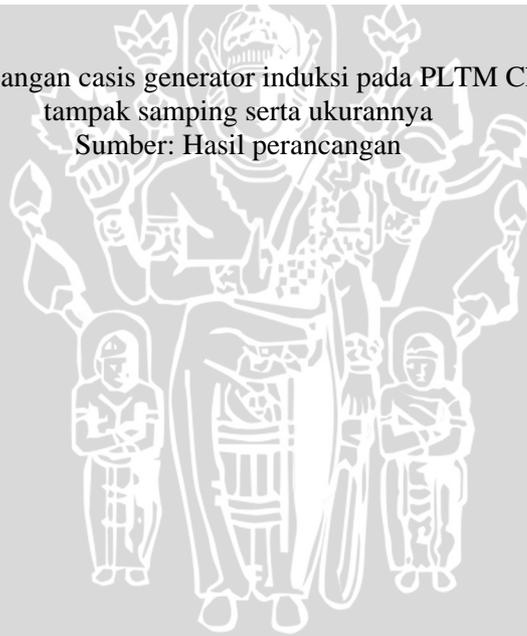
Gambar 4.5. Gambar rancangan casing generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari
 Sumber: Hasil perancangan



Gambar 4.6. Gambar rancangan casing generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari
 tampak atas serta ukurannya
 Sumber: Hasil perancangan



Gambar 4.7. Gambar rancangan casing generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari tampak samping serta ukurannya
 Sumber: Hasil perancangan



BAB V

PERENCANAAN PENGOPERASIAN GENERATOR INDUKSI PADA PLTM CHECK DAM V KALI JARI

Mengingat Laboratorium Lapangan FTUB PLTM Check Dam V Kali Jari masih mampu membangkitkan daya sampai 22,5821 kW (Hadrian, 2005: 26), maka untuk meningkatkan kapasitas daya pada PLTM tersebut, dalam bab ini akan dibahas perencanaan dua macam generator induksi yang dioperasikan sendiri dan dioperasikan secara paralel dengan generator sinkron yang ada. Masing-masing perencanaan tersebut diuraikan berikut ini.

5.1 Perencanaan Pengoperasian Generator Induksi Beroperasi Sendiri

Mesin induksi yang akan digunakan dalam pengoperasian generator induksi beroperasi sendiri ini adalah mesin induksi 22 kW.

Perencanaan diawali dengan mengumpulkan data parameter mesin induksi 22 kW dan data daya reaktif sebenarnya pada tiap kelompok beban PLTM Check Dam V Kali Jari. Dengan data tersebut akan dilakukan penentuan kapasitansi kapasitor sebagai sumber daya reaktif generator induksi dan beban.

Dengan mengacu pada dasar teori pada Bagian 2.4.2, maka pada kondisi generator tanpa beban, reaktansi magnetisasi generator X_m sama dengan reaktansi kapasitif X_c . Sehingga kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan pada kondisi generator tanpa beban atau kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan generator C_{tb} adalah:

$$C_{tb} = \frac{1}{2\pi f X_m}$$

Daya reaktif sebenarnya beban PLTM Check Dam V Jari menjadi dasar perhitungan kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan beban C_l

Arus per fasa yang melalui kapasitor I_c adalah:

$$I_c = \frac{Q_l}{V_c}$$

dengan : Q_l = daya reaktif beban per fasa

V_c = Tegangan fasa terminal kapasitor

Reaktansi kapasitif beban X_{cl} adalah:

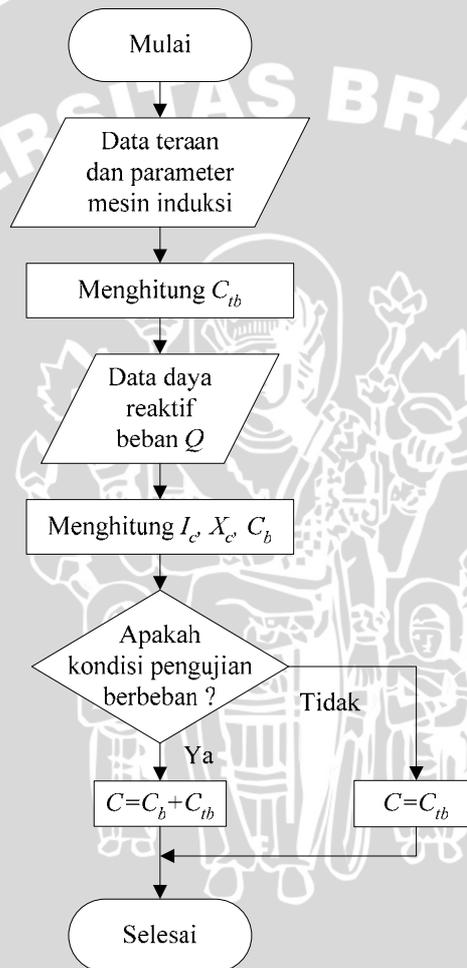
$$X_{cl} = \frac{V_c}{I_c}$$

Kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan beban dapat dinyatakan:

$$C_b = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

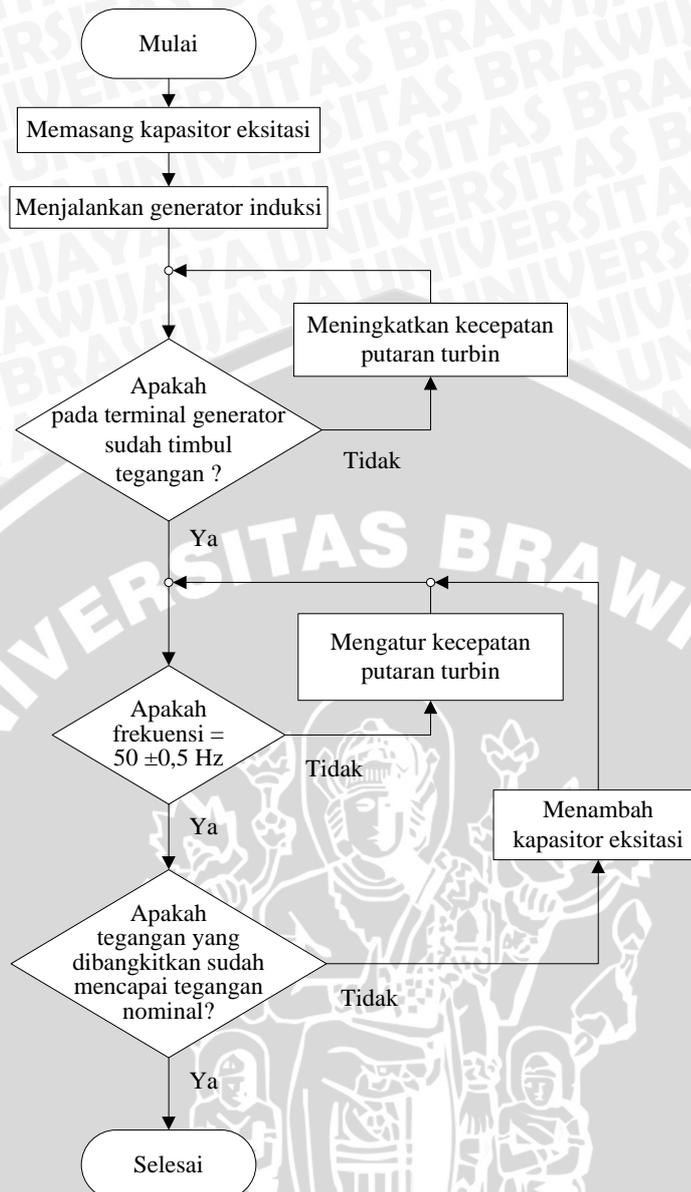
Jadi besar kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan untuk operasi generator induksi beroperasi sendiri C adalah:

$$C = C_{tb} + C_b$$



Gambar 5.1. Diagram alir perhitungan kapasitansi kapasitor

Diagram alir perencanaan pengoperasian generator induksi beroperasi sendiri dapat dilihat pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2. Diagram alir pengoperasian generator induksi beroperasi sendiri pada PLTM Check Dam V Kali Jari

Kapasitor dengan nilai kapasitansi yang telah ditentukan akan dipasang pada terminal generator induksi. Setelah itu turbin diputar untuk menjalankan generator induksi. Putaran terus akan ditambah kecepatannya hingga timbul tegangan pada terminal generator. Jika kecepatan putaran rotor generator induksi mencapai 3% lebih tinggi dari kecepatan sinkronnya namun tidak ada tegangan yang dibangkitkan (Wildi, 2002: 313), maka pengoperasian generator induksi akan dihentikan dan dilakukan pengecekan ulang pada rangkaian.

Jika pada terminal generator sudah timbul tegangan nominal yang dibangkitkan, dapat dilakukan pengaturan frekuensi dengan menambah atau mengurangi putaran

turbin. Dengan demikian frekuensi pada terminal generator dapat diusahakan konstan sesuai dengan frekuensi standar PLN yang digunakan di Indonesia, yakni sebesar 50 Hz dengan variasi frekuensi tidak lebih dari $\pm 0,5$ Hz (SPLN 1: 1995).

Menurut standar PLN (SPLN 1: 1995) pada sistem jaringan tegangan rendah (JTR) dengan tegangan nominal 220 volt, tegangan pada titik suplai konsumen diijinkan bervariasi maksimum +5% dan minimum -10% dari nilai nominalnya, sehingga batas minimum tegangan yang diijinkan adalah sebesar 198 volt dan batas maksimum sebesar 231 volt. Maka dari itu, jika pada terminal generator belum mencapai batas minimum tersebut, dapat dilakukan penambahan kapasitor hingga didapatkan tegangan yang sesuai dengan batas variasi yang diijinkan.

Jika frekuensi sudah pada standar yang ditentukan dan tegangan sesuai dengan batas variasi yang diijinkan, maka generator siap dihubungkan dengan beban.

Pada saat beban dihubungkan, frekuensi dan tegangan pada terminal generator akan berubah. Agar frekuensi tetap konstan pada saat pembebanan, maka diperlukan pengaturan putaran rotor sesuai dengan perubahan beban. Untuk menaikkan tegangan terminal generator dapat dilakukan penambahan kapasitor. Namun pada saat beban nol tegangan akan di atas tegangan nominalnya (Budiono, Purwanto, 2002: 12). Pengaturan perubahan beban serta penentuan penambahan nilai kapasitansi yang dibutuhkan telah dilakukan pada penelitian Arthawijayanti (2007).

