MOTOR INDUKSI TIGA FASA YANG DIPERGUNAKAN SEBAGAI GENERATOR DENGAN BEBAN *STEADY STATE* DAN DINAMIK

Skripsi

diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Sarjana Pendidikan Program Studi Pendidikan Teknik Elektro

Oleh

Anang Tri Nugroho

NIM.5301415020

PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG
2020

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama	: Anang Tri Nugroho
NIM	: 5301415020
Program Studi	: Pendidikan Teknik Elektro
Judul Skripsi	: Motor Induksi Tiga Fasa Yang Dipergunakan Sebagai Generator Dengan Beban *Steady State* Dan Dinamik

Skripsi/TA ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian Skripsi/TA Program Studi Pendidikan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang

Semarang, Januari 2020

Pembimbing

Drs. Agus Murnomo, M. T.

NIP. 195506061986031001

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul "Motor Induksi Tiga Fasa Yang Dipergunakan Sebagai Generator Dengan Beban *Steady State* Dan Dinamik" telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik UNNES pada tanggal ..... November 2019.

Oleh

Nama	: Anang Tri Nugroho
NIM	: 5301415020
Program Studi	: Pendidikan Teknik Elektro, S1

Panitia

Ketua	Sekretaris
Ir. Ulfa Mediaty Arief M.T., IPM	Drs. Ir. Sri Sukamta, M.Si., IPM
NIP. 196605051998022001	NIP. 196708181992031004

Penguji I	Penguji II	Penguji III/Pembimbing
Drs. Sutarno, M.T.	Drs. Djoko Adi Widodo, M.T.	Drs. Agus Murnomo, M.T.
NIP. 195510051984031001	NIP. 195909271986011001	NIP. 195506061986031001

Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik UNNES

Dr. Nur Qudus, M.T., IPM
NIP. 196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi/TA ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana, magister, dan/atau doktor), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Skripsi ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam skripsi ini ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskan dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidak benaran dalam pernyataan ini, maka bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gellah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, 7 Januari 2020

Yang membuat pernyataan,

Anang Tri Nugroho

NIM. 5301415020

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO

1. Tidak berjalan mundur sebelum melangkah, jika sudah melangkah lakukanlah yang terbaik.
2. Anglaras ilining banyu, ngeli ning ojo keli

PERSEMBAHAN

1. Keluarga dan kedua Orang Tua saya yang selalu mendoakan yang terbaik untuk anaknya.
2. Teman-teman seperjuangan khususnya rombel 1 PTE angkatan 2015
3. Almamater Unnes.

SARI ATAU RINGKASAN

Nugroho, Anang Tri. 2019. Motor Induksi Yang Dipergunakan Sebagai Generator Dengan Beban *Steady State* Dan Dinamik. Drs. Agus Murnomo, M.T. Program Studi Pendidikan Teknik Elektro.

Energi listrik merupakan kebutuhan pokok bagi masyarakat Indonesia pada saat ini. Selama ini kebutuhan listrik Indonesia paling banyak disuplai dari pembangkit yang menggunakan bahan bakar fosil terutama batu bara. Sedangkan sumber energi yang dapat diperbaharui masih belum dimanfaatkan secara maksimal seperti energi air, surya dan angin. Pembangkit listrik yang memanfaatkan energi terbarukan salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMh). Umumnya PLTMh terdiri dari tiga komponen salah satunya adalah generator. Penggunaan generator sebagai pembangkit listrik banyak memanfaatkan kerja dari motor induksi. Motor induksi yang sering dipakai adalah motor induksi tiga fasa karena harganya lebih murah, banyak tersedia di pasaran dan minim pemeliharaan. Namun ada beberapa kelemahan dari motor induksi yang difungsikan sebagai generator salah satunya adalah tegangan keluaran yang sangat terpengaruh oleh besarnya beban. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dari besarnya beban terhadap tegangan keluaran generator.

Penelitian ini menggunakan metode penelitian eksperimen. Penelitian ini dilakukan dengan dua pengujian yaitu pengujian beban nol dan berbeban dengan tiga variasi kapasitor eksitasi. Pengujian beban nol untuk mengetahui tegangan maksimal yang dihasilkan generator. Pengujian berbeban untuk mengetahui berapa *drop* tegangan generator ketika diberi beban. Beban yang dipakai berupa beban resistif, induktif dan kapasitif.

Berdasarkan hasil penelitian, pengujian dengan kapasitor sebesar 30 µF menghasilkan tegangan 326 Volt di putaran 1135 rpm, kapasitor 35 µF menghasilkan tegangan 291 Volt di putaran 1072 rpm dan kapasitor 45 µF menghasilkan tegangan sebesar 265 Volt di putaran 1050 rpm. Ketika beban disambung, tegangan keluaran akan menurun secara signifikan.

Kata kunci: PLTMh, generator, tegangan, beban.

PRAKATA

Puji syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan kasih sayang-Nya kepada kita, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan waktu, dengan judul "Motor Induksi Tiga Fasa Yang Dipergunakan Sebagai Generator Dengan Beban *Steady State* Dan Dinamik" Skripsi ini disusun sebagai salah satu persayaratan meraih gelar Sarjana Pendidikan pada Program Studi S1 Pendidikan Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang. Shalawat dan salam disampaiakan kepada Nabi Muhammad SAW,mudah-mudahan kita semua mendapatkan syafaat-Nya di yaumil akhir nanti. Amin.

Penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis sampaikan rasa terimakasih sedalam-dalamnya kepada:

1. Dr. Nur Qudus, M.T., IPM. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
2. Ir. Ulfah Mediaty Arief, M.T., IPM. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro dan Ketua Program Studi Pendidikan Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang.
3. Drs. Agus Murnomo, M.T. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan dan bimbingan.
4. Drs. Sutarno, M.T. selaku dosen penguji I yang telah memberikan masukan berupa saran, perbaikan dan tanggapan dalam penelitian ini.

5. Drs. Djoko Adi Widodo, M.T. selaku dosen penguji II yang telah memberikan masukan berupa saran, perbaikan dan tanggapan dalam penelitian ini.
6. Semua dosen Jurusan Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan yang berharga.
7. Kedua orang tua yang telah mendoakan, memberikan dukungan serta restunya kepada penulis sehingga skripsi ini dapat selesai dengan baik.
8. Rekan-rekan Pendidikan Teknik Elektro Rombel 1 Angkatan 2015 yang telah memberikan dukungan dan motivasinya kepada penulis.
9. Teman-teman DPM FT Unnes yang selalu memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis.
10. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam penyusunan skripsi ini yang tidak bisa penulis sebutkan semuanya.

Semarang, Januari 2020

Anang Tri Nugroho

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i

PERSETUJUAN PEMBIMBING iii

PENGESAHAN iv

PERNYATAAN KEASLIAN v

MOTTO DAN PERSEMBAHAN vi

SARI ATAU RINGKASAN vii

PRAKATA viii

DAFTAR ISI x

DAFTAR TABEL xiii

DAFTAR GAMBAR xv

DAFTAR LAMPIRAN xvi

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Identifikasi Masalah 3

1.3. Pembatasan Masalah 3

1.4. Rumusan Masalah 4

1.5. Tujuan Penelitian 4

1.6. Manfaat Penelitian 5

BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 6

2.1. Kajian Pustaka 6

2.2. Landasan Teori 9

2.2.1. Motor Induksi Tiga Fasa 9
2.2.1.1. Konstruksi Motor Tiga Fasa 10
2.2.1.2. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi 18
2.2.2. Generator Induksi 26
2.2.2.1. Konstruksi Generator Induksi 28
2.2.2.2. Prinsip Kerja Generator Induksi 29
2.2.2.3. Jenis-Jenis Generator Induksi 29
2.2.3. Kapasitor 33
2.2.3.1. Pemasangan Kapasitor 34
2.2.3.2. Kapasitansi Kapasitor 35
2.2.4. Motor Induksi Sebagai Generator 38
2.2.4.1. Syarat Pengoperasian Motor Induksi Sebagai Generator 39
2.2.5. Jenis Beban 41
BAB III METODE PENELITIAN 42
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian 42
3.2. Desain Penelitian 42
3.3. Alat dan Bahan Penelitian 43
3.4. Parameter Penelitian 44
3.5. Teknik Pengumpulan Data 45
3.6. Rangkaian Pengujian 48
3.7. Teknik Analisis Data 52

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Deskripsi Data 53

4.1.1. Pengujian Beban Nol 53

4.1.2. Pengujian Berbeban 54

4.2. Analisis Data 60

4.2.1. Pengujian Beban Nol 60

4.2.2. Pengujian Berbeban 62

4.3. Pembahasan 66

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Kesimpulan 70

5.2. Saran 71

DAFTAR PUSTAKA 72

LAMPIRAN 75

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Hasil Pengujian Beban Nol Motor Induksi yang dipergunakan sebagai Generator 48

Tabel 3.2 Data Hasil Pengujian Beban Resistif Motor Induksi yang dipergunakan sebagai Generator 50

Tabel 3.3 Data Hasil Pengujian Beban Induktif Motor Induksi yang dipergunakan sebagai Generator 51

Tabel 3.4 Data Hasil Pengujian Beban Kapasitif Motor Induksi yang dipergunakan sebagai Generator 51

Tabel 4.1 Pengujian Dengan Beban Nol 53

Tabel 4.2 Pengujian Dengan Beban Bersifat Resistif 54

Tabel 4.3 Pengujian Dengan Beban Bersifat Induktif 56

Tabel 4.4 Pengujian Dengan Beban Bersifat Kapasitif 58

Tabel 5.1 *Nameplate* Motor induksi sebagai generator 70

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konstruksi Motor Tiga Fasa 10

Gambar 2.2 Konstruksi Stator 11

Gambar 2.3 Konstruksi Rotor Sangkar 12

Gambar 2.4 Konstruksi Rotor Belitan 12

Gambar 2.5 Susunan Lilitan atau Koil Stator 13

Gambar 2.6 Diagram Fasor Fluks Tiga Fasa Seimbang 14

Gambar 2.7 (a) Medan Putar pada Motor Induksi 14

(b) Arah Medan Putar Motor Induksi 14

Gambar 2.8 Rangkaian Ekivalen Stator Per-Fasa Motor Induksi 18

Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen Per-Fasa Rotor Motor Induksi 20

Gambar 2.10 Rangkaian Ekivalen Rotor Motor Induksi 22

Gambar 2.11 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Fasa 23

Gambar 2.12 Rangkaian ekivalen per-fasa motor induksi dengan bagian rangkaian rotor dinyatakan terhadap sisi stator (a) dengan tahanan konstan $\frac{R2}{s}$, (b) dengan tahanan variabel R_2 $(\frac{1}{s} - 1)$ 23

Gambar 2.13 Rangkaian Ekivalen Per-Fasa Motor Induksi Tanpa Rugi Inti ... 24

Gambar 2.14 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi 25

Gambar 2.15 Kurva Karakteristik Torsi-Kecepatan Mesin Induksi pada Berbagai Daerah Operasi 27