5.2 Perencanaan Pengoperasian Kerja Paralel Generator Induksi Dan Generator Sinkron.

Pada perencanaan pengoperasian kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron ini digunakan mesin induksi 3 kW dan generator sinkron 15 kVA pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

Pengoperasian kerja paralel generator induksi dan generator sinkron akan diawali dengan menghubungkan terminal keluaran mesin induksi 3 kW pada terminal keluaran generator sinkron dengan memperhatikan urutan fasa.

Pemeriksaan urutan fasa dapat dilakukan dengan menjalankan generator sinkron dan mengoperasikan mesin induksi 3 kW sebagai motor. Jika arah putaran motor 3 kW sudah searah dengan putaran generator sinkron, maka urutan fasa sudah benar.

Dengan mengacu pada dasar teori, didapatkan bahwa jika generator induksi terhubung dengan jaringan, maka daya reaktif yang dibutuhkan oleh generator induksi

didapatkan dari jaringan. Dalam hal ini daya reaktif yang dibutuhkan generator induksi jauh lebih kecil dibandingkan daya yang disediakan oleh jaringan. Mengingat pada operasi ini generator induksi 3 kW akan dihubungkan secara paralel dengan generator sinkron 15 kVA pada PLTM Check Dam V Kali Jari, maka tetap dibutuhkan pemasangan kapasitor untuk memenuhi kebutuhan daya reaktif generator induksi 3 kW. Dari Bagian 2.4.1 telah diuraikan hubungan generator induksi dengan jaringan fasa dan didapatkan Persamaan (2.9), yakni:

$$I_L = I_1 - I_C + I_T$$

Untuk PLTM Check Dam V Kali Jari, arus transmisi I_T diperoleh dari arus generator sinkron I_G . Sehingga didapatkan persamaan:

$$I_L = I_1 - I_C + I_G \quad (5.1)$$

dengan: I_L = arus yang mengalir pada beban

I_C = arus yang mengalir pada kapasitor

I_G = arus generator sinkron

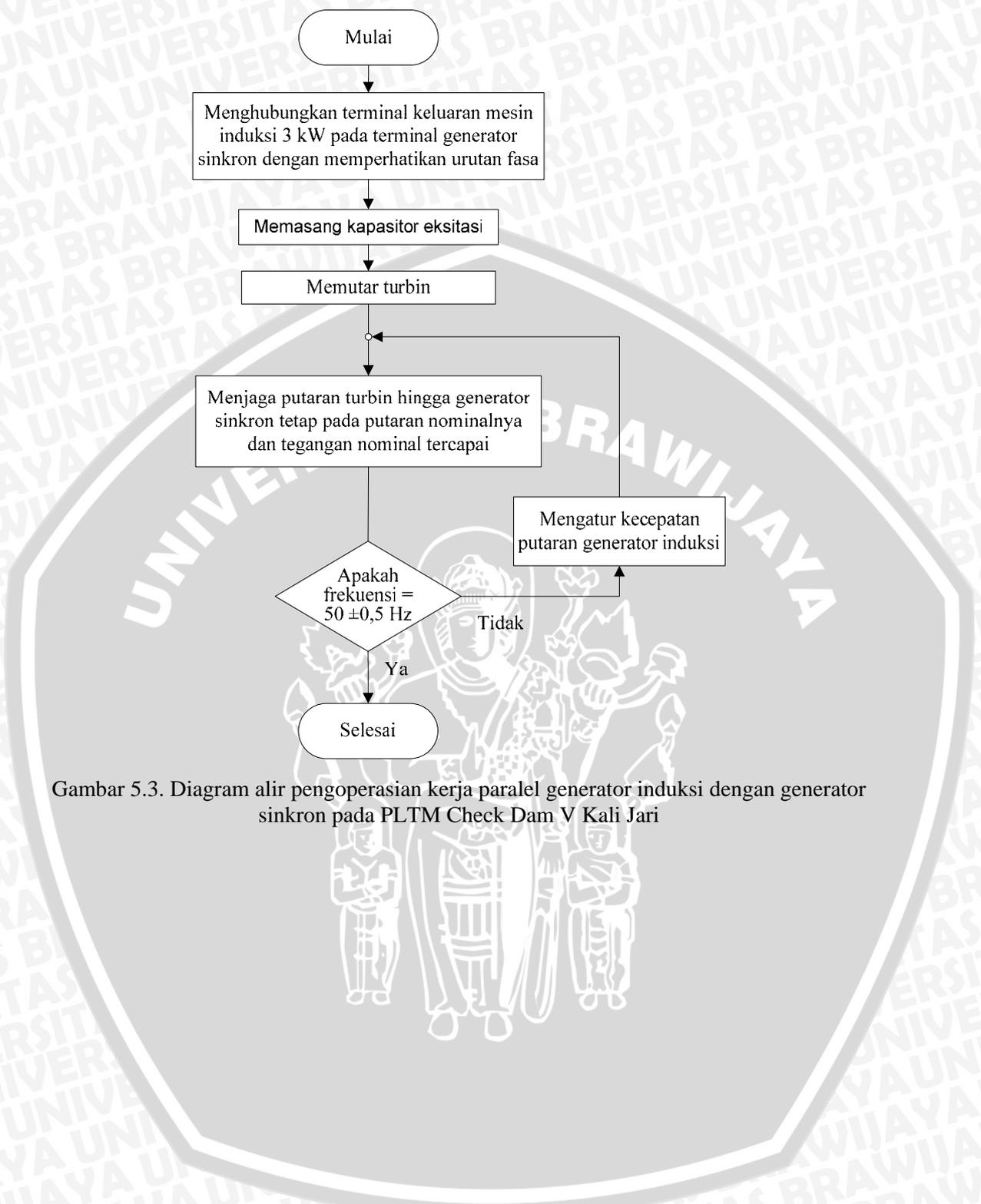
I_1 = arus generator induksi

Setelah kapasitor selesai dipasang dan dihubungkan pada terminal mesin induksi 3 kW, turbin akan diputar hingga kecepatan putaran generator sinkron mencapai kecepatan nominalnya dan tegangan nominal tercapai.

Berdasarkan perencanaan penentuan ukuran puli pada Bab IV, melalui transmisi mekanik puli dan belt kecepatan putaran generator induksi selalu lebih tinggi dari kecepatan generator sinkron. Sehingga dengan menjaga kecepatan putaran generator sinkron 15 kVA pada putaran nominalnya, kecepatan putaran generator induksi 3 kW akan selalu sedikit lebih tinggi dari kecepatan sinkronnya.

Selain itu pengaturan kecepatan turbin juga akan tetap dilakukan agar frekuensi sesuai dengan frekuensi standar PLN sebesar 50 Hz dengan variasi frekuensi tidak lebih dari $\pm 0,5$ Hz (SPLN 1: 1995).

Setelah tegangan pada terminal generator mencapai tegangan nominal dan frekuensi sesuai dengan standar PLN, beban dapat dihubungkan.



Gambar 5.3. Diagram alir pengoperasian kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron pada PLTM Check Dam V Kali Jari

BAB VI

PEMASANGAN GENERATOR INDUKSI PADA PLTM CHECK DAM V KALI JARI

Perancangan pemasangan generator induksi yang telah dibahas pada Bab IV akan direalisasikan pada bab ini. Pemasangan generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari menjadi persiapan awal pengujian operasi generator induksi 22 kW beroperasi sendiri dan pengujian operasi paralel generator induksi 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA pada PLTM Check Dam V Kali Jari

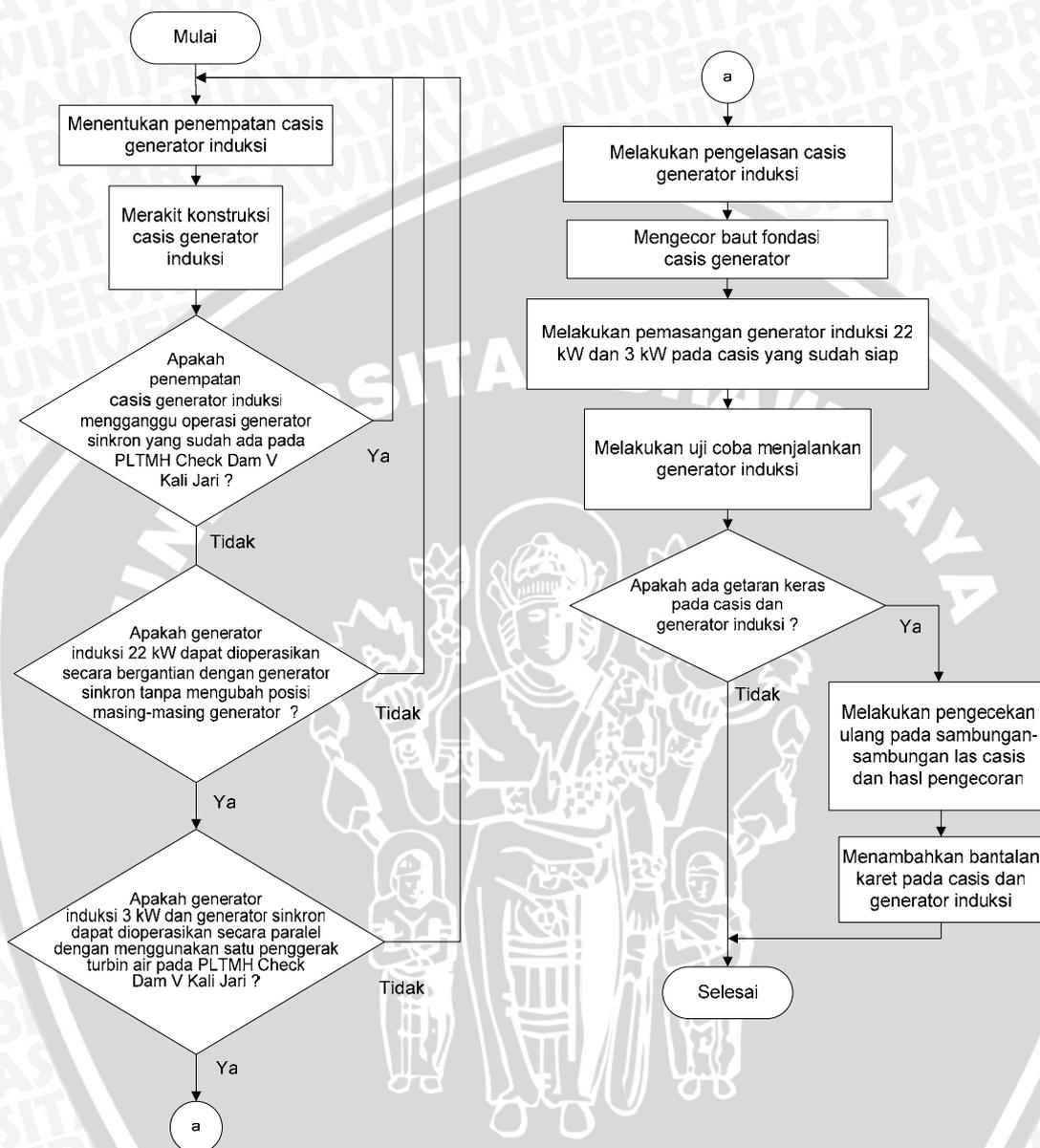
Mengingat rencana penempatan casis generator induksi berada di atas as turbin, maka terlebih dahulu dilakukan pemasangan puli pada as turbin, agar tidak mengganggu pemasangan casis generator induksi. Puli yang dipasang tersebut memiliki 2 alur dengan diameter 15 inci dan digunakan sebagai transmisi mekanik generator induksi 3 kW dalam operasi kerja paralel. Penentuan ukuran puli tersebut dapat dilihat pada Lampiran 2.

Pengadaan dan pemasangan casis generator induksi merupakan bagian utama dalam penempatan generator induksi. Konstruksi casis dibuat dalam bentuk potongan-potongan bagian dan dirakit di PLTM Check Dam V Kali Jari untuk menghindari adanya kemungkinan ada bagian casis yang telah dibuat mengganggu peralatan yang sudah ada pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

Langkah-langkah penempatan generator induksi dalam bentuk diagram alir dapat dilihat pada Gambar 6.1. Pada waktu perakitan dan penentuan tempat casis tetap dilakukan pengecekan apakah casis dapat memenuhi kondisi yang harus dipenuhi, yakni:

1. Penempatan generator induksi diusahakan tidak mengganggu operasi generator sinkron yang sudah ada pada PLTM Check Dam V Kali Jari.
2. Generator induksi 22 kW dapat dioperasikan secara bergantian dengan generator sinkron tanpa mengubah posisi masing-masing generator.
3. Generator induksi 3 kW dan generator sinkron dapat dioperasikan secara paralel dengan menggunakan satu penggerak turbin air pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

Jika kondisi tersebut sudah dipastikan dapat terpenuhi, maka dilakukan pengelasan pada sambungan-sambungan bagian casis yang dirakit serta pengecoran baut fondasi casis pada lantai.

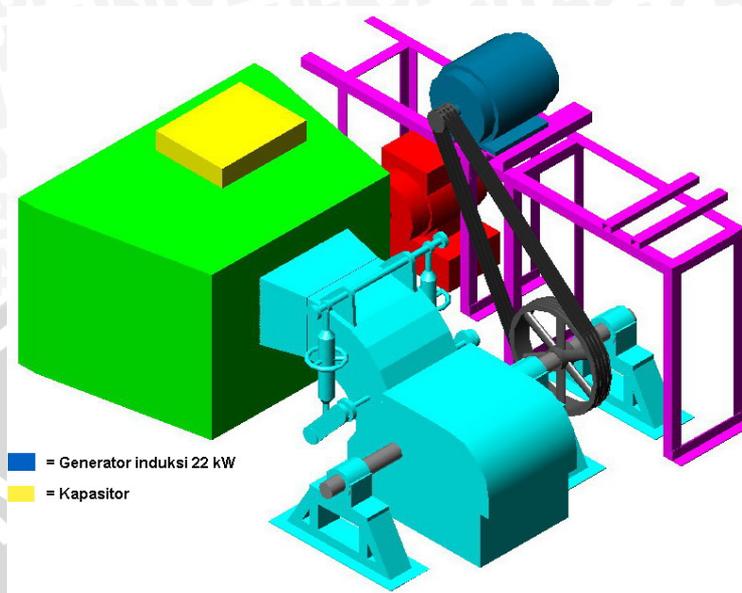


Gambar 6.1. Diagram alir pemasangan generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari

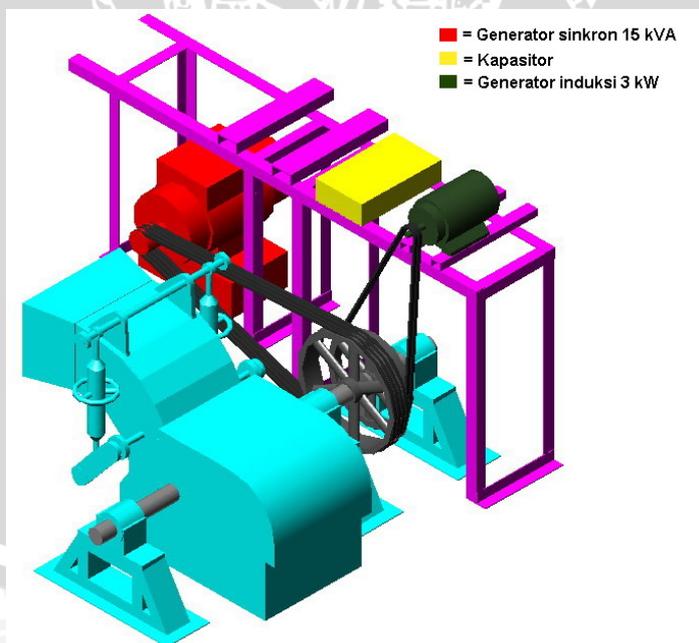
Proses pengeringan cor membutuhkan waktu 1 minggu. Setelah selesai, dilakukan pemasangan mesin induksi 22 kW dan 3 kW pada casis serta dilakukan pengujian generator induksi. Pada waktu pemasangan generator induksi tetap ditambahkan bantalan karet pada dasar generator untuk mengurangi getaran saat generator dijalankan.

Pemasangan generator induksi sebagai persiapan pengujian mesin induksi 22 kW sebagai generator beroperasi sendiri dapat dilihat pada Gambar 6.2.

Pemasangan generator induksi sebagai persiapan kerja paralel generator induksi 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA dapat dilihat pada Gambar 6.3.



Gambar 6.2. Pemasangan mesin induksi 22 kW sebagai generator beroperasi sendiri pada PLTM Check Dam V Kali Jari
Sumber: Hasil perancangan pemasangan



Gambar 6.3. Pemasangan mesin induksi 3 kW sebagai persiapan kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron 15 kVA pada PLTM Check Dam V Kali Jari
Sumber: Hasil perancangan pemasangan

BAB VII

PENGUJIAN GENERATOR INDUKSI DAN ANALISIS DATA

7.1. Umum

Pengujian pengoperasian generator induksi ini terdiri atas dua macam, yakni pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri dan pengujian pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron 15 kVA. Pengujian tersebut mengacu pada perencanaan pengoperasian generator induksi yang telah dibahas pada Bab V. Pengujian ini dilaksanakan pada tanggal 29 November sampai dengan 3 Desember 2007 di Laboratorium Lapangan Fakultas Teknik Brawijaya PLTM Check Dam V Kali Jari, Desa Gadungan, Kecamatan Gandusari, Kabupaten Blitar.

Dengan kedua pengujian ini, penempatan generator induksi yang telah direalisasikan dapat diuji pula apakah sudah efektif dan mampu mendukung secara optimal kedua operasi yang dilakukan.

Pengujian yang pertama adalah pengujian pengoperasian mesin induksi sebagai generator induksi beroperasi sendiri. Pengujian ini dilakukan pada keadaan tanpa beban sampai dengan keadaan beban penuh generator. Mengingat pengujian ini dilakukan bersama dengan pengujian penelitian Arthawijayanti mengenai perancangan *exciter* generator induksi pada PLTM Check Dam V Kali Jari, maka pengaturan perubahan beban serta penentuan penambahan nilai kapasitansi telah dilakukan dan dapat dilihat pada penelitian Arthawijayanti (2007).

Pada penelitian yang dilakukan Rendrata dan Gunawan sebagai Praktek Kerja Lapangan, yakni tentang peningkatan unjuk kerja sistem distribusi PLTM Check Dam V Kali Jari (2006), telah dilakukan pemasangan kapasitor pada tiap rumah. Pemasangan dan penentuan kapasitansi kapasitor tersebut berdasarkan besar daya beban terpasang serta kebutuhan daya reaktif masing-masing konsumen PLTM Check Dam V Kali Jari. Dengan demikian, beban PLTM Check Dam V Kali Jari dalam pengujian ini dapat diwakili beban resistif berupa elemen setrika listrik sebagai penyederhanaan beban. Sehingga pengujian dapat lebih mudah dilakukan.

Pengujian yang kedua adalah pengujian pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron 15 kVA. Pengujian

ini dilakukan pada kondisi berbeban. Penambahan beban dibuat sama dengan dengan pengujian yang pertama, agar hasil kedua operasi ini dapat dibandingkan.

Pada kedua pengujian ini, frekuensi diusahakan konstan sesuai standar PLN dan tegangan pada terminal generator diusahakan nominal. Frekuensi standar yang digunakan di Indonesia adalah sebesar 50 Hz. Variasi frekuensi untuk sistem tenaga listrik Jawa-Bali-Madura diusahakan tidak lebih dari $\pm 0,5$ Hz, dan $\pm 1,5$ Hz untuk di luar Jawa. Pada sistem jaringan tegangan rendah (JTR) dengan tegangan nominal 220 volt, tegangan pada titik suplai konsumen diijinkan bervariasi maksimum +5% dan minimum -10% dari nilai nominalnya, sehingga batas minimum tegangan yang diijinkan adalah sebesar 198 volt dan batas maksimum sebesar 231 volt (SPLN 1: 1995).