Gambar 2.16 Generator Induksi Beroperasi Sendiri dengan Bank Kapasitor .. 30

Gambar 2.17 (a) Kurva Magnetisasi Generator Induksi 31

(b) Plot Karakteristik Tegangan-Arus Bank Kapasitor 31

(c) Tegangan Terminal Tanpa Beban untuk Generator Induksi . 31

Gambar 2.18 Karakteristik Tegangan-Arus Terminal Generator Induksi untuk Beban dengan Faktor Daya *Lagging* yang Konstan 32

Gambar 2.19 Hubungan Bintang dan Segitiga pada Kapasitor Eksitasi 34

Gambar 2.20 Generator Induksi Terhubung ke Jaringan Tiga Fasa 40

Gambar 2.21 Generator Induksi Beroperasi Sendiri 40

Gambar 3.1 Rangkaian Motor Induksi Sebagai Generator 42

Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian 46

Gambar 3.3 Rangkaian Pengujian Beban Nol Motor Induksi yang dipergunakan sebagai Generator 48

Gambar 3.4 (a) Rangkaian Pengujian Beban Resistif Motor Induksi yang dipergunakan sebagai Generator 49

(b) Rangkaian Pengujian Beban Induktif Motor Induksi yang dipergunakan sebagai Generator 49

(c) Rangkaian Pengujian Beban Kapasitif Motor Induksi yang dipergunakan sebagai Generator 50

Gambar 4.1 Karakteristik Tegangan Dengan Kapasitansi Kapasitor..... 60

Gambar 4.2 Karakteristik Putaran Generator Dengan Kapasitansi Kapasitor .. 61

Gambar 4.3 Karakteristik Kapasitansi Kapasitor Dengan Frekuensi Generator62

Gambar 4.4 Karakteristik Tegangan Generator Dengan Beban Resistif 63

Gambar 4.5 Karakteristik Tegangan Generator Dengan Beban Induktif..... 64

Gambar 4.6 Karakteristik Tegangan Generator Dengan Beban Kapasitif..... 65

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Perhitungan Nilai Kapasitor 75

Lampiran 2. *Nameplate* Motor Induksi 3 Fasa dan Kapasitor 76

Lampiran 3. Rangkaian MSIG 77

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan kebutuhan pokok bagi masyarakat Indonesia pada saat ini. Dapat diketahui bahwa hampir semua kegiatan manusia tidak lepas dari peran dan fungsi listrik terutama untuk kebutuhan di sektor rumah tangga, usaha dan industri. Setiap tahun, kebutuhan energi listrik di Indonesia mengalami peningkatan yang signifikan (Kementerian ESDM, 2018). Namun, kebutuhan listrik tersebut belum diimbangi dengan daya listrik yang dibangkitkan sehingga masih banyak daerah yang belum teraliri listrik. Selama ini kebutuhan listrik Indonesia paling banyak disuplai dari pembangkit yang menggunakan bahan bakar fosil, salah satunya yaitu pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) yang menggunakan bahan bakar batubara yaitu sebesar 30.208 MW atau 50% lebih dari total kapasitas pembangkit dalam negeri sebesar 60.789 MW (Kementerian ESDM, 2018). Sedangkan sumber energi yang dapat diperbaharui masih belum dimanfaatkan secara maksimal seperti energi air, surya dan angin.

Pembangkit listrik yang memanfaatkan energi terbarukan salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMh). Pembangkit listrik tenaga mikro hidro (PLTMh) merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan aliran air sungai yang ditahan oleh bendungan, dimana bendungan tersebut memiliki ketinggian tertentu yang membuat air memiliki energi potensial yang dapat menggerakkan turbin sehingga energi potensial dapat ditransformasikan menjadi

energi mekanik dan kemudian diubah menjadi energi listrik oleh generator (Iwan Ridwansyah dkk, 2015). PLTMh beroperasi seperti layaknya pembangkit listrik tenaga air (PLTA) namun daya keluarannya lebih kecil dengan kapasitas kurang dari 200 kilo Watt (Budi Triyono dkk, 2014). PLTMh sangat cocok dikembangkan di daerah pedesaan dengan daerah aliran sungai yang sempit (Imam, 2015). Pada umumnya, PLTMh terdiri dari tiga komponen utama yaitu air sebagai sumber utama, turbin untuk mengubah energi potensial menjadi energi mekanik dan generator untuk mengubah menjadi energi listrik (Handry dan Medilla, 2018). Salah satu komponen utama pembangkit mikrohidro yaitu generator. Generator adalah mesin pembangkit listrik (Bagia dan Parsa, 2018). Generator akan mengubah energi mekanik dari aliran air yang memutar turbin menjadi energi listrik.

Penggunaan generator sebagai pembangkit listrik banyak memanfaatkan kerja dari motor induksi. Motor induksi yang sering dipakai adalah motor induksi tiga fasa karena harganya lebih murah dibandingkan motor induksi satu fasa, banyak tersedia di pasaran dan biaya operasional yang rendah serta minim pemeliharaan. Namun ada beberapa kelemahan dari motor induksi yang difungsikan sebagai generator salah satunya adalah tegangan keluaran yang sangat terpengaruh oleh besarnya beban (Singh, 2017). Motor induksi dapat difungsikan sebagai generator induksi tetapi hanya untuk daya-daya yang kecil saja karena daya keluarannya sangat dipengaruhi oleh besarnya beban (Berlianti, 2015). Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, penggunaan beban dalam penelitian

hanya beban yang bersifat resistif saja belum sampai ke beban yang bersifat induktif dan kapasitif.

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan tersebut, penulis akan melakukan penelitian mengenai motor induksi yang difungsikan sebagai generator dengan penambahan uji beban yang berupa beban resistif, induktif dan kapasitif yang berjudul **"Motor Induksi Tiga Fasa yang dipergunakan sebagai Generator dengan Beban *Steady State* dan Dinamik"**.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka identifikasi masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. PLTMh banyak memanfaatkan kerja motor induksi untuk dijadikan sebagai generator.
2. Pemilihan motor induksi tiga fasa sebagai generator karena lebih murah dan banyak tersedia di pasaran dibandingkan motor induksi satu fasa.
3. Tegangan keluaran dari motor induksi sebagai generator sangat dipengaruhi oleh besarnya nilai beban.
4. Penelitian mengenai motor induksi sebagai generator hanya dengan penambahan beban bersifat resistif saja.

1.3 Pembatasan Masalah

Agar isi dari penelitian ini tidak terlalu luas serta tetap pada sasaran dan tujuan, penulis memberikan batasan masalah yang akan dibahas. Adapun batasan masalahnya sebagai berikut:

1. Menggunakan motor induksi tiga fasa satu PK 0,75 kW.

2. Rugi-rugi pada motor induksi diabaikan.
3. Motor induksi yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa rotor sangkar (*squirrel cage*).
4. Kapasitor yang digunakan sebagai penyedia daya reaktif untuk arus eksitasi merupakan kapasitor dengan nilai yang mendekati perhitungan.
5. Beban *steady state* adalah beban dalam keadaan tunak atau konstan.
6. Beban dinamik adalah beban dalam keadaan pertama kali disambungkan.
7. Kapasitor dihubungkan secara delta.
8. Beban yang digunakan adalah beban resistif berupa lampu pijar, induktif berupa kipas angin dan kapasitif berupa kapasitor.
9. Pengambilan data dilakukan berdasarkan peralatan yang tersedia di laboratorium Jurusan Teknik Elektro UNNES.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dapat dirumuskan masalah yaitu bagaimana merubah motor induksi yang dipergunakan sebagai generator dengan penambahan beban *steady state* dan dinamik berupa beban resistif, induktif dan kapasitif?

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini berdasarkan rumusan masalah di atas adalah untuk mengetahui kapasitas atau spesifikasi motor induksi yang dipergunakan sebagai generator dengan penambahan beban *steady state* dan dinamik berupa beban resistif, induktif dan kapasitif.

1.6 Manfaat Penelitian

Setelah selesainya penelitian ini diharapkan memberikan manfaat kepada pihak-pihak yang membutuhkan, manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah memberikan informasi kepada pembaca mengenai kapasitas atau spesifikasi motor induksi yang dipergunakan sebagai generator dengan penambahan beban *steady state* dan dinamik berupa beban resistif, induktif dan kapasitif.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

1. Kajian Pustaka

Hakim (2017) yang menguji motor induksi tiga fasa sebagai generator memperoleh hasil kesimpulan bahwa motor induksi sebagai generator menggunakan kapasitor sebesar 40 µF pada tiap fasa yang dirangkai secara delta sudah menghasilkan tegangan fasa ke fasa. Hasil penelitian yang diperoleh lainnya adalah kondisi beban resistif berupa lampu pijar saat pengujian motor induksi sebagai generator sangat dipengaruhi oleh frekuensi. Semakin tinggi frekuensi yang dihasilkan maka lampu pijar akan semakin terang dan semakin rendah frekuensi yang dihasilkan maka lampu akan semakin redup.

Rosi (2016) menganalisa kinerja motor induksi tiga fasa sebagai generator induksi satu fasa dengan variasi beban menjelaskan bahwa mesin induksi tiga fasa dapat berfungsi sebagai generator satu fasa dengan penambahan dua buah kapasitor sebagai perbaikan faktor daya. Efisiensi daya yang dihasilkan oleh generator juga mengalami peningkatan seiring meningkatnya beban. Pada beban 100 Watt 14,4 %, beban 200 Watt 22,7%, beban 300 Watt 26,4%, beban 400 Watt 28,6%, beban 500 Watt 31,9 dan beban 600 Watt sebesar 35,0%. Motor induksi mampu menyuplai hingga beban 600 Watt dengan efisiensi daya 35,0%.

Berlianti (2015) dalam penelitannya yang menganalisis motor induksi tiga fasa sebagai generator dengan variasi hubungan kapasitor untuk eksitasi menyimpulkan bahwa penggunaan motor induksi sebagai generator hanya untuk

daya-daya kecil saja karena tegangan keluaran sangat dipengaruhi besarnya beban. Selain itu juga diperoleh data bahwa untuk hubungan kapasitor delta dan C-2C pada tegangan konstan memiliki putaran dibawah putaran sinkron. Selanjutnya, untuk memperoleh tegangan konstan 220 V 50 Hz digunakan hubungan kapasitor bintang dengan nilai kapasitor yang telah ditentukan.

Supardi dkk. (2015) dalam penelitiannya yang berjudul "Karakteristik Keluaran Generator Induksi 1 Fase Pada Sistem Pembangkit Pikohidro" menyimpulkan ukuran kapasitor mempengaruhi kecepatan putar, tegangan dan frekuensi generator induksi. Kesimpulan lain yang diperoleh adalah daya beban juga akan mempengaruhi kecepatan putar, tegangan dan frekuensi generator induksi. Ketika daya beban semakin membesar maka kecepatan putar, tegangan dan frekuensi akan semakin rendah.