7.2. Pengujian Pegoperasian Mesin Induksi 22 kW Sebagai Generator Induksi Beroperasi Sendiri

7.2.1. Tujuan

Tujuan pengujian ini adalah untuk membuktikan mesin induksi 22 kW yang dioperasikan sebagai generator induksi beroperasi sendiri, dapat digunakan sebagai alternatif pengganti generator sinkron 15 kVA pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

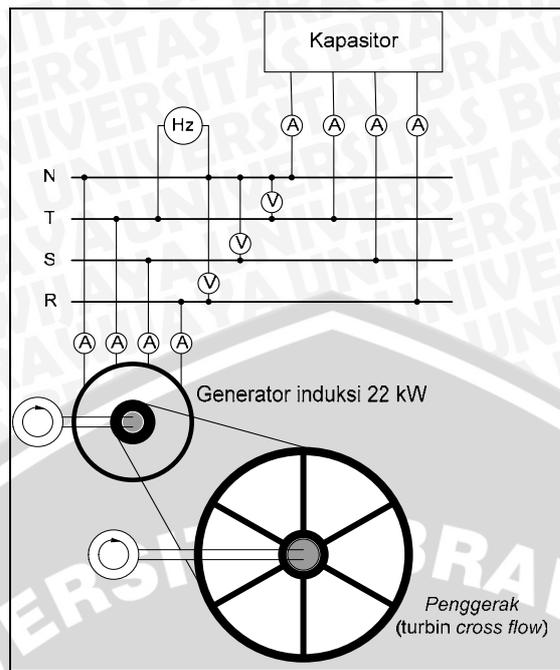
7.2.2. Peralatan yang digunakan

Peralatan yang digunakan untuk pengujian mesin induksi yang dioperasikan sebagai generator induksi beroperasi sendiri adalah:

1. Penggerak berupa turbin arus lintang (*cross flow*)
2. Mesin induksi fasa tiga dengan keluaran 22 kW
3. Kapasitor
4. Amperemeter
5. Voltmeter
6. Frekuensimeter
7. Tachometer
8. Beban berupa elemen seterika.

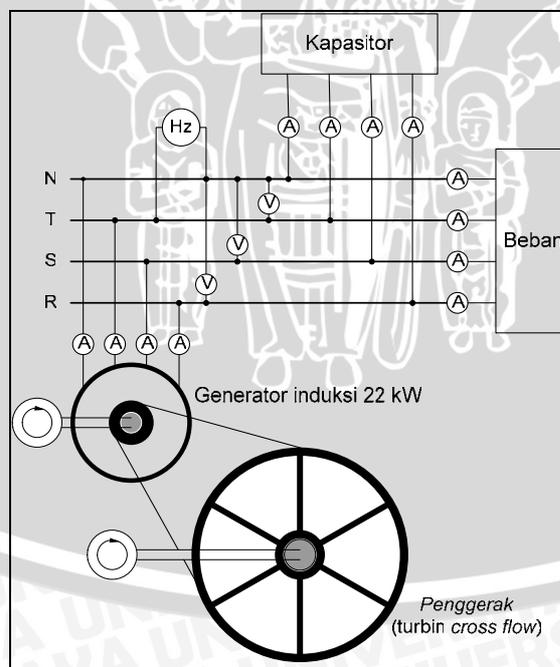
7.2.3. Rangkaian pengujian

Rangkaian pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri pada keadaan tanpa beban seperti pada Gambar 7.1.



Gambar 7.1. Pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri pada keadaan tanpa beban
 Sumber: Hasil pengujian

Rangkaian pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri pada keadaan berbeban seperti pada Gambar 7.2



Gambar 7.2. Pengujian pengoperasian mesin induksi sebagai generator induksi beroperasi sendiri pada keadaan berbeban
 Sumber: Hasil pengujian

dengan:

 = amperemeter

 = tachometer

 = frekuensimeter

 = voltmeter

7.2.4. Prosedur pengujian

Prosedur pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri pada tanpa beban adalah:

1. Memasang sabuk untuk menghubungkan puli generator induksi 22 kW dengan puli berdiameter 20 inci pada turbin.
2. Memasang kapasitor eksitasi
3. Memutar generator induksi dengan kecepatan sekitar kecepatan nominal hingga timbul tegangan nominal pada terminal generator.
4. Mengukur frekuensi generator
5. Meningkatkan atau mengurangi kecepatan turbin, untuk menjaga frekuensi pada terminal generator = $50 \pm 0,5$ Hz
6. Mengukur putaran generator induksi.
7. Mengukur besarnya tegangan dan arus generator induksi pada masing-masing fasa.
8. Mencatat semua data pengukuran.

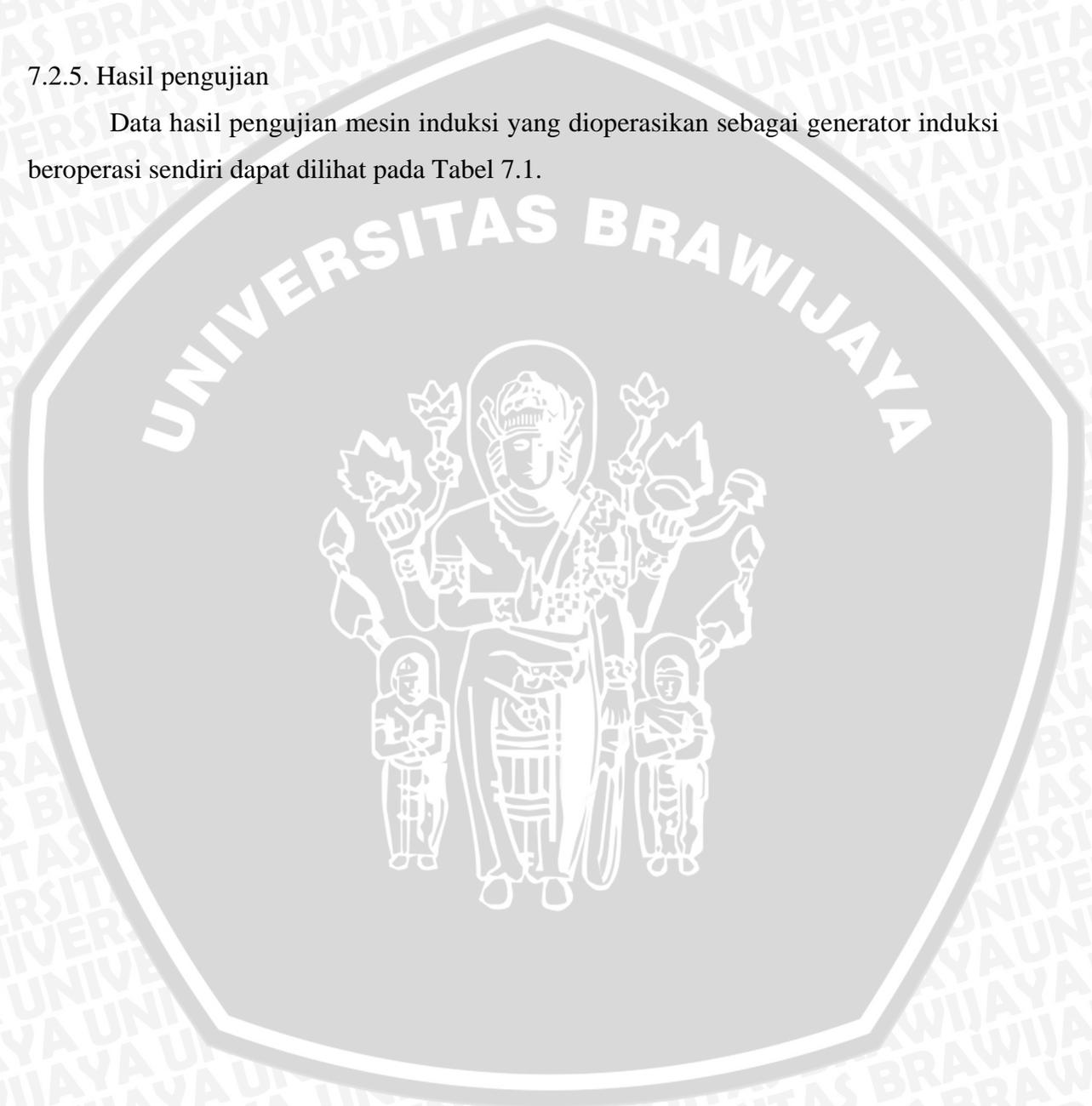
Prosedur pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri pada keadaan berbeban adalah:

1. Menghubungkan beban dengan generator.
2. Memasang kapasitor dengan nilai kapasitansi yang dibutuhkan
3. Memutar generator induksi dengan kecepatan sekitar kecepatan nominal hingga timbul tegangan nominal pada terminal generator.
4. Mengukur frekuensi generator
5. Meningkatkan atau mengurangi kecepatan turbin, untuk menjaga frekuensi pada terminal generator = $50 \pm 0,5$ Hz
6. Mengukur putaran generator induksi.

7. Mengukur besarnya tegangan generator, arus yang melalui generator, arus yang melalui kapasitor, dan arus yang mengalir ke beban pada masing-masing fasa.
8. Mencatat semua data pengukuran.
9. Mengulangi langkah 1 sampai dengan langkah 8 untuk setiap terjadi perubahan beban.

7.2.5. Hasil pengujian

Data hasil pengujian mesin induksi yang dioperasikan sebagai generator induksi beroperasi sendiri dapat dilihat pada Tabel 7.1.





7.2.6. Analisis data

Pada keadaan tanpa beban, dengan kapasitansi kapasitor eksitasi tiap fasa sebesar $227,25 \mu\text{F}$ dan putaran generator induksi sebesar 1450 rpm, frekuensi generator induksi sebesar 50,5 Hz, tegangan fasa yang dibangkitkan pada terminal generator adalah sebesar 175 volt, arus yang mengalir pada kapasitor 13,7 A.

Karena frekuensi sudah memenuhi standar PLN pada sistem jaringan tegangan rendah (JTR) sedangkan tegangan yang dibangkitkan belum mencapai batas variasi tegangan nominal yang diijinkan, maka diperlukan penambahan kapasitansi kapasitor. Perhitungan penambahan kapasitor yang diperlukan dapat dilihat pada Lampiran 5. Dengan penambahan kapasitansi pada keadaan tanpa beban menyebabkan kapasitansi kapasitor pada keadaan beban yang lain semakin besar, sehingga tegangan generator pada keadaan berbeban dapat mencapai tegangan nominal.

Pada penambahan beban resistif hingga 1400 watt per fasa, dilakukan penambahan kapasitor sehingga kapasitor yang dipasang sebesar $312,25 \mu\text{F}$. Pada tahap ini, dengan kecepatan putaran rotor generator induksi sebesar 1410 rpm, frekuensi sudah memenuhi standar PLN pada sistem jaringan tegangan rendah (JTR) dan tegangan yang dibangkitkan sudah dalam batas variasi tegangan nominal yang diijinkan (198 volt sampai dengan 231 volt), yakni 210 volt.

Pada penambahan beban resistif hingga 2100 watt per fasa, tegangan pada terminal generator kembali turun. Hal ini diakibatkan kenaikan beban yang dilakukan memperbesar tegangan jatuh pada stator sehingga tegangan pada terminal generator turun. Penambahan kecepatan turbin untuk menyesuaikan kembali besar frekuensi yang turun, sudah mencapai batas kemampuan potensi air yang ada pada saat itu. Dengan demikian pengujian dihentikan pada tahap beban 2100 watt per fasa.

. Pada tahap beban resistif 1400 watt per fasa arus generator induksi sebesar 18,4 A dan pada tahap beban 2100 watt per fasa, arus pada generator induksi sebesar 19,7 A. Pada tahap beban tersebut arus generator induksi masih dibawah arus nominalnya yakni 38 A. Mengingat pengujian dilakukan pada saat kemarau dimana potensi air pada kondisi minimum, maka pada kondisi potensi air yang stabil setelah musim penghujan beban generator induksi masih dapat ditingkatkan dan digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban PLTM Check Dam V Kali Jari.

7.3. Pengujian pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron

7.3.1. Tujuan

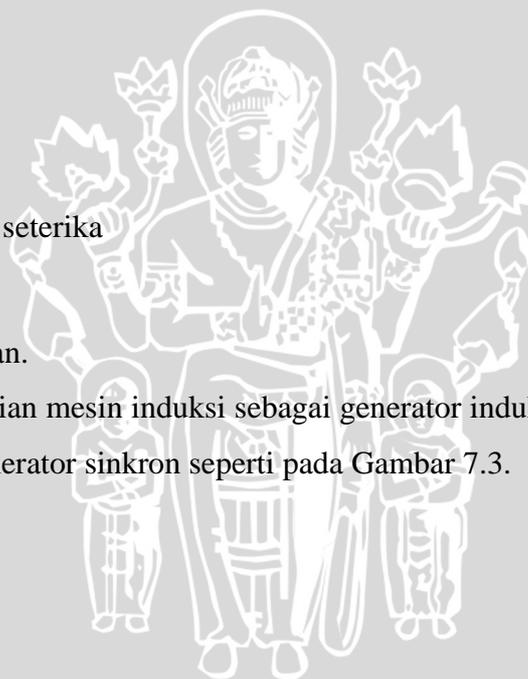
Tujuan pengujian ini adalah untuk membuktikan dengan pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron 15 kVA dapat menambah kapasitas daya PLTM Check Dam V Kali Jari.

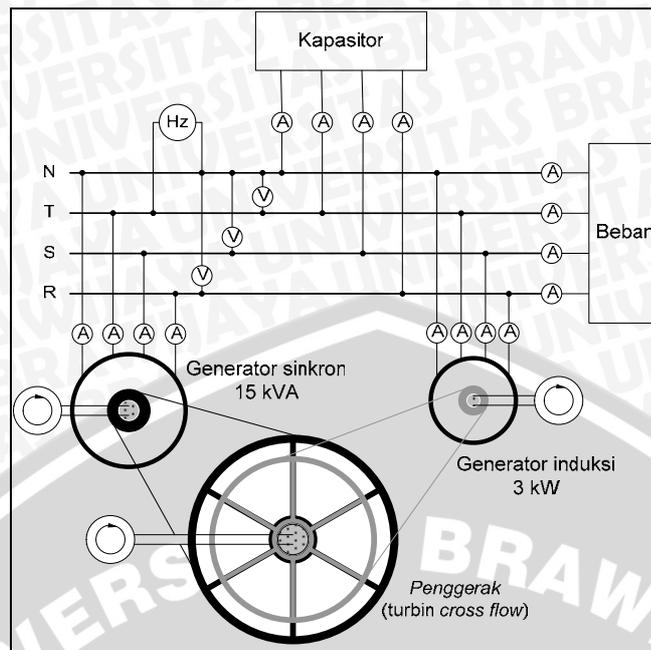
7.3.2. Peralatan yang digunakan

1. Penggerak berupa turbin arus lintang (*cross flow*)
2. Mesin induksi fasa tiga dengan keluaran 3 kW
3. Kapasitor
4. Amperemeter
5. Voltmeter
6. Frekuensimeter
7. Tachometer
8. Beban berupa elemen seterika

7.3.3. Rangkaian pengujian.

Rangkaian pengujian mesin induksi sebagai generator induksi yang dioperasikan secara paralel dengan generator sinkron seperti pada Gambar 7.3.





Gambar 7.3: Pengujian mesin induksi sebagai generator induksi yang dioperasikan secara paralel dengan generator sinkron
Sumber: Hasil pengujian

dengan:

- = amperemeter
- = tachometer
- = frekuensimeter
- = voltmeter

7.3.4. Prosedur pengujian

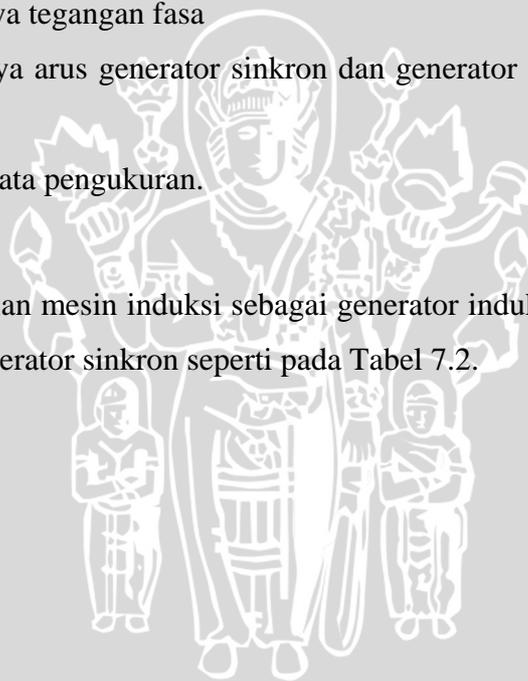
Pengujian mesin induksi sebagai generator induksi yang dioperasikan secara paralel dengan generator sinkron dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Memasang sabuk untuk menghubungkan puli generator sinkron 15 kVA dengan puli berdiameter 20 inci pada turbin.
2. Menghubungkan terminal keluaran mesin induksi 3 kW pada terminal keluaran generator sinkron 15 kVA dengan memperhatikan urutan fasa.
3. Melakukan pemeriksaan apakah urutan fasa sudah benar dengan menjalankan generator sinkron dan mengoperasikan mesin induksi 3 kW sebagai motor (jika arah putaran motor sudah searah dengan putaran generator sinkron dan turbin, maka urutan fasa sudah benar)

4. Memasang sabuk untuk menghubungkan puli generator induksi 3 kW dan puli berdiameter 15 inci pada turbin.
5. Memasang kapasitor eksitasi
6. Menghubungkan sistem paralellisasi generator dengan beban
7. Memutar turbin untuk mengoperasikan generator sinkron dan generator induksi, kecepatan sekitar kecepatan nominal hingga timbul tegangan pada terminal generator.
8. Menjaga kecepatan putaran generator sinkron tetap pada kecepatan nominalnya.
9. Mengukur frekuensi generator
10. Meningkatkan atau mengurangi kecepatan turbin, untuk menjaga frekuensi pada terminal generator = $50 \pm 0,5$ Hz
11. Mengukur putaran generator induksi dan putaran generator sinkron
12. Mengukur besarnya tegangan fasa
13. Mengukur besarnya arus generator sinkron dan generator induksi pada masing-masing fasa.
14. Mencatat semua data pengukuran.

7.3.5. Hasil pengujian

Data hasil pengujian mesin induksi sebagai generator induksi yang dioperasikan secara paralel dengan generator sinkron seperti pada Tabel 7.2.





7.3.6 Analisis Data

Mengacu pada perencanaan pengoperasian kerja paralel generator induksi dan generator sinkron pada Bab V, dengan Persamaan (5.1) dapat dilakukan analisis apakah operasi paralel ini dapat bekerja dengan baik.

Pada beban 700 watt per fasa, dengan Persamaan (5.1) arus beban pada fasa R adalah

$$I_L = I_1 - I_C + I_G$$

$$I_L = 3,2 - 2,6 + 1,5$$

$$= 2,1 \text{ A}$$

Arus beban pada fasa S = 2 A, arus beban pada fasa T = 2 A. Hasil perhitungan tersebut sama dengan hasil pengujian, namun untuk arus beban fasa T terdapat perbedaan sebesar 0,1 A. Hasil perhitungan arus beban untuk keadaan beban 1400 dan 2100 watt per fasa dapat dilihat pada tabel 7.3

Tabel 7.3: Perbedaan arus beban hasil pengujian dengan hasil perhitungan

Daya beban per fasa (W)	Arus G. Induksi (A)				Arus G. Sinkron (A)				Arus Kapasitor (A)				Arus Beban (A) Hasil Perhitungan			Arus Beban (A) Hasil Pengujian			Beda Arus Beban (%)		
	I _R	I _S	I _T	I _N	I _R	I _S	I _T	I _N	I _R	I _S	I _T	I _N	I _R	I _S	I _T	I _R	I _S	I _T	I _R	I _S	I _T
	700	3,2	3,1	3,2	1,3	1,5	1,4	1,3	1	2,6	2,5	2,5	0,7	2,1	2	2	2,1	2	1,9	0	0
1400	3,2	3,4	2,9	1	2,7	2,9	2,6	1,4	2,2	2,6	2,7	1,2	3,7	3,7	2,8	4,6	4,4	4,4	24,3	18,9	57,1
2100	5,2	6	5,9	1,4	3,2	3,2	3	1,5	2,4	2,2	2,8	1,4	6	7	6,1	6,7	7	6,9	11,7	0	13,1

Sumber: Hasil pengujian, hasil perhitungan

Dari Tabel 7.3 dapat diketahui bahwa pada kondisi beban 700 watt per fasa, operasi paralel tersebut sudah bekerja dengan baik dan generator induksi mampu memenuhi kebutuhan beban.

Pada kondisi beban resistif 1400 watt per fasa terdapat perbedaan hasil pengujian dengan hasil perhitungan arus beban sebesar 24-57%. Sedangkan pada kondisi beban 2100 watt per fasa terdapat perbedaan hasil pengujian dengan hasil perhitungan arus beban pada fasa R dan T sebesar 11 dan 13%.

Sangat sulit untuk menjaga kecepatan turbin agar generator sinkron tetap pada kecepatan nominalnya secara manual. Mengingat kedua generator menggunakan satu sumber penggerak, pada saat penambahan beban kecepatan putaran generator sinkron turun, sehingga kecepatan generator induksi akan turun pula. Jika kecepatan putaran generator induksi turun hingga lebih rendah dari kecepatan sinkronnya, generator induksi akan bekerja pada mode motor dan menjadi beban. Untuk menaikkan kembali kecepatan turbin sekaligus mengatur frekuensi sesuai dengan standart PLN membutuhkan waktu yang lama. Pada saat frekuensi sesuai dengan standart PLN, dilakukan pengukuran tegangan dan arus.