Ion dan Marinescu (2013) yang meninjau tentang operasi generator induksi tiga fasa untuk menyuplai beban satu fasa mendapatkan kesimpulan yang pertama masalah utama dalam pengoperasian generator induksi tiga fasa untuk suplai satu fasa adalah ketidakseimbangan fasa. Topologi penyeimbangan fasa yang paling banyak digunakan adalah hubungan kapasitor C-2C dan Fukami. Kedua, jumlah kapasitor yang digunakan sebagai arus eksitasi bervariasi untuk hubungan bintang dan segitiga dengan penentuan nilainya berdasarkan perhitungan yang mendekati nilai kapasitas yang ada. Ketiga, untuk operasi sistem yang seimbang dapat menggunakan bantuan rangkaian elektronika daya seperti *Electronic Load Control* (ELC).

Sibuea (2011) menganalisa karakteristik motor induksi tiga phasa sebagai generator dan menyimpulkan nilai kapasitor yang digunakan sebagai eksitasi mempengaruhi tegangan keluaran dari generator induksi. Hasil percobaan motor induksi sebagai generator yang telah dilakukan juga diketahui bahwa besar tegangan keluaran generator dipengaruhi oleh nilai kapasitor eksitasi. Ketika besar nilai kapasitor eksitasi dibawah nilai minimum maka tegangan keluaran yang dihasilkan adalah dibawah tegangan nominalnya begitu juga sebaliknya. Kedua, apabila putaran generator dijaga konstan maka frekuensi yang dihasilkan juga akan konstan. Kesimpulan lainnya adalah penambahan beban akan mengakibatkan tegangan keluaran generator mengalami penurunan.

Hutagaol (2010) melakukan penelitian mengenai karakteristik tegangan dan efisiensi dari motor induksi tiga fasa sebagai generator memperoleh hasil jika putaran *prime mover* konstan, nilai kapasitor eksitasi mempengaruhi tegangan keluaran generator. Semakin besar nilai kapasitor eksitasi maka tegangan keluaran juga semakin besar. Semakin cepat putaran prime mover maka frekuensi yang dihasilkan juga semakin tinggi yang menyebabkan tegangan keluaran akan semakin besar. Efisiensi yang dihasilkan akan semakin baik ketika beban yang terpasang semakin besar.

Persamaan penelitian yang akan dilakukan dengan penelitian yang sudah dilakukan diatas adalah sama-sama akan meneliti tentang motor induksi sebagai generator induksi. Sedangkan perbedaan dari penelitian yang akan dilakukan dengan penelitian sebelumnya adalah penelitian di atas hanya menghitung daya keluar dari generator dan menghitung efisiensi daya ketika adanya beban,

sedangkan pada penelitian ini akan menganalisa tegangan keluar dari generator saat diberi penambahan beban *steady state* dan dinamik berupa beban resistif, induktif dan kapasitif. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan dari motor induksi tiga fasa yang dipergunakan sebagai generator untuk menyuplai berbagai jenis beban yang bersifat *real* di masyarakat berupa beban resistif, induktif dan kapasitif karena pada penelitian-penelitian sebelumnya hanya meneliti jenis beban yang bersifat resistif saja.

2. Landasan Teori

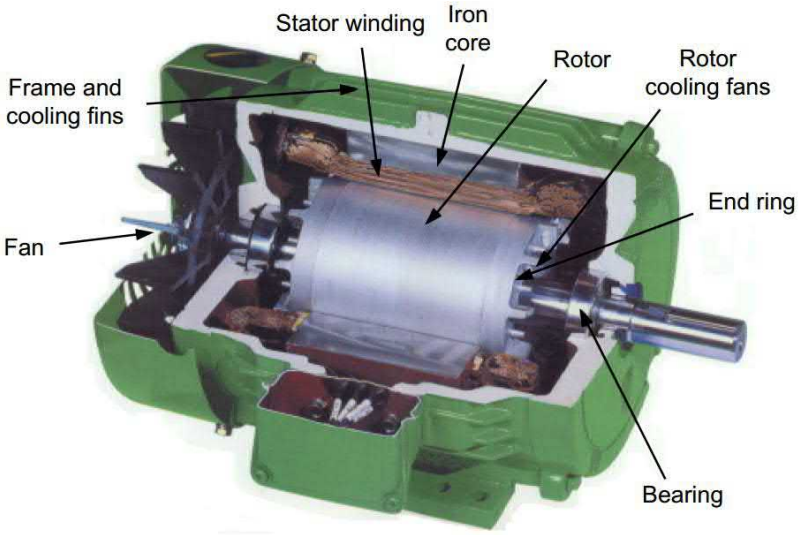
2.2.1 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak balik (AC) yang paling luas dan umum digunakan dalam era modern seperti sekarang ini. Penamaan tersebut berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. Motor induksi sangat banyak digunakan di dalam kehidupan sehari-hari baik di industri maupun di rumah tangga. Motor induksi yang umum dipakai adalah motor induksi 3 fasa dan motor induksi 1 fasa. Motor induksi 3 fasa dioperasikan pada sistem tenaga 3 fasa dan banyak digunakan di dalam berbagai bidang industri dengan kapasitas yang besar. Motor induksi 1 fasa dioperasikan pada sistem tenaga 1 fasa dan banyak digunakan terutama untuk peralatan rumah tangga seperti kipas angin, lemari es, pompa air,

mesin cuci dan sebagainya karena motor induksi 1 fasa mempunyai daya keluaran yang rendah (Bagia dan Parsa, 2018: 34-35).

2.2.1.1 Konstruksi Motor Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik jenis lainnya. Motor induksi tiga fasa memiliki dua bagian utama, yaitu stator yang merupakan bagian yang diam, dan rotor sebagai bagian yang berputar. Antara bagian stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang sempit, dengan jarak berkisar dari 0,4 mm sampai 4 mm. Bagian lainnya dalam motor tiga fasa adalah kipas sebagai pendingin motor dan bearing seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1 (Chapman, 2005: 380).



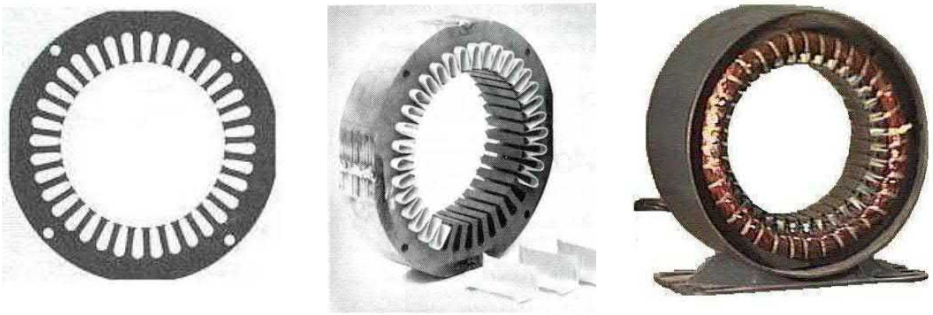
Gambar 2.1 Konstruksi Motor Tiga Fasa 2017

(Sumber: Electric Motor Control)

1. Stator

Bagian stator terdiri dari rangka atau *frame*, inti stator dan belitan. Rangka luar dari stator biasanya terbuat dari baja maupun alumunium, sedangkan bagian intinya berupa lapisan-lapisan yang terbuat dari baja silikon untuk mengurangi

rugi-rugi histerisis dan *eddy current*. Pada inti stator terdapat rongga (slot) yang berisolasi sebagai tempat belitannya. Kawat belitannya terbuat dari tembaga yang berisolasi. Belitan stator digulung untuk jumlah kutub tertentu, yang diperlukan dalam menentukan kecepatan. Semakin banyak jumlah kutub maka semakin rendah kecepatan motor. Kumparan (*coil*) dari konduktor-konduktor yang terisolasi ini kemudian disisipkan ke dalam slot-slot tersebut. Sehingga grup dari kumparan ini beserta dengan inti yang mengelilinginya membentuk rangkaian elektromagnetik. Banyaknya jumlah kutub dari motor induksi tergantung pada hubungan internal dari belitan stator, yang mana bila belitan ini disuplai dengan sumber tegangan tiga fasa maka akan membangkitkan medan putar.



Gambar 2.2 Konstruksi Stator

(Sumber: Electric Motor Control)

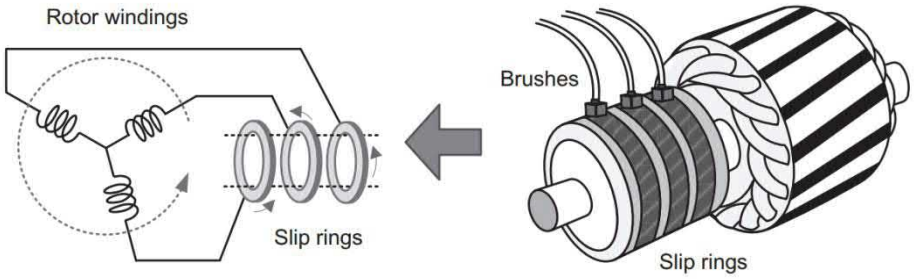
2. Rotor

Rotor adalah bagian yang berputar di dalam motor. Terdapat dua jenis rotor dalam motor induksi tiga fasa yaitu rotor sangkar (*squirrel cage rotor*) dan rotor belitan (*wound rotor*). Rotor sangkar terdiri dari susunan batang konduktor yang dibentangkan ke dalam slot-slot yang terdapat pada permukaan rotor dan setiap ujungnya dihubung singkat dengan menggunakan *shorting rings* atau *end*

rings. Konstruksi rotor sangkar dapat dilihat pada Gambar 2.3. Sementara itu pada rotor belitan, rotornya dibentuk dari satu set belitan tiga fasa yang merupakan bayangan dari belitan statornya. Biasanya belitan tiga fasa dari rotor ini terhubung bintang (Y), kemudian setiap ujung dari tiga kawat rotor tersebut diikatkan pada *slip rings* yang berada pada poros rotor. Pada motor induksi rotor belitan, rangkaian rotornya dirancang untuk dapat disisipkan dengan tahanan eksternal, dimana hal ini akan memberikan keuntungan dalam memodifikasi karakteristik torsi-kecepatan dari motor itu sendiri. Jenis rotor belitan harganya lebih mahal daripada jenis rotor sangkar dan membutuhkan perawatan lebih. Konstruksi rotor belitan dapat dilihat pada Gambar 2.4 (Chapman, 2005: 380-382).

Gambar 2.3 Konstruksi Rotor Sangkar

(Sumber: Electric Motor Control)



Gambar 2.4 Konstruksi Rotor Belitan

(Sumber: Electric Motor Control)

3. Prinsip Medan Putar

Ketika sumber tiga fasa dihubungkan ke terminal tiga fasa motor induksi, maka arus bolak-balik sinusoidal I_R, I_S, I_T akan mengalir pada belitan stator seperti pada Gambar 2.5. Arus-arus ini akan menghasilkan ggm (gaya gerak magnet) pada kumparan, sehingga akan menghasilkan fluks magnetik yang berputar disebut juga dengan medan putar. Medan magnet yang demikian kutub-kutubnya tidak diam pada posisi tertentu, tetapi meneruskan pergeseran posisinya di sekitar stator (Mehta, 2002).