Pada pengujian ini tegangan belum mencapai tegangan nominal. Hal ini dapat disebabkan sumber daya reaktif untuk generator induksi 3 KW masih kurang. Adanya variasi kapasitansi pada masing-masing kapasitor yang digunakan dapat menjadi penyebab kurangnya daya reaktif tersebut. Pada kondisi beban 2100 watt per fasa, pengujian ini dihentikan karena kurangnya debit air saat itu.

Secara umum pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri dan pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron 15 kVA dapat dilakukan pada PLTM Check Dam V Kali Jari. Penempatan untuk kedua operasi generator diatas berfungsi dengan baik dan tidak ada gangguan teknis mengenai transmisi mekanik pada kedua pengoperasian.

Pada tahap beban 2100 watt per fasa, pada pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri pengujian dihentikan karena kurangnya debit air saat itu. Sedangkan pada pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron 15 kVA pada tahap beban 2100 watt per fasa, arus generator induksi sudah mencapai 86% arus nominalnya. Dengan demikian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri menjadi pilihan sebagai alternatif pengganti generator sinkron yang ada dan penambahan daya pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

BAB VIII

PENUTUP

8.1. Kesimpulan

Setelah dilakukan pengujian dan analisis data diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Sesuai dengan perencanaan penempatan generator induksi di PLTM Check Dam V Kali Jari pada Bab IV, generator induksi fasa tiga rotor sangkar 22 kW dan 3 kW ditempatkan di atas as turbin dengan bantuan casis. Penempatan tersebut efektif dan mampu mendukung secara optimal kedua operasi yang dilakukan.
2. Pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi telah dilakukan sesuai dengan perencanaan pada Bab V. Dengan kapasitor eksitasi sebesar 312,25 μF , pada kecepatan putaran rotor generator induksi sebesar 1410 rpm, frekuensi sudah dalam batas variasi frekuensi yang diijinkan yakni 49,5 Hz dan tegangan yang dibangkitkan sesuai batas variasi yang diijinkan sebesar 210 V.
3. Mesin induksi 22 kW yang dioperasikan sebagai generator induksi beroperasi sendiri dapat digunakan alternatif sebagai pengganti generator sinkron.
4. Pengoperasian kerja paralel generator induksi fasa tiga rotor sangkar 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA pada PLTM Check Dam V Kali Jari telah dilakukan sesuai dengan perencanaan pada Bab V. Namun dalam pelaksanaannya tidak dapat dilakukan secara maksimal mengingat kurangnya debit air saat pengujian.
5. Pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi menjadi pilihan untuk meningkatkan kapasitas daya pada PLTM Check Dam V Kali Jari.

8.2. Saran

1. Untuk pengoperasian generator induksi beroperasi sendiri dan pengoperasian kerja paralel generator induksi dengan generator sinkron, disarankan untuk melakukan perhitungan kapasitansi kapasitor eksitasi yang digunakan secara tepat sehingga kebutuhan daya reaktif generator induksi dapat dipenuhi.
2. Dalam penelitian yang menggunakan beban resistif seperti elemen setrika, disarankan untuk memasang elemen setrika diantara dua plat besi (*heat sink*) sehingga panas akan merata pada masing-masing beban elemen setrika dan elemen setrika tidak mudah putus.

DAFTAR PUSTAKA

- Bala, Jr., Electromechanical Energy Devices and Power System, John Wiley and Sons, Inc., Singapore.
- Boldea, I, Nasar, Syed A., 2001, The Induction Machine Handbook, CRC Press LLC, Florida.
- Budiono, Gatut, Purwanto, Edi, 2002, Generator Induksi Dengan Berpenguatan Sendiri Menggunakan Kapasitor Paralel, Saintek No. 6 Volume 2
- Chapman, Stephen J., 1991, Electric Machines Fundamental, Mc.Graw Hill, New York.
- 2002, Electric Machinery and Power System Fundamentals, Mc.Graw Hill Companies, Inc., New York.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, Charles, Jr., Laramore, Sthepen D., 2003, Electric Machinery 6th edition, Mc. Graw Hill Inc., New York.
- Kadir, Abdul, 1983, Mesin Tak Serempak, Penerbit Djambatan, Jakarta.
- Kostenko, M., Piotrovsky, L., Electrical Machines, Part Two, Peace Publishers, Moscow.
- Magarisawa, Mabuchi, Ts. Mhd. Soelaiman, 1995, Mesin tak serempak dalam praktek, Pradnya Paramita, Jakarta.
- Mc. Pherson, George, 1981, An Introduction to Electrical Machines and Transformers, Jhon Wiley and Sons, Inc., New York.
- Laramore, Robert D., 1990, An Introduction to Electrical Machines and Transformers, 2nd edition, John Wiley and Sons, Inc., Singapore.
- Nasar, Syed A., 1995, Electric Machines and Power Systems Volume 1 Electric Machines international edition, Mc. Graw Hill, USA.
- Nurani, Isa, 2006, Studi Analisis Pengoperasian Generator Induksi Penguatan Sendiri pada Kecepatan Rendah, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- Santoso, Hari, Chairuzzaini, Soemarwanto, Herry P., Mahfudz S, 1992, Pengaruh Operasi Paralel Generator Induksi dengan Generator Sinkron terhadap Perubahan Tegangan dan Frekuensi, Universitas Brawijaya, Malang.
- Sawhney A.k., 1990, A Course Electrical Machines Desaign, Dhanpat Rai and Sons, Delhiy Jullundur.
- Sen, P. C., 1989, Principles of Electric Machines and Power electronics, John Wiley and Sons, New York.

- Siskind, Charles S., 1968, *Electrical Machines Direct and Alternating Current* 2nd edition, Mc. Graw Hill Book Company, Auckland.
- Slemon, Gordon R., 1992, *Electrical Machines and Drives*, Addison-Wesley Publishing Company.
- Stevenson, William D., 1983, *Analisis Sistem Tenaga*, Jilid I, terjemahan Budiono Mismail, Lembaga Penerbitan Universitas Brawijaya, Malang.
- Theodore R. Bosela, 2003, *Electrical System Design*, Pearson Education, New Jersey.
- Thomas, Handrian, 2005, *Evaluasi Konversi Energi pada PLTM Check Dam V Kali Jari Kabupaten Blitar*, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- Wasito, 1996, *Kamus Elektronika Inggris-Indonesia*, Gramedia Pustaka Utama
- Wibisono, Irwansyah Teguh, 2006, *Rekonfigurasi Jaringan Distribusi untuk Meminimalkan Rugi-rugi Daya Nyata Menggunakan Metode Sensitivitas*, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- Wildi, Theodore, 2001, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems* 2nd edition, Prentice Hall International, USA.
- Zuhal, 1991, *Dasar Tenaga Listrik*, Penerbit ITB, Bandung.



Tabel 7.2. Data hasil pengujian pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron 15 kVA

Daya beban (W)			C (μF)	Putaran (rpm)			Frek (Hz)	Tegangan fasa (V)			Arus G. Induksi (A)				Arus G. Sinkron (A)				Arus Kapasitor (A)				Arus Beban (A)		
R	S	T		Turbin	GI	GS		V_R	V_S	V_T	I_R	I_S	I_T	I_N	I_R	I_S	I_T	I_N	I_R	I_S	I_T	I_N	I_R	I_S	I_T
700	700	700	53	280	1505	1440	49.5	185	185	185	3.2	3.1	3.2	1.3	1.5	1.4	1.3	1	2.6	2.5	2.5	0.7	2.1	2	1.9
1400	1400	1400	53	280	1505	1420	50	185	185	185	3.2	3.4	2.9	1	2.7	2.8	2.9	1.4	2.2	2.6	2.7	1.2	4.6	4.4	4.4
2100	2100	2100	53	290	1510	1480	50.5	180	180	180	5.2	6	5.9	1.4	3.2	3.2	3	1.5	2.4	2.2	2.8	1.4	6.7	7	6.9

Sumber: Hasil pengujian

A)
I_N
0.2
0.2
1.2



Lampiran 1. Parameter mesin induksi 22 kW dan 3 kW

Data hasil pengukuran parameter mesin induksi 22 kW; 380/220 V; 1485 rpm; 50 Hz; 38 A; $\cos \phi$ 0, 86 hubungan Δ/Y .

1. Hasil pengukuran resistansi stator

Tabel L-1.1 Hasil pengukuran resistansi dc mesin induksi 22 kW

V_{dc} (V)	I_{dc} (A)
2	6

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} = \frac{2}{2 \cdot 6} = 0,167 \Omega$$

2. Hasil pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi tanpa beban

Tabel L-1.2 Hasil pengukuran parameter mesin induksi 22 kW dengan kondisi tanpa beban

V_{tb} (V)	I_{tb} (A)	$P_{tb}/fasa$ (W)	n_{tb} (rpm)
220	15,26	1100	1499

$$R_{tb} = R_1 = 0,167 \Omega$$

$$Z_{tb} = \frac{V_{tb}}{I_{tb}} = \frac{220}{15,26} = 14,42 \Omega$$

$$X_{tb} = \sqrt{Z_{tb}^2 - R_{tb}^2} = \sqrt{(14,42)^2 - (0,167)^2} = 14,42 \Omega / fasa$$

3. Hasil pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi rotor ditahan

Tabel L-1.3 Hasil pengukuran parameter mesin induksi 22 kW dengan kondisi rotor ditahan

V_{br} (V)	I_{br} (A)	$P_{br}/fasa$ (W)
38	35	357

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{I_{br}} = \frac{38}{35} = 1,085 \Omega$$

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{I_{br}^2} = \frac{357}{35^2} = 0,291 \Omega / fasa$$

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^2 - R_{br}^2} = \sqrt{(1,085)^2 - (0,291)^2} = 1,045 \Omega / fasa$$

Mesin kelas B

$$X_{br} = X_1 + X_2$$

$$X_1 = 0,4 X_{br} = 0,4 \times 1,045 = 0,418 \Omega$$

$$X_2 = 0,6 X_{br} = 0,6 \times 1,045 = 0,627 \Omega$$

$$R_1 = R_{tb} = 0,167 \Omega$$

$$R_2 = R_{br} - R_1 = 0,291 - 0,167 = 0,124 \Omega$$

$$X_m = X_{tb} - X_1 = 14,42 - 0,418 = 14,002 \Omega$$

Data hasil pengukuran parameter mesin induksi 3 kW; 380/220 V; 1410 rpm; 50 Hz; 7,0/12 A; cos ϕ 0,83 hubungan Δ/Y .