Untuk melihat bagaimana medan putar dibangkitkan, maka dapat diambil contoh pada motor induksi tiga fasa dengan jumlah kutub dua. Fluks yang dihasilkan oleh arus-arus bolak-balik pada belitan stator adalah:

$\Phi_R = \Phi_m \sin \omega t$..... (2.1)

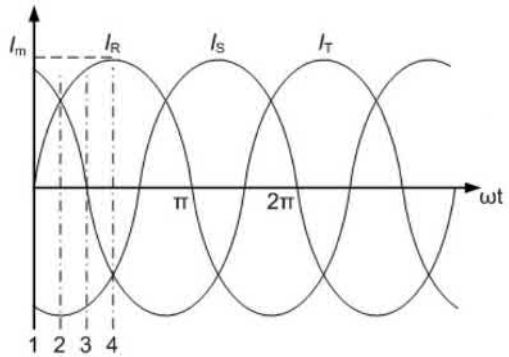
$\Phi_S = \Phi_m \sin (\omega t - 120^o)$..... (2.2)

$\Phi_T = \Phi_m \sin (\omega t - 240^o)$..... (2.3)

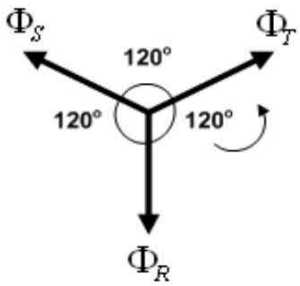
Dimana:

Φ = fluks magnetik

ωt = kecepatan sudut

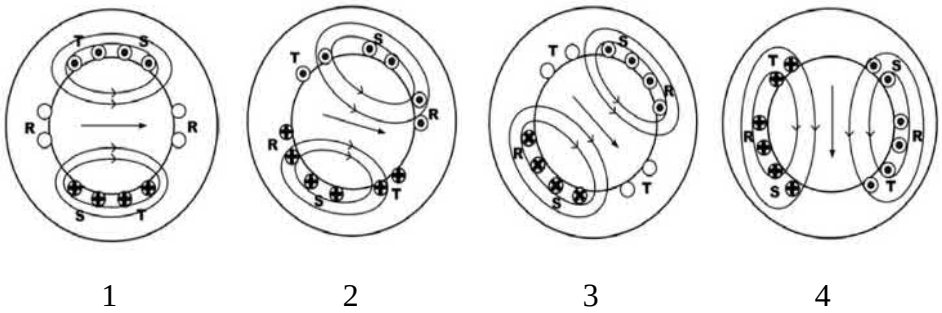


G or

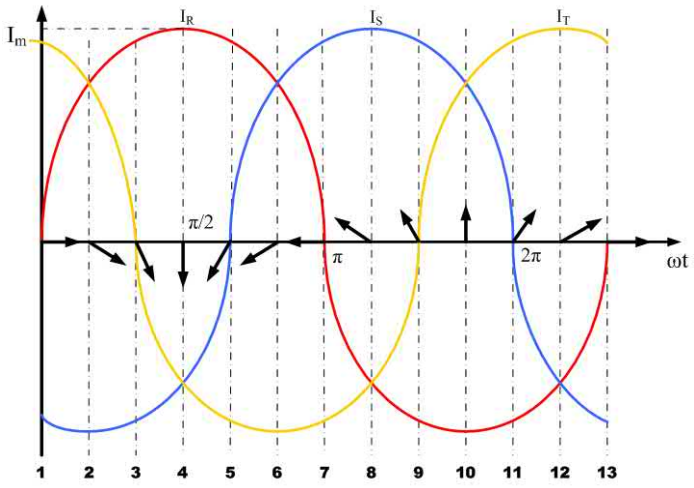


Gambar 2.6 Diagram Fasor Fluks Tiga Fasa Seimbang

(Sumber: Electric Motor Control)



(a)



(b)

Gambar 2.7 (a) Medan Putar Pada Motor Induksi, (b) Arah Medan Putar Motor Induksi Ditunjukkan Oleh Panah

(Sumber: Principles of Electrical Machines)

a. Kondisi 1

Pada keadaan 1 (gambar 2.5 dan 2.6), $\omega t = 0$; arus dalam fasa R bernilai nol sedangkan besarnya arus pada fasa S dan fasa T memiliki nilai yang sama dan arahnya berlawanan. Dalam keadaan seperti ini arus sedang mengalir ke luar dari konduktor sebelah atas dan memasuki konduktor sebelah bawah. Sementara resultan fluks yang dihasilkan memiliki besar yang konstan yaitu sebesar 1,5 Φm dan dibuktikan sebagai berikut:

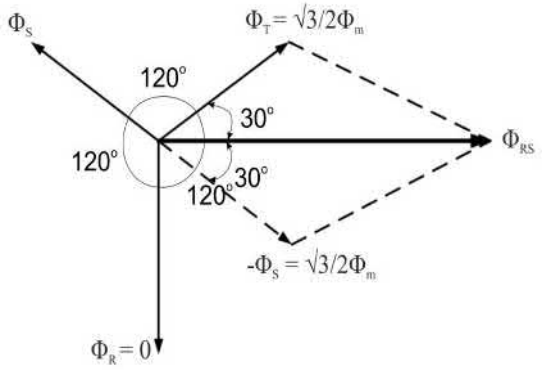
$\Phi_R = 0$

$\Phi_S = \Phi_m \sin(-120^o)$

$= -\sqrt{3}/2\ \Phi_m$

$\Phi_T = \Phi_m \sin(-240^o)$

$= \sqrt{3}/2\ \Phi_m$



Oleh karena itu resultan fluks Φ_{RS} adalah jumlah fasor dari Φ_T dan $-\Phi_S$, sehinngga resultan fluks:

$\Phi_{RS} = 2 \times \sqrt{3}/2\ \Phi_m \cos 30^o$

$= 1{,}5\ \Phi_m$

b. Kondisi 2

Pada keadaan 2, arus bernilai maksimum negatif pada fasa S, sedangkan pada R dan fasa T bernilai 0,5 maksimum pada fasa R dan fasa T, dan pada saat ini $\omega t = 30^o$, oleh karena itu fluks yang diberikan oleh masing-masing fasa:

$\Phi_R = \Phi_m \sin(30^o)$

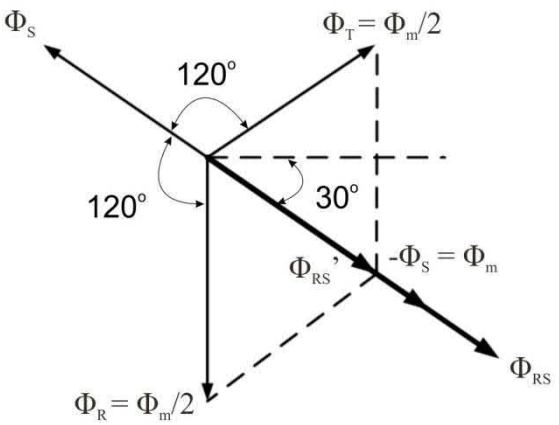
$= \Phi_m/2$

$\Phi_S \quad = \Phi_m \sin(-90^o)$

$\quad = -\Phi_m$

$\Phi_T \quad = \Phi_m \sin(-120^o)$

$\quad = \Phi_m/2$



Besarnya fluks resultan adalah (Φ_{RS})

Penjumlahan dari Φ_R, $-\Phi_S$, Φ_T

Penjumlahan dari Φ_R dan $-\Phi_S$ adalah:

$\Phi_{RS}' \quad = 2 \times \Phi_m/2 \cos 120^o/2$

$\quad = \Phi_m/2$

Jadi fluks resultannya adalah:

$\Phi_{RS} \quad = \Phi_m/2 + \Phi_m$

$\quad = 1.5\ \Phi_m$

c. Kondisi 3

Pada keadaan 3, arus pada fasa R dan fasa T memiliki besar yang sama dan arahnya berlawanan (0,866 Φm), oleh karena itu fluks yang diberikan oleh masing-masing fasa:

$\Phi_R \quad = \Phi_m \sin(60^o)$

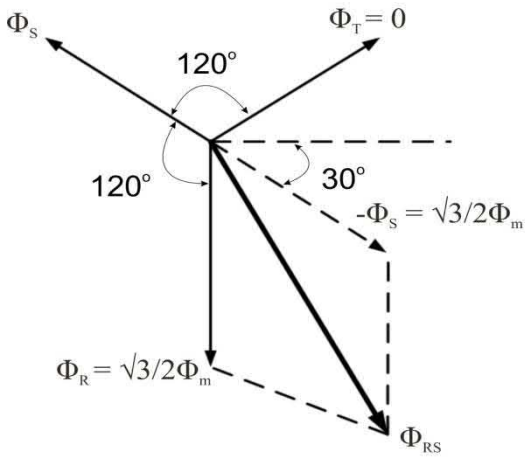
$\quad = \sqrt{3}/2\ \Phi_m$

$\Phi_S \quad = \Phi_m \sin(-60^o)$

$\quad = -\sqrt{3}/2\ \Phi_m$

$\Phi_T \quad = \Phi_m \sin(-180^o)$

$\quad = 0$



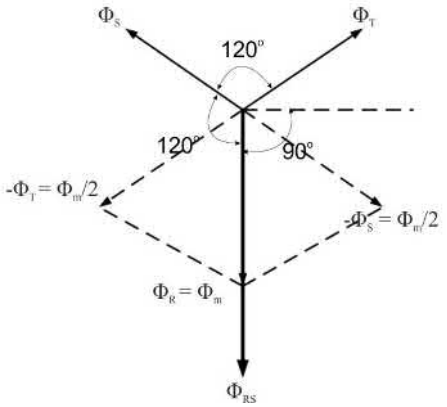
Resultan Fluksnya adalah penjumlahan dari Φ_R dan Φ_S:

Φ_{RS} $= 2 \times \sqrt{3}/2.\Phi_m \cos 60°/2$

$= 1,5\ \Phi_m$

d. Kondisi 4

Pada keadaan ini $\omega t = 90^o$, arus pada fasa R maksimum (positif), dan arus pada fasa S dan fasa T = 0,5 Φ_m, oleh karena itu fluks pada masing-masing fasa adalah:



Φ_R $= \Phi_m \sin (90^o)$

$= \Phi_m$

Φ_S $= \Phi_m \sin (-30^o)$

$= -\Phi_m/2$

Φ_T $= \Phi_m \sin (-150^o)$

$= \Phi_m/2$

Maka jumlah $-\Phi_T$ dan $-\Phi_S$ adalah:

$\Phi_{RS'}$ $= 2 \times \Phi_m/2 \cos 120^o/2$

$= \Phi_m/2$

Sehingga resultannya adalah:

Φ_{RS} $= \Phi_m/2 + \Phi_m$

$= 1,5\ \Phi_m$

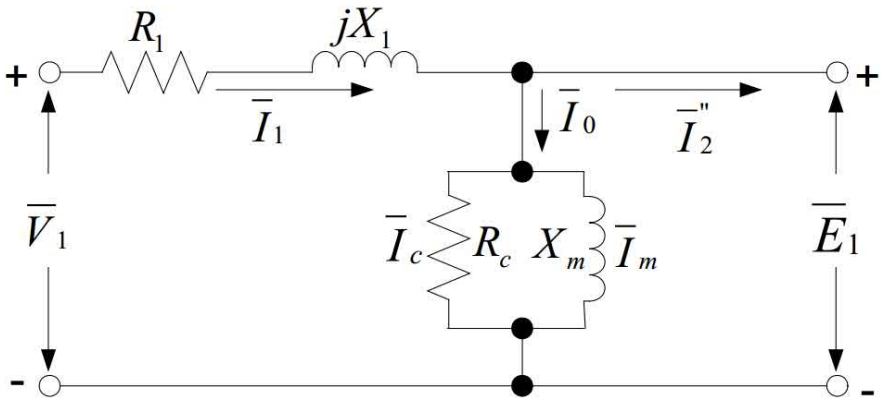
Pada saat 12 kali interval waktu medan magnet akan selesai berputar satu kali seperti pada gambar 2.7 (b). Proses ini akan berulang 60 kali setiap detik pada tegangan dengan frekuensi 60Hz.