1. Hasil pengukuran resistansi stator

Tabel L-1.4 Hasil pengukuran resistansi dc mesin induksi 3 kW

V_{dc} (V)	I_{dc} (A)
10,5	2,5

$$R_1 = \frac{V_{dc}}{2I_{dc}} = \frac{10,5}{2 \cdot 2,5} = 2,1 \Omega$$

2. Hasil pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi tanpa beban

Tabel L-1.5 Hasil pengukuran parameter mesin induksi 3 kW dengan kondisi tanpa beban

V_{tb} (V)	I_{tb} (A)	$P_{tb}/fasa$ (W)	n_{tb} (rpm)
220	3,5	150	1499

$$R_{tb} = R_1 = 2,1 \Omega$$

$$Z_{tb} = \frac{V_{tb}}{I_{tb}} = \frac{220}{3,5} = 62,857 \Omega$$

$$X_{tb} = \sqrt{Z_{tb}^2 - R_{tb}^2} = \sqrt{(62,857)^2 - (2,1)^2} = 62,822 \Omega / fasa$$

3. Hasil pengukuran parameter mesin induksi dengan kondisi rotor ditahan

Tabel L-1.6 Hasil pengukuran parameter mesin induksi 22 kW dengan kondisi rotor ditahan

V_{br} (V)	I_{br} (A)	$P_{br}/fasa$ (W)
44	6	162,5

$$Z_{br} = \frac{V_{br}}{I_{br}} = \frac{44}{6} = 7,333 \Omega$$

$$R_{br} = \frac{P_{br}}{I_{br}^2} = \frac{162,5}{6^2} = 4,514 \Omega / fasa$$

$$X_{br} = \sqrt{Z_{br}^2 - R_{br}^2} = \sqrt{(7,333)^2 - (4,514)^2} = 5,779 \Omega / fasa$$

Motor kelas B

$$X_{br} = X_1 + X_2'$$

$$X_1 = 0,4 \times X_{br} = 0,4 \times 5,779 = 2,3116 \Omega$$

$$X_2' = 0,6 \times X_{br} = 0,6 \times 5,779 = 3,4674 \Omega$$

$$R_1 = R_{tb} = 2,1 \Omega$$

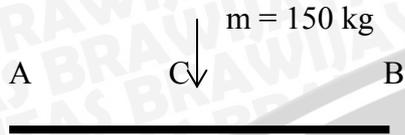
$$R_2' = R_{br} - R_1 = 4,514 - 2,1 = 2,414 \Omega$$

$$X_m = X_{tb} - X_1 = 62,822 - 2,3116 = 60,5104 \Omega$$

Lampiran 2. Perhitungan kekuatan bahan casis generator induksi

Berat Beban (Generator) = 150 kg

Panjang maksimum pangkon 1000 mm



$$\begin{aligned} F &= m \cdot g \\ &= 150 \cdot 10 \\ &= 1500 \text{ N} \end{aligned}$$

Karena ditopang oleh 2 profil maka :

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \cdot 1500 \text{ N} \\ &= 750 \text{ N} \end{aligned}$$

$$M_A = M_B = 0$$

$$\begin{aligned} R_A = R_B &= \frac{1}{2} \cdot F \\ &= \frac{1}{2} \cdot 750 \text{ N} \\ &= 375 \text{ N} \end{aligned}$$

Momen bending (M_C)

$$\begin{aligned} M_C &= R_A \cdot x - F \cdot x \\ &= 375 \cdot 500 - 750 \cdot 0 \\ &= 187500 \text{ Nmm} \end{aligned}$$

Tegangan bending (σ_b)

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

dimana : M_b : Momen bending = M_C

W_b : Tahanan bengkok. (Diketahui dari tabel bahan)

Untuk profil (besi siku 50x50x5) = $7,32 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$



$$\sigma_b = \frac{187500 Nmm}{732 \cdot 10^3 mm^3}$$

$$\sigma_b = 25,6147 N/mm^2$$

Tegangan tarik (σ_t)

Besar tegangan tarik yang diijinkan adalah

$$\sigma_{t \text{ ijin}} = \frac{\sigma_b}{0,58}$$

$$\sigma_{t \text{ ijin}} = 44,16 N/mm^2$$

Karena beban (generator) merupakan beban dinamis maka besarnya faktor keamanan

(Sf) = $5 \frac{s}{a} 8$. Diambil Sf = 8

$$\sigma_t = \sigma_{t \text{ ijin}} \times Sf$$

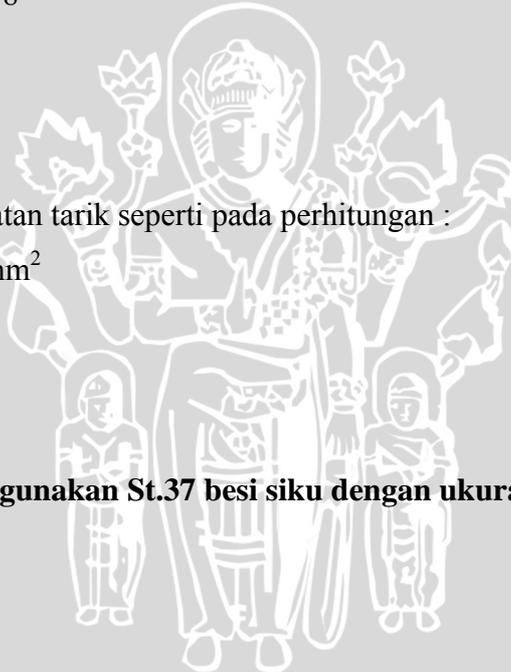
$$\sigma_t = 353,2 N/mm^2$$

Dicari bahan dengan kekuatan tarik seperti pada perhitungan :

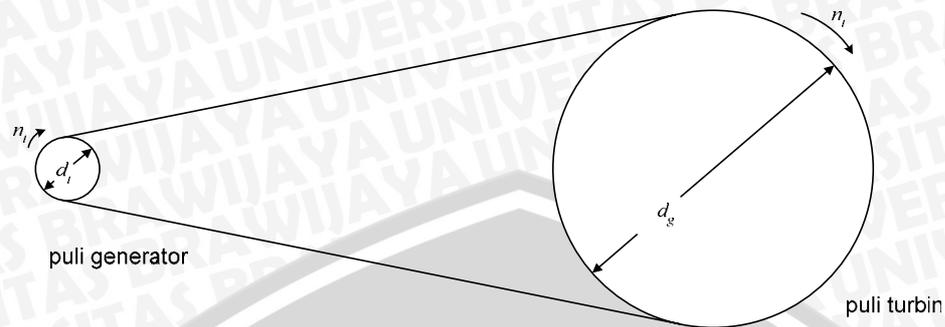
St.37 → kekuatan 370 N/mm²

$$\sigma_t < 370 N/mm^2$$

Jadi bahan profil yang digunakan St.37 besi siku dengan ukuran 50x50x5 mm



Lampiran 3. Penentuan ukuran puli



Gambar L-2.1. Gambar transmisi mekanik sabuk dan puli

Diameter puli generator induksi dapat ditentukan dari persamaan:

$$d_g = d_t \times \frac{n_t}{n_g}$$

dengan : d_g = diameter puli mesin induksi

d_t = diameter puli turbin

n_g = kecepatan putaran mesin induksi yang dibutuhkan

n_t = kecepatan putaran turbin

Untuk pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator beroperasi sendiri dibutuhkan pengadaan puli pada sisi generator. Puli pada sisi turbin menggunakan puli yang sudah ada, yang digunakan oleh generator sinkron 15 kVA dengan diameter 25 inci. Turbin pada PLTM Check Dam V Kali Jari memiliki spesifikasi putaran sebesar 300 rpm. Putaran sinkron mesin induksi 22 kW sebesar 1520 rpm. Untuk mendapatkan kecepatan putaran rotor induksi sedikit lebih tinggi dari kecepatan sinkron yang diasumsikan 1520 rpm, dibuat puli pada sisi generator dengan diameter sebesar:

$$d_g = d_t \times \frac{n_t}{n_g}$$

$$d_g = 20 \times \frac{300}{1520}$$

$$d_g = 3,95 \text{ inci}$$

Jadi untuk mengikuti jenis puli pada sisi turbin yang telah ada, digunakan puli 4 alur diameter 4 inci, dengan melakukan pembubutan sebelumnya pada alur sabuk setebal 0,05 inci.

Untuk operasi kerja paralel generator induksi 3 kW dengan generator sinkron 15 kVA pada PLTM Check Dam V Kali Jari dibutuhkan pengadaan puli pada sisi generator dan sisi turbin. Putaran sinkron mesin induksi 22 kW sebesar 1500 rpm. Agar beroperasi pada mode generator kecepatan putaran rotor mesin induksi dibuat sedikit lebih tinggi daripada kecepatan sinkronnya, diasumsikan 1510 rpm. Jika direncanakan puli pada sisi generator dengan diameter 15 inci, maka besar diameter puli pada sisi generator induksi adalah:

$$d_g = d_t \times \frac{n_t}{n_g}$$

$$d_g = 15 \times \frac{300}{1510}$$

$$d_g = 2,98 \text{ inci}$$

Jadi puli pada sisi turbin digunakan puli 2 alur berdiameter 15 inci. Puli pada sisi generator digunakan puli 2 alur diameter 3 inci.



Lampiran 4. Perhitungan kapasitansi kapasitor eksitasi

Dengan mengacu pada dasar teori, maka nilai kapasitansi kapasitor sebagai sumber daya reaktif pada kedua pengujian yang terdapat pada Bab VII dapat ditentukan melalui perhitungan berikut ini:

1. Pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri.

Pada kondisi tanpa beban, reaktansi magnetisasi generator X_m sama dengan reaktansi kapasitif X_c . Nilai X_m didapatkan dari pengukuran parameter pada Lampiran I. Untuk mesin induksi 22 kW, nilai $X_m = 14 \Omega$. Sehingga kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan pada kondisi generator tanpa beban atau kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan generator C_{tb} adalah:

$$C_{tb} = \frac{1}{2\pi f X_m}$$

$$C_{tb} = \frac{1}{2 \times \pi \times 50 \times 14,002}$$

$$= 227,33 \mu\text{F}$$

Beban jaringan listrik Dusun Jari merupakan beban yang relatif setimbang. Pada masing-masing fasa masih sepenuhnya belum setimbang, tetapi masih dapat dianggap relatif setimbang sebab toleransinya tidak melebihi 424,089 VA atau 5 % (Wibisono, 2006:36).

Pada awal pengoperasian generator beban dianggap terdiri atas beban penerangan saja. Pada fasa R, besarnya daya reaktif beban Q_l pada keadaan ini adalah 729,725 var.

Sesuai perencanaan dasar teori dan dasar perencanaan perhitungan pada Bab V, arus yang melalui kapasitor I_c adalah

$$I_c = \frac{Q_l}{V_c}$$

$$I_c = \frac{729,725}{220}$$

$$= 3,317 \text{ A}$$

Nilai reaktansi kapasitif beban X_{cl} adalah

$$X_{cl} = \frac{V_c}{I_c}$$

$$X_{cl} = \frac{220}{3,316}$$

$$= 66,34 \Omega$$

Nilai kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan untuk mensuplai daya reaktif beban (C_b) adalah

$$C_b = \frac{1}{2\pi f X_{cl}}$$

$$C_b = \frac{1}{2 \times \pi \times 50 \times 66,34}$$

$$= 47,99 \mu\text{F}$$

Sehingga nilai kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan untuk operasi generator induksi beroperasi sendiri adalah

$$C = C_{ib} + C_b$$

$$C = 227,33 + 47,99$$

$$C = 275,32 \mu\text{F}$$

Untuk keadaan beban berikutnya merupakan beban penerangan ditambah dengan beban peralatan listrik lainnya seperti televisi atau radio. Pada fasa R, besarnya daya reaktif beban Q_l pada keadaan ini adalah 1243,71 var. Dengan cara perhitungan yang sama diperoleh nilai kapasitansi kapasitor C yang dibutuhkan

$$C = C_{ib} + C_b$$

$$C = 227,33 + 81,79$$

$$C = 309,12 \mu\text{F}$$

Besar daya reaktif dan kapasitansi kapasitor eksitasi yang diperlukan oleh fasa R, fasa S dan fasa T untuk beberapa keadaan beban ditunjukkan oleh Tabel L-4.1.

Tabel L-4.1. Kapasitansi kapasitor pengujian generator induksi beroperasi sendiri pada beberapa keadaan beban

Keadaan beban	Fasa R				Fasa S				Fasa T			
	P_{beban} (watt)	Q_l (var)	C_b (μF)	C (μF)	P_{beban} (watt)	Q_l (var)	C_l (μF)	C_b (μF)	P_{beban} (watt)	Q_l (var)	C_b (μF)	C (μF)
Tanpa beban	0	0	0	227,33	0	0	0	227,33	0	0	0	227,33
Beban penerangan	761,45	729,73	47,99	275,32	813,27	779,38	51,21	278,54	809,02	775,31	50,95	278,28
Beban penerangan dan beberapa peralatan listrik	1297,8	1243,71	81,79	309,12	1307,6	1253,11	82,37	309,70	1304	1249,7	82,15	309,48
Beban puncak	1840,4	1763,76	115,61	342,94	1822	1746,06	114,58	341,91	1812,1	1736,63	113,83	341,16

Sumber: Hasil perhitungan

Dari Tabel L-4.1 didapatkan bahwa kapasitansi kapasitor yang harus ditambahkan dari keadaan beban nol ke keadaan beban penerangan adalah 47,99 μF . Kapasitansi kapasitor yang dirancang tidak sama dengan hasil perhitungan. Hal ini disebabkan karena sulitnya mendapatkan kapasitansi kapasitor yang sesuai dengan hasil perhitungan. Untuk itu nilai kapasitansi kapasitor yang digunakan, didapatkan secara pendekatan dengan menghubungkan beberapa kapasitor baik dalam hubungan seri maupun paralel. Kapasitansi kapasitor yang ditambahkan ketika terjadi penambahan beban pada fasa R, fasa S dan fasa T dari hasil perhitungan dan pendekatan ditunjukkan oleh Tabel L-4.2. Kapasitor fasa R, fasa S dan fasa T dihubungkan bintang.

Tabel L-4.2. Pendekatan kapasitansi kapasitor pengujian generator induksi beroperasi sendiri pada beberapa keadaan beban

Keadaan beban	Kapasitansi kapasitor (μF)					
	Fasa R		Fasa S		Fasa T	
	Kebutuhan		Kebutuhan		Kebutuhan	
	Perhitungan	Pendekatan	Perhitungan	Pendekatan	Perhitungan	Pendekatan
Tanpa beban	227,33	227,25	227,33	227,25	227,38	227,25
Beban penerangan	275,37	277,25	278,54	277,25	278,28	277,25
Beban penerangan dan beberapa peralatan listrik	309,12	312,75	309,7	312,75	309,48	312,75
Beban puncak	342,94	343,75	341,91	343,75	341,16	343,75

2. Pengujian pengoperasian mesin induksi 3 kW yang dioperasikan sebagai generator induksi dan diparalel dengan generator sinkron 15 kVA

Nilai kapasitansi kapasitor yang digunakan pada pengujian ini disiapkan untuk memenuhi kebutuhan daya rektif mesin induksi 3 kW yang dioperasikan sebagai

generator induksi. Oleh karena itu dengan mengacu pada dasar teori, nilai kapasitansi didapatkan pada kondisi generator induksi beroperasi tanpa beban, reaktansi magnetisasi generator X_m sama dengan reaktansi kapasitif X_c . Nilai X_m didapatkan dari pengukuran parameter pada Lampiran I. Untuk mesin induksi 3 kW, nilai $X_m = 60,5104 \Omega$. Sehingga kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan pada kondisi generator tanpa beban atau kapasitansi kapasitor yang dibutuhkan generator C_{tb} adalah:

$$C_{tb} = \frac{1}{2\pi f X_m}$$

$$C_{tb} = \frac{1}{2 \times \pi \times 50 \times 60.5104}$$

$$= 52,60 \mu\text{F}$$

Jadi nilai kapasitor yang digunakan, didapatkan secara pendekatan sebesar 53 μF .



Lampiran 5. Perhitungan penambahan kapasitor

Pada pengujian mesin induksi 22 kW yang dioperasikan sebagai generator induksi beroperasi sendiri tanpa beban, diperlukan penambahan kapasitor agar tegangan pada terminal generator sebesar 220 volt. Perhitungan kapasitor yang harus ditambahkan adalah sebagai berikut:

Arus yang melalui kapasitor adalah:

$$\frac{175}{13,7} = \frac{220}{I_c}$$

$$I_c = \frac{220}{175} \times 13,7$$

$$= 17,2 \text{ A}$$

sehingga reaktansi kapasitifnya:

$$X_c = \frac{220}{17,2}$$

$$= 12,7 \Omega$$

Kapasitansi kapasitor yang harus terhubung paralel dengan generator induksi adalah

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

$$= \frac{1}{2 \times 3,14 \times 50 \times 12,7}$$

$$= 249 \mu\text{F}$$

Jadi kapasitansi yang harus ditambahkan pada tiap fasa adalah 21 μF . Dengan demikian kapasitansi kapasitor tiap fasa yang sebelumnya sebesar 227,25 μF menjadi 248,25 μF .

Dengan penambahan kapasitansi pada keadaan tanpa beban menyebabkan kapasitansi kapasitor pada keadaan beban yang lain semakin besar, sehingga tegangan generator pada keadaan beban yang lain semakin besar.

Lampiran 6. Data kapasitor yang digunakan dalam pengujian

Tabel L-6.1 Data kapasitor yang digunakan dalam pengujian

No	Kapasitor	Jumlah
1.	Marcon SH Capacitor F40AM FL 205 WI 75 μ F 400 W VAC	2
2.	DRE SH Capacitor CAP 50 MFD WV 400 VAC	1
3.	MF Capacitor CAP 30 MFD WV 450 VAC WYSS	2
4.	Samsung SH Capacitor SH-M 450 W VAC 15 μ F(U) 915012	1
5.	DCC MF Capacitor CAP 8 MFD WV 450 VAC	1
6.	JIC MF Capacitor CAP 16 μ F WV 250 VAC	2
7.	MAXIM CAPACITOR 30 MFD 250 WVAC	2
8.	SAMSUNG SH CAPACITOR SH-M 450 WVAC 9 μ F (U) 50/60 Hz 6B3A042	1
9.	ARCOTRONICS 12765C3 MKP 25 μ F \pm 5% 50 Hz -25 +85 ⁰ C 400 V- HPFNT 450 V-HPFPU	3
10.	XING YUAN CBB61 5,5 μ F \pm 5% 250 VAC-50/60 Hz -40/70 ⁰ C	4
11.	ESSAY Electric MF Capacitor 4,5 MFD/ 250 VAC untuk TL 220 V 20W	6
12.	Rubycon CBB61 ANT 2 μ F \pm 5% 400 VAC	1
13.	Rubycon CBB61 4 μ F \pm 5% 400VAC -25/70 ⁰ C	2
14.	Rubycon CBB61 ANT 3,5 μ F \pm 5% 400 VAC	58
15.	NATIONAL CB 125 400 VAC 4 μ F (J)	1
16.	General Electric Dielektrol Capacitor Z 97F5461 15 μ F \pm 10% 370VAC 60 Hz Protected P923 C10000AFC 88-182626 MARS- 12070	9
17.	MP CAP 350 VAC 4 μ F MATSUSHITA ELECTRIC T77K	7
18.	DRE SH Capacitor CAP 6 MFD WV 400 VAC	4
19.	μ C Michion 25 μ F \pm 5% 370/400 VAC 50/60 Hz SH Capacitor 25/085/21 Non PCB Protected 10000 AFC PAL-4JJ025	6
20.	Rubycon CBB61 ANT 4,5 μ F \pm 5% 400VAC	18
21.	Rubycon CBB61 ANT 12 μ F \pm 5% 250 VAC	2

Lampiran 7. Foto obyek pengujian



Gambar L-7.1. Casis generator induksi



Gambar L-7.2. Pemasangan generator induksi pada casis



Gambar L-7.3. Penempatan generator induksi 22 kW dan 3 kW pada PLTM Check Dam V Kali Jari



Gambar L-7.4. Kapasitor eksitasi generator induksi



Gambar L-7.5. Beban resistif berupa elemen setrika



Gambar L-7.6. Pengukuran frekuensi dan tegangan



Gambar L-7.7. Pengujian pengoperasian mesin induksi 22 kW sebagai generator induksi beroperasi sendiri



Gambar L-7.8. Pengujian pengoperasian mesin induksi 3 kW sebagai generator induksi yang diparalel dengan generator sinkron 15 kVA