2.2.1.2 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

Sebuah motor induksi serupa dengan sebuah transformator, sehingga rangkaian ekivalen motor induksi mirip dengan rangkaian ekivalen transformator. Perbedaannya terletak pada kumparan rotor dari motor induksi yang berputar, berfungsi untuk menghasilkan daya mekanik. Rangkaian ekivalen motor induksi dihasilkan dengan cara yang sama sebagaimana halnya pada transformator. Semua parameter-parameter rangkaian ekivalen yang akan dijelaskan berikut mempunyai nilai-nilai perfasa hal ini dimaksudkan untuk mempermudah analisis.

1. Rangkaian Ekivalen Stator

Putaran gelombang fluks pada celah udara membangkitkan ggl lawan tiga fasa yang seimbang $\bar{E}_1$ pada belitan stator. Rangkaian ekivalen stator, seperti gambar 2.8 berikut ini.



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen stator per-fasa motor induksi

(Sumber: Principles of Electric Machines)

Besarnya tegangan terminal stator $\bar{V}_1$ menjadi penjumlahan ggl lawan $\bar{E}_1$. $\bar{V}_1'$ (= $-\bar{E}_1$) dan jatuh tegangan pada impedansi bocor stator $\bar{I}_1(R_1 + jX_1)$, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\overline{V}_1 = \overline{E}_1 + \overline{I}_1(R_1 + jX_1) \qquad (2.4)$$

dimana:

$\overline{V}_1$ = tegangan terminal stator (Volt)

$\overline{E}_1$ = ggl lawan yang dihasilkan oleh fluks celah udara resultan (Volt)

$\overline{I}_1$ = arus stator (Ampere)

R_1 = tahanan efektif stator (Ohm)

jX_1 = reaktansi bocor stator (Ohm)

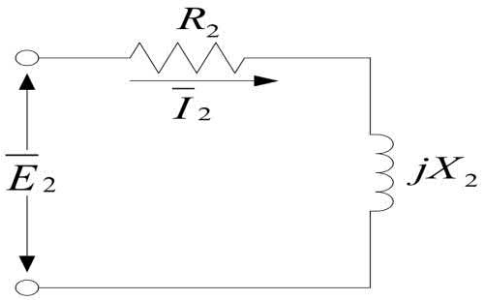
Sebagaimana halnya pada transformator, arus stator $\overline{I}_1$ terdiri dari dua komponen. Komponen pertama $\overline{I}''_2$ adalah komponen beban yang akan menghasilkan fluks yang akan melawan fluks yang dihasilkan oleh arus rotor. Komponen lainnya yaitu $\overline{I}_0$, arus $\overline{I}_0$ ini terbagi lagi menjadi dua komponen yaitu komponen rugi-rugi inti $\overline{I}_c$ yang sefasa dengan komponen rugi-rugi inti $\overline{E}_1$ dan komponen magnetisasi $\overline{I}_m$ yang menghasilkan fluks magnetik pada inti dan celah udara yang tertinggal 90° dari $\overline{E}_1$.

2. Rangkaian Ekivalen Rotor

Pada saat rotor dalam kondisi diam yaitu kondisi sesaat rotor sebelum bergerak, kecepatan relatif diantara putaran medan magnet dengan konduktor rotor adalah kecepatan sinkron Ns. Pada kondisi ini tegangan induksi yang dibangkitkan pada rangkaian rotor adalah $\overline{E}_2$, karena seluruh belitan rotor dihubung-singkat maka akan mengalir arus $\overline{I}_2$ akibat ggl induksi $\overline{E}_2$ pada rotor. Sehingga dapat dituliskan persamaannya sebagai berikut:

$$\overline{I}_2 = \frac{\overline{E}2}{R2 + jX2} \qquad (2.5)$$

Dari bentuk persamaan di atas, rangkaian ekivalen rotor perfasa dalam keadaan diam digambarkan seperti gambar berikut.



Gambar 2.9 Rangkaian ekivalen per-fasa rotor motor induksi

(Sumber: Principles of Electric Machines)

Dimana:

$\overline{I}_2$ = arus rotor dalam keadaan diam (Ampere)

$\overline{E}_2$ = ggl induksi rotor dalam keadaan diam (Volt)

R_2= resistansi rotor (Ohm)

jX_2= reaktansi rotor dalam keadaan diam (Ohm)

Setelah rotor berputar maka ggl rotor perfasa $\overline{E}_2$ dan reaktansi rotor perfasa X_2 masing-masing dipengaruhi oleh frekuensi, nilai reaktansi rotor dapat dijelaskan dari persamaan di bawah ini dimana nilainya tergantung dari induktansi dan frekuensi rotor.

$X_{2s} = \omega_r L_2 = 2\pi f_2 L_2$

Dengan: $f_2 = sf$, (2.6)

Maka:

$$X_{2s} = 2\pi s f L_2$$

$$= s(2\pi f L_2)$$

$$= sX_2 \quad (2.7)$$

Dengan demikian nilai $\overline{E}_2$ dan X_2 bergantung terhadap slip s, sementara nilai resistansi rotor perfasa R_2 tidak dipengaruhi oleh frekuensi sehingga tidak tergantung terhadap nilai slip s. Sehingga dari persamaan di atas dapat dibuat persamaannya menjadi:

$$\overline{I'}_2 = \frac{\overline{sE}\,2}{R2 + jsX2} \qquad (2.8)$$

Dengan membagi pembilang dan penyebut pada persamaan di atas dengan s, maka nilai arus rotor diperoleh seperti berikut:

$$\overline{I'}_2 = \frac{\overline{E}\,2}{\frac{R2}{s} + jX2} \qquad (2.9)$$

Nilai dari $\frac{R2}{s}$ sekarang lebih besar dari R_2 karena s memiliki nilai dalam bentuk pecahan. Untuk itu, $\frac{R2}{s}$ dapat dipecah menjadi sebuah bagian yang bernilai konstan R2 dan sebuah bagian yang variabel ($(\frac{R2}{s}) - R_2$), yaitu:

$$\frac{R2}{s} = \frac{R2}{s} + R_2 - R_2$$

$$\frac{R2}{s} = R_2 + R_2\left(\frac{1}{s} - 1\right) \qquad (2.10)$$

Bagian pertama R_2 merupakan tahanan rotor/fasa dan mewakilkan rugi tembaga. Bagian kedua $R_2\left(\frac{1}{s} - 1\right)$ merupakan sebuah beban tahanan-variabel. Daya yang dikirim ke beban ini mewakilkan daya mekanik keseluruhan yang dibangun di

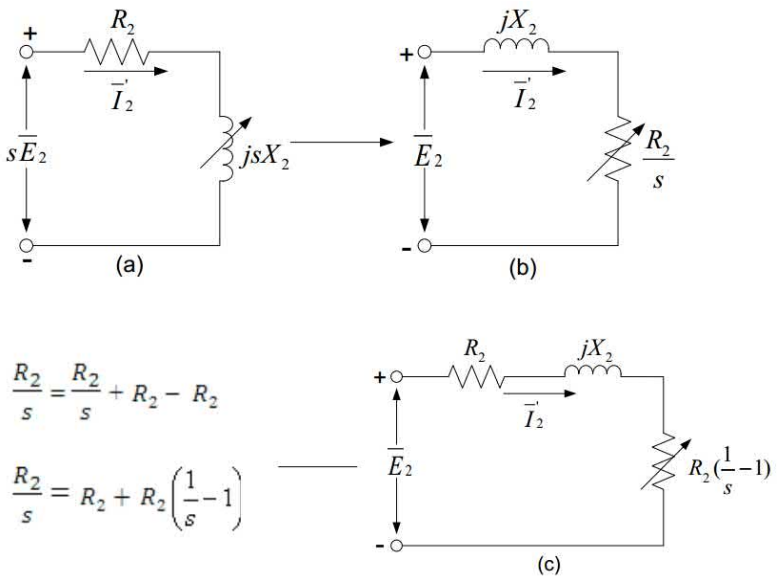
rotor. Untuk itu beban mekanik pada motor dapat digantikan dengan sebuah beban tahanan-variabel dengan nilai $R_2 (\frac{1}{s} - 1)$. Ini diketahui sebagai tahanan beban R_L.

$$R_L = R_2 (\frac{1}{s} - 1) \qquad (2.11)$$

Dengan demikian persamaan (2.9) dapat dirubah menjadi:

$$\overline{I'}_2 = \frac{\bar{E}2}{R2 + R2\,(\frac{1}{s} - 1) + jX2} \qquad (2.12)$$

Dari persamaan (2.8), (2.9), (2.10), (2.12) di atas maka dapat digambarkan rangkaian ekivalen rotor seperti gambar 2.10 di bawah ini:

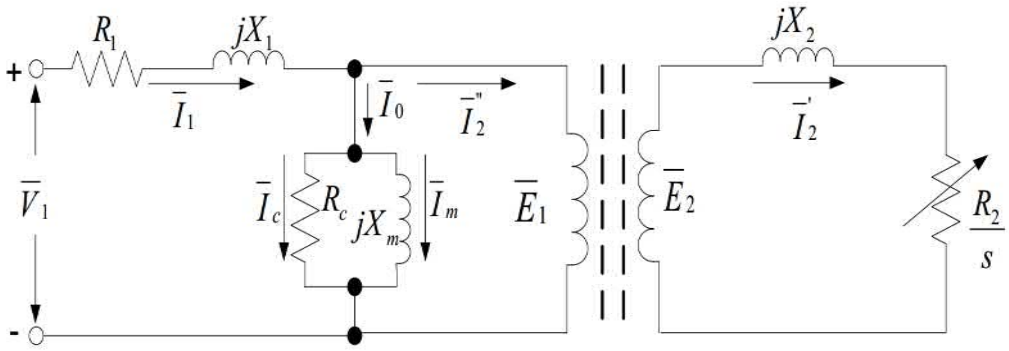


Gambar 2.10 Rangkaian Ekivalen Rotor Motor Induksi

(Sumber: Principles of Electric Machines)

3. Rangkaian Ekivalen Lengkap

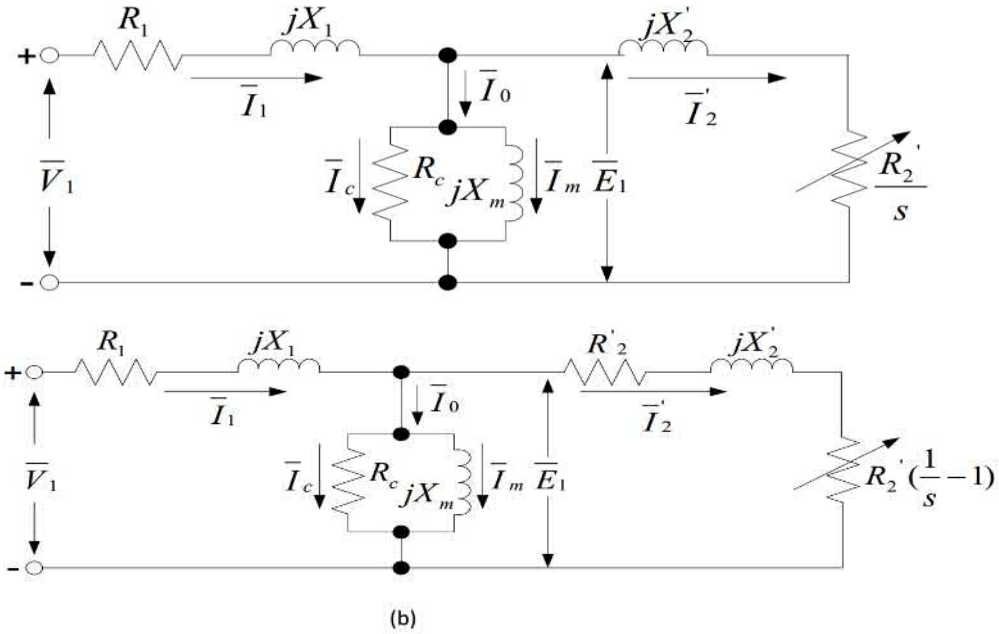
Dari penjelasan rangkaian ekivalen pada stator dan rotor di atas, maka dapat dibuat rangkaian ekivalen perfasa motor induksi tiga fasa pada masing-masing fasa, seperti halnya seperti rangkaian ekivalen sebuah transformator.



Gambar 2.11 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi Tiga Fasa

(Sumber: Principles of Electric Machines)

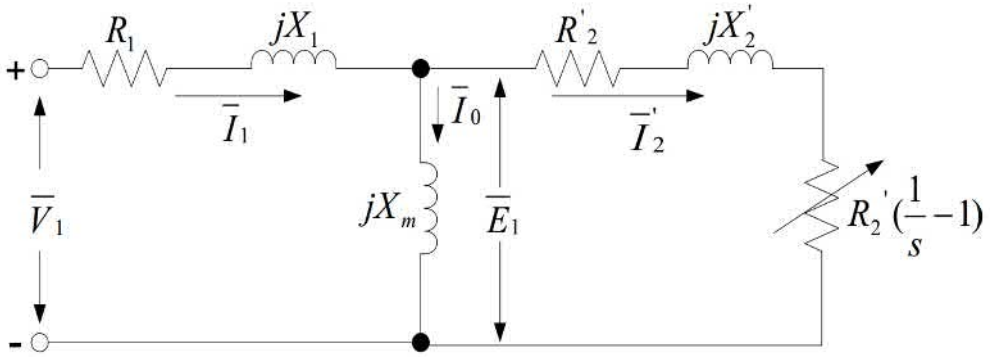
Untuk mempermudah perhitungan maka rangkaian ekivalen pada gambar di atas dapat dilihat dari sisi stator, seperti gambar rangkaian ekivalen berikut.



Gambar 2.12 Rangkaian ekivalen per-fasa motor induksi dengan bagian rangkaian rotor dinyatakan terhadap sisi stator (a) dengan tahanan konstan $\frac{R2}{s}$, (b) dengan tahanan konstan $\frac{R2}{s}$, (b) dengan tahanan variabel $R_2\left(\frac{1}{s}-1\right)$

(Sumber: Principles of Electric Machines)

Dibawah kondisi kerja normal pada tegangan dan frekuensi konstan, rugi inti pada motor induksi biasanya juga konstan. Dalam pandangan pada kenyataan ini, tahanan rugi inti R_c yang mewakili rugi inti motor, dapat dihilangkan dari rangkaian ekivalen motor induksi. Akan tetapi, untuk menentukan daya poros atau torsi poros, rugi inti yang konstan harus diikut-sertakan dalam pertimbangan, bersama dengan gesekan, rugi-rugi beban buta (*stray-load losses*) dan angin. Dengan penyederhanaan ini, maka dapat digambar rangkaian ekivalen baru (gambar 2.13) seperti berikut ini.

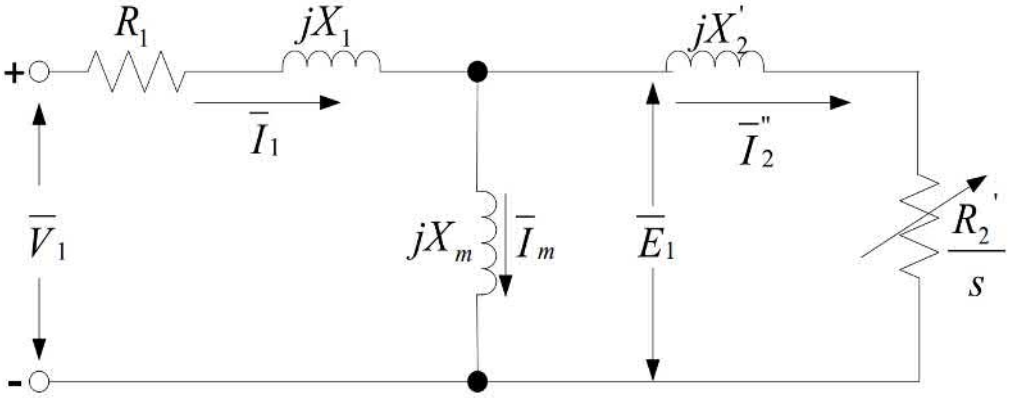


(Sumber: Principles of Electric Machines)

4. Analisis Rangkaian Ekivalen

Semua karakteristik kinerja motor induksi tiga fasa dapat ditentukan dari rangkaian ekivalennya. Dalam menganalisis rangkaian ekivalen sebuah transformator, bagian parallel dari rangkaian yang terdiri dari R_e dan $X_Ø$ dapat diabaikan atau menggeser bagian parallel tersebut ke arah terminal primer. Namun cara ini tidak diijinkan dalam menganalisis rangkaian ekivalen motor induksi. Hal ini dikarenakan kenyataan bahwa arus penguatan pada transformator berkisar antara 2% sampai 6% dari arus beban penuh dan juga reaktansi bocor primer per unitnya juga sangat kecil. Sedangkan pada motor induksi, arus penguatan berkisar

antara 30% sampai 50% dari arus beban penuh dan juga reaktansi bocor primer per unit cukup besar. Oleh sebab itu, apabila komponen parallel rangkaian ekivalen motor induksi diabaikan maka akan terdapat kesalahan yang besar dalam hal perhitungan daya dan torsi motor induksi.



Gambar 2.14 Rangkaian Ekivalen Motor Induksi

(Sumber: Principles of Electric Machines)

Dari gambar rangkaian ekivalen diatas, arus stator dan rotor juga impedansi dapat ditentukan seperti berikut.

$$Z_e = R_1 + jX_1 + \frac{jXm\,(\frac{R2}{s} + jX2)}{(\frac{R2}{s} + j(Xm + X2)} \qquad (2.13)$$

$$I_1 = R_1 + jX_1 + \frac{V1}{R1 + jX1 + \frac{jXm(\frac{R2}{s} + jX2)}{(\frac{R2}{s}) + j(Xm + X2)}} \qquad (2.14)$$

$$I_2'' = \frac{jXm}{\left(\frac{R2}{s}\right) + j(Xm + Xr)} \times I_1 \qquad (2.15)$$

Dari nilai arus stator dan rotor di atas maka daya celah udara dan torsi internal per fasa dapat ditentukan. Daya celah udara adalah daya yang ditransfer dari stator ke rotor sepanjang celah udara. Daya celah udara P_g dapat dituliskan seperti berikut.

$$P_g = I_2''^2 \times \frac{R2}{s} = \left(I_2''^2 \times R_2\right) + R_2\left(\frac{1-s}{s}\right) \qquad (2.16)$$

P_g = rugi ohmic rotor + daya mekanik internal yang dibangkitkan di rotor (P_m)

$$P_g = s\,P_g + (1\text{-}s)\,P_g \qquad (2.17)$$

Sedangkan torsi internal yang dibangkitkan per fasa adalah

$$Te = \frac{daya\ mekanik\ internal\ yang\ dibangkitkan\ di\ rotor}{kecepatan\ rotor\ dalam\ radian\ per\ detik}$$

$$Te = \frac{Pm}{Wr} = \frac{(1-s)Pg}{(1-s)Ws} = \frac{Pg}{Ws} \qquad (2.18)$$

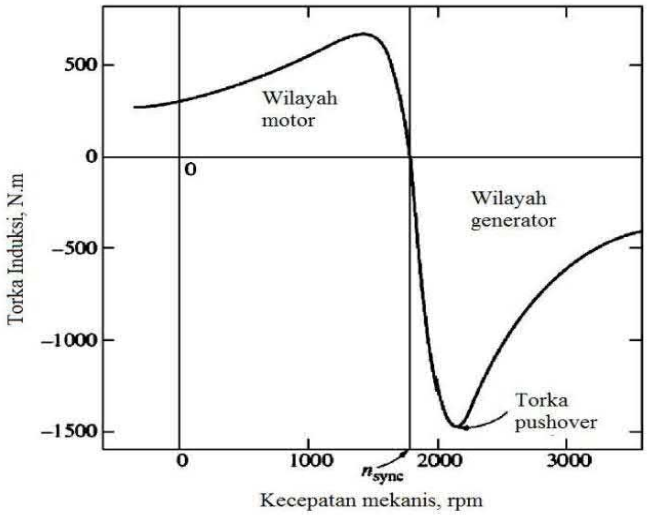
$$Te = \frac{1}{Ws} \times \left(I_2''^2 \times \frac{R2}{s}\right) = \frac{1}{2\pi ns} \times \frac{jXm}{\left(\frac{R2}{s}\right) + j(Xm + Xr)} \times I1 \times \frac{R2}{s} \qquad (2.19)$$

2.2.2 Generator Induksi

Generator induksi merupakan salah satu jenis generator AC yang menerapkan prinsip motor induksi untuk menghasilkan daya. Generator induksi merupakan perubahan motor induksi menjadi sebuah generator induksi dengan ketentuan kecepatan pada putar porosnya lebih besar daripada kecepatan sinkron

(nr>ns) sedangkan pada motor induksi kecepatan putar porosnya lebih kecil daripada kecepatan sinkron (nr<ns).

Generator induksi sendiri memiliki karakteristik bahwa jika kecepatan motor induksi lebih tinggi daripada besar kecepatan sinkronnya (n_{sync}) maka arah torsi induksinya semakin kecil dan motor akan bekerja sebagai generator. Dengan bertambahnya torsi, maka besar daya yang dihasilkan generator induksi semakin besar.



Gambar 2.15 Kurva Karakteristik Torsi-Kecepatan Mesin Induksi pada Berbagai Daerah Operasi

(Sumber: Electric Machinery Fundamentals)

Motor induksi sebagai generator saat ini sangat luas penggunaannya pada pembangkit-pembangkit listrik energi terbarukan seperti pada PLTMh dan PLT Angin. Jenis motor induksi yang paling banyak digunakan adalah jenis motor induksi rotor sangkar *(squirrel cage)*. Penggunaan motor induksi rotor sangkar pada pembangkit-pembangkit listrik tersebut dikarenakan banyak keuntungan

yang dimilikinya dibandingkan dengan generator sinkron baik dalam penggunaan skala tertentu maupun pada daerah terpencil. Penggunaan motor induksi tiga fasa sebagai generator induksi dengan keluaran satu fasa menjadi suatu pilihan untuk kelistrikan daerah-daerah terpencil karena beban-beban yang umum digunakan adalah satu fasa, selain itu juga dikarenakan biaya distribusi dan proteksi yang lebih rendah bila dibandingkan dengan menggunakan sistem jaringan tiga fasa.

2.2.2.1 Konstruksi Generator Induksi

Generator induksi tentu saja memiliki konstruksi sama dengan motor induksi yang terdiri atas rotor dan stator. Rotor merupakan bagian yang bergerak sedangkan stator adalah bagian yang diam (statis) dan memiliki kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnet pada kumparan rotor. Rotor merupakan bagian mesin induksi yang bergerak akibat adanya induksi magnet dari kumparan kemudian diinduksikan ke rotor. Kontruksi rotor mesin induksi terdiri dari beberapa bagian diantaranya yakni:

1. Inti rotor yaitu bahannya dari besi lunak dan baja silikon sama dengan inti stator.
2. Alur yaitu bahannya dari besi lunak atau baja silikon sama dengan inti. Alur merupakan tempat meletakkan belitan (kumparan) rotor.
3. Belitan rotor yaitu bahannya dari tembaga.
4. Stator adalah bagian yang terluar dari motor merupakan bagian yang diam dan mengalirkan arus fasa. Stator terdiri atas tumpukan laminasi inti yang memiliki alur yang menjadi tempat kumparan dililitkan yang berbentuk silindris.

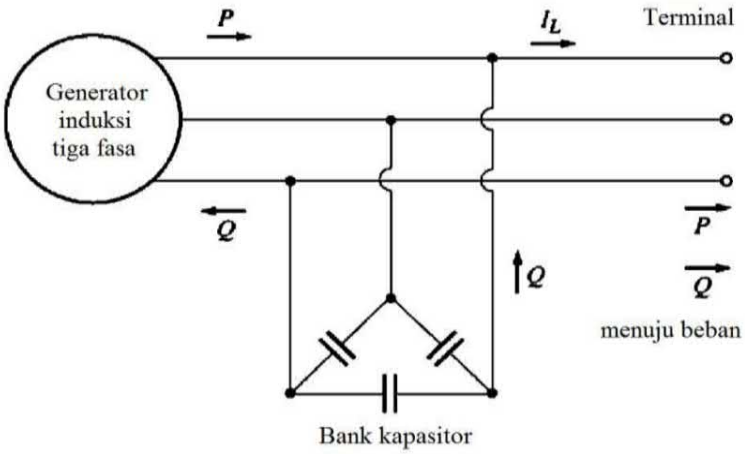
2.2.2.2 Prinsip Kerja Generator Induksi

Pengoperasian generator induksi adalah dengan cara menggerakkan rotornya secara mekanis lebih cepat daripada kecepatan sinkron sehingga menghasilkan slip negatif. Motor induksi biasa umumnya dapat digunakan sebagai sebuah generator tanpa ada modifikasi internal. Generator induksi sangat berguna pada aplikasi-aplikasi seperti pembangkit listrik mikrohidro, pembangkit listrik tenaga angin, atau untuk menurunkan aliran gas bertekanan tinggi ke tekanan rendah, karena dapat memanfaatkan energi dengan pengontrolan yang relatif sederhana (Hakim, 2017). Dalam pengoperasiannya, generator induksi harus dieksitasi terlebih dahulu menggunakan tegangan yang *leading*. Ini biasanya dilakukan dengan menghubungkan generator kepada sistem tenaga eksisting. Pada generator induksi yang beroperasi sendiri, bank kapasitor harus digunakan untuk mensuplay daya reaktif. Daya reaktif yang diberikan harus sama atau lebih besar daripada daya reaktif yang diambil mesin ketika beroperasi sebagai motor. Tegangan terminal generator akan bertambah dengan pertambahan nilai kapasitansi (Amri dalam Rosi, 2016).

2.2.2.3 Jenis-jenis Generator Induksi

1. Generator Penguat Sendiri

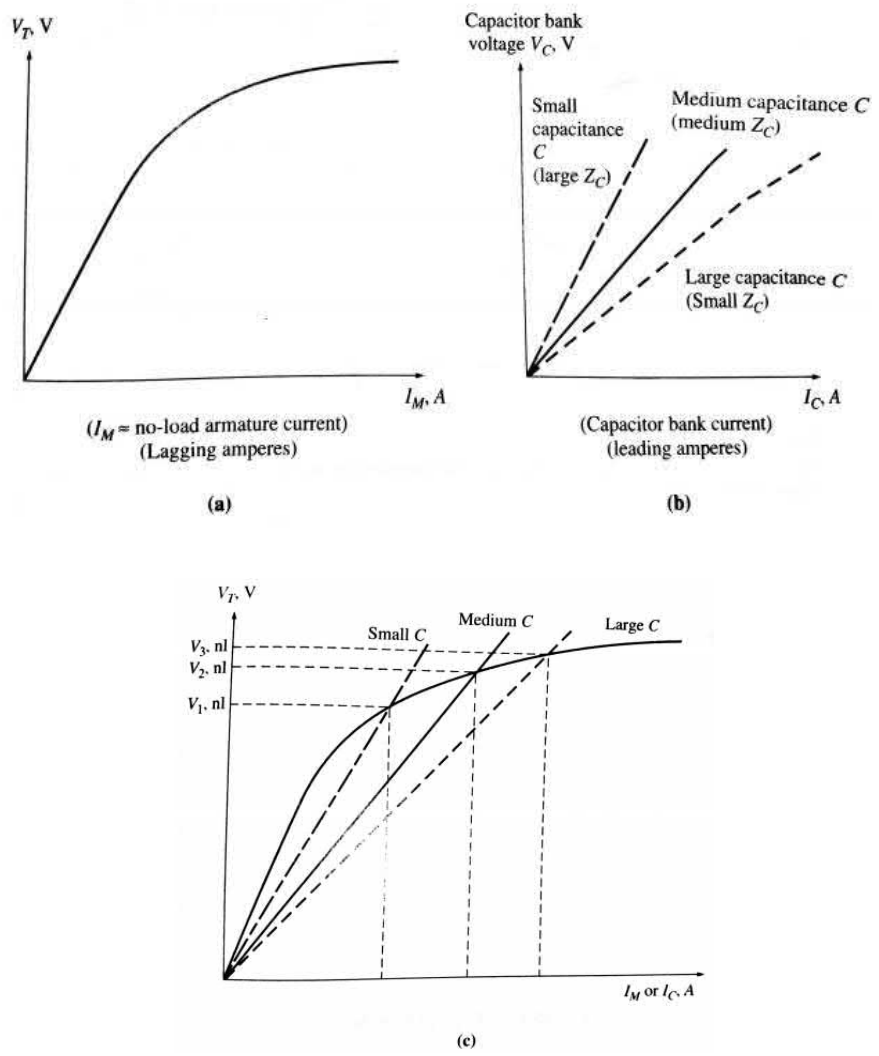
Pada generator penguat sendiri arus eksitasi berasal dari kapasitor yang dipasang paralel pada terminal keluaran generator. Kapasitor itu sendiri berfungsi sebagai sumber daya reaktif untuk menghasilkan tegangan keluaran generator. Hubungan antara kapasitor dan tegangan generator ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.16 Generator Induksi Beroperasi Sendiri dengan Bank Kapasitor

(Sumber: Electric Machinery Fundamentals)

Arus magnetisasi I_M yang dibutuhkan mesin induksi sebagai fungsi tegangan terminal dapat dicari dengan menjalankan mesin sebagai motor pada keadaan tanpa beban dan mengukur tegangan jangkarnya sebagai fungsi tegangan terminal. Kurva magnetisasi seperti ini diperlihatkan pada Gambar 2.17 (a). Untuk mencapai level tegangan yang diberikan pada generator induksi, kapasitor eksternal harus mensuplay arus magnetisasi yang sesuai dengan level tersebut. Karena arus reaktif yang dapat dihasilkan sebuah kapasitor berbanding lurus dengan tegangan diberikan padanya, dari semua kemungkinan tegangan dan arus yang melalui kapasitor berupa garis lurus. Plot tegangan vs arus seperti ini pada frekuensi tertentu diperlihatkan Gambar 2.17 (b). Jika sekelompok kapasitor tiga fasa dihubungkan kepada terminal generator induksi, tegangan tanpa beban generator induksi adalah perpotongan kurva magnetisasi generator dengan garis beban kapasitor. Tegangan terminal tanpa beban generator induksi untuk tiga kelompok kapasitor berbeda diperlihatkan Gambar 2.17 (c).



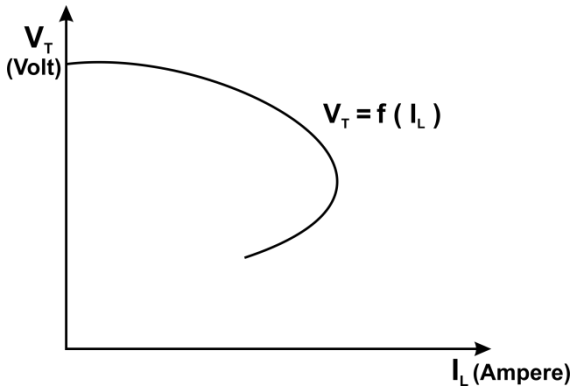
Gambar 2.17 (a) Kurva magnetisasi generator induksi. (b) Plot karakteristik tegangan-arus bank kapasitor. (c) Tegangan terminal tanpa beban untuk generator induksi.

(Sumber: Electric Machinery Fundamentals)

Ketika generator induksi pertama kali mulai berputar, magnet sisa pada rangkaian medannya menghasilkan tegangan yang kecil. Tegangan yang kecil itu menghasilkan aliran arus kapasitif, yang menyebabkan tegangan naik, kemudian lagi menaikkan arus kapasitif dan seterusnya sampai tegangan terbangkit penuh.

Jika tidak ada fluks sisa yang terdapat pada rotor generator induksi, maka tegangan tidak akan bisa dibangkitkan, sehingga generator harus dimagnetisasi terlebih dahulu dengan menjalankannya sebagai motor untuk beberapa saat.

Permasalahan utama pada generator induksi adalah tegangan yang berubah drastis ketika beban berubah, khususnya pada beban reaktif. Karakteristik terminal dari sebuah generator induksi yang bekerja sendiri dengan kapasitansi paralel konstan diwakili oleh persamaan $V_T = f\ (I_L)$. Persamaan tersebut menyebabkan karakteristik tegangan dan arus seperti pada Gambar 2.18. Tegangan terminal generator (V_T) akan semakin turun seiring bertambahnya arus beban (I_L). Kasus pembebanan induktif, tegangan jatuh sangat cepat. Ini terjadi karena kapasitor yang konstan harus mensuplay semua daya reaktif yang dibutuhkan baik oleh beban maupun generator, dan semua daya reaktif yang dialihkan kepada beban mengembalikan generator mendekati kurva magnetisasinya, menyebabkan penurunan besar pada tegangan generator. Dengan demikian sangat sulit untuk menjalankan motor induksi pada sistem tenaga yang disuplay oleh generator induksi.



Gambar 2.18 Karakteristik tegangan-arus terminal generator induksi untuk beban dengan faktor daya *lagging* yang konstan.
(Sumber: Electric Machinery Fundamentals)

Karena sifat alami karakteristik torsi-kecepatan mesin induksi, frekuensi generator induksi berubah-ubah dengan perubahan beban, tapi karena karakteristik torsi-kecepatan sangat curam pada wilayah operasi normal, variasi frekuensi total biasanya dibatasi di bawah 5 persen. Harga variasi ini cukup dapat diterima pada banyak aplikasi *generator isolated* atau *emergency* (Chapman, 2005: 460-464)

2.2.3 Kapasitor

Kapasitor secara sederhana didefinisikan sebagai suatu peralatan yang terdiri dari dua buah keping/plat konduktor yang dipisahkan oleh suatu bahan dielektrik yang memiliki kemampuan untuk dapat menyimpan energi listrik. Bahan-bahan dilektrik yang umumnya digunakan misalnya udara vakum, keramik, gelas, dan lainnya. Sedangkan kapasitansi kapasitor (C) didefinisikan sebagai jumlah muatan yang mampu diterima dan disimpan oleh kapasitor untuk setiap nilai tegangan dari potensial yang diberikan. Kapasitansi kapasitor dinilai dalam satuan farad (F). Berikut ini rumus kapasitansi kapasitor (Sofia, 2017).

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (2.20)$$

dimana :

Q = muatan listrik (Coulomb)

C = kapasitansi kapasitor (Farad)

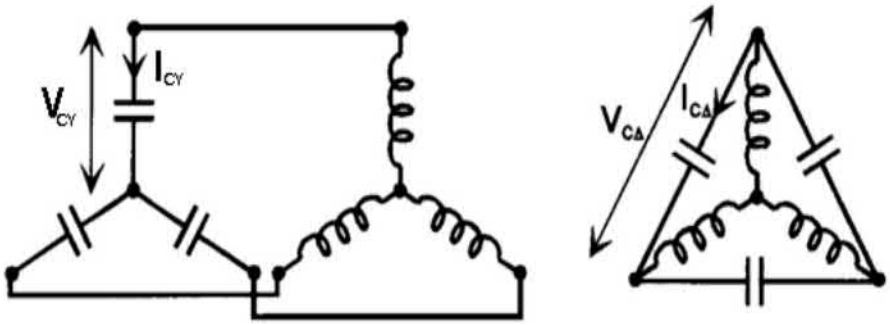
V = tegangan kapasitor (Volt)

Kapasitor yang umumnya cocok digunakan sebagai kapasitor eksitasi pada generator induksi penguatan sendiri adalah jenis *motor run*, yang juga biasa digunakan pada motor induksi satu fasa. Biasanya banyak terdapat dalam ukuran

40 μF dan juga diatasnya. Penggunaan kapasitor jenis motor start harus dihindari, karena jenis ini tidak didesain pada penggunaan secara kontinyu. Rating tegangan kapasitor biasanya berkisar 380 − 415 V, meskipun terkadang ada juga jenis untuk ukuran 220 − 240 V. Kapasitor terdapat dalam ukuran standar dan umumnya dispesifikasikan dengan toleransi +/-10%. Dengan demikian, tanpa adanya dilakukan pengukuran kapasitor secara individual/perfasa, akan sulit didapatkan nilai kapasitansi yang sesuai dengan kebutuhan. Dalam penggunaannya, disarankan agar digunakan kapasitor pada rating tegangan yang lebih besar dari nilai kapasitansi yang dibutuhkan untuk pengoperasian generator. Hal ini dilakukan agar kapasitor memilki umur kerja yang lebih lama (Rosi, 2016).

2.2.3.1 Pemasangan Kapasitor

Generator induksi yang digunakan untuk membangkitkan tegangan tiga fasa, kapasitor eksitasi dapat dihubungkan baik itu segitiga (Δ) ataupun bintang (Y). Gambar 2.19 adalah bentuk sistem konfigurasi pemasangan kapasitor eksitasi.



(a) (b)

Gambar 2.19 (a) Hubungan Bintang Pada Kumparan Stator Kapasitor Eksitasi.

(b) Hubungan Segitiga Pada Kumparan Stator Kapasitor Eksitasi

(Sumber: Motors as Generators)

Kapasitor yang dihubungkan bintang atau segitiga adalah mempunyai hubungan sebagai berikut:

$V_{C\Delta} = \sqrt{3}.V_{CY}$ (2.21)

$I_{C\Delta} = I_{CY}/\sqrt{3}$ (2.22)

$X_{C\Delta} = V_{C\Delta}/I_{C\Delta}$

$= \sqrt{3}.V_{CY} / I_{CY}/\sqrt{3}$

$X_{C\Delta} = 3.V_{CY}/I_{CY}$ (2.23)

Karena $C = 1/2\pi f.\ X_C$ (2.24)

Maka $C_\Delta = C_Y/3$ (2.25)

Sehingga, ketika kapasitor terhubung bintang (Y), maka nilai kapasitansi yang dibutuhkan adalah tiga kali nilai kapasitansi jika terhubung segitiga (Δ).

2.2.3.2 Kapasitansi Kapasitor

Kapasitansi kapasitor (C) adalah suatu kemampuan sebuah kapasitor untuk menyimpan muatan. Apabila sebuah muatan, misalnya proton dilepaskan dari kutub positif, maka proton tersebut akan bergerak ke kutub negatif. Proton mengalami percepatan karena gaya elektrostatik yang dihasilkan dari medan listrik E. Potensial yang dimiliki oleh sebuah muatan sebanding dengan muatan tersebut karena V adalah sebanding dengan Q, apabila jumlah muatan Q dilipat gandakan menjadi 2Q, maka V akan menjadi dua kali lipat dari V semula yakni 2V. Rasio antara Q dan V adalah konstan, dan rasio inilah yang disebut dengan Kapasitansi. Kapasitansi sebuah kapasitor tidak dipengaruhi oleh Q dan V, tetapi dipengaruhi oleh rasio-rasionya saja. Jadi kapasitansi sebuah kapasitor hanya dipengaruhi oleh geometri dan susunan kapasitor tersebut (Hakim, 2017).

Pada generator induksi penguatan sendiri (*self-excited*), kapasitor eksitasi merupakan satu-satunya sumber daya reaktif eksternal (Parastiwi, 2014). Dengan demikian, agar diperoleh tegangan operasi yang sesuai dengan kebutuhan, besar kapasitansi untuk kapasitor eksitasi yang terpasang harus ditentukan dengan akurat. Ada dua metode dalam menentukan besar nilai kapasitansi kapasitor yaitu dengan percobaan beban nol dan berdasarkan data *name plate* motor induksi tersebut. Penjelasan mengenai dua metode tersebut adalah sebagai berikut:

1. Percobaan Beban Nol

Data hasil percobaan beban nol dapat digunakan untuk menghitung kapasitansi eksitasi karena daya semu yang ditarik oleh motor induksi ketika beban nol mendekati nilai daya reaktif yang dibutuhkan mesin induksi ketika bekerja sebagai generator pada keadaan mendekati beban penuh.

Dari data hasil percobaan beban nol, dapat dihitung nilai daya semu:

$$\sum S_{no\ load} = \sqrt{3} \times V_{line\ 0} \times I_{line\ 0}\ \ VA \qquad (2.26)$$

Dari penjelasan di atas diketahui bahwa:

$$\sum Q = \sum S_{no\ load} = \sqrt{3} \times V_{line} \times I_{line}\ \ VAR \qquad (2.27)$$

2. Data *Name Plate* Motor

Dari data yang ada pada *name plate* mesin, seperti tegangan, arus beban penuh, cos φ, maupun putaran mesin, maka dapat dihitung daya semu pada keadaan beban penuhnya:

$$\sum S = \sqrt{3} \times V_{line} \times I_{line} \text{ VA} \quad (2.28)$$

$$\sum P = \sum S \cos \varphi \text{ Watt} \quad (2.29)$$

Dari hasil perhitungan kebutuhan daya reaktif, baik itu yang diperoleh dari metode percobaan beban nol maupun data *name plate* motor, kemudian perhitungan dilanjutkan sebagai berikut:

Daya reaktif yang dibutuhkan per fasa:

$$Q_{fasa} = \frac{Q}{3} \text{ VAR} \quad (2.30)$$

- Kapasitor Hubungan Bintang (Y)

$$V_{fasa\ Y} = V_{line\ Y} / \sqrt{3} \text{ V} \quad (2.31)$$

$$I_{fasa\ Y} = Q_{fasa} / V_{fasa\ Y} \text{ A} \quad (2.32)$$

$$X_C = V_{fasa} / I_{fasa}$$

$$= 1 / 2\pi f C \text{, maka}$$

$$C = I_{fasa} / 2\pi f\ V_{fasa} \quad (2.33)$$

Atau,

$$= Q_{fasa} / 2\pi f\ V_{fasa\ Y}^2 = Q / 2\pi f\ 3V_{fasa\ Y}^2 \quad (2.34)$$

- Kapasitor Hubungan Segitiga (Δ)

$$V_{fasa}\,\Delta = V_{line}\,\Delta \qquad (2.35)$$

$$I_{fasa}\,\Delta = Q_{fasa} / V_{fasa}\,\Delta\ A \qquad (2.36)$$

$$C = I_{fasa}\,\Delta \,/\, 2\pi f\ V_{fasa}\,\Delta\ \mu F \qquad (2.37)$$

$$= Q_{fasa} / 2\pi f\ V_{fasa}\,\Delta^2 = Q / 2\pi f\ 3V_{fasa}\,\Delta^2 \qquad (2.38)$$

Keterangan:

$V_{line\ 0}$ / $I_{line\ 0}$ = tegangan / arus *line to line* keadaan beban nol.

$V_{line\ Y}$ = tegangan *line to line* kapasitor hubungan bintang (Y)

$V_{line}\,\Delta$ = tegangan *line to line* kapasitor hubungan segitiga (Δ)

$V_{fasa\ Y}$ / $I_{fasa\ Y}$ = tegangan / arus per fasa kapasitor hubungan bintang (Y)

$V_{fasa}\,\Delta$ / $I_{fasa}\,\Delta$ = tegangan / arus per fasa kapasitor hubungan segitiga (Δ)

Nilai kapasitor yang diperoleh dari perhitungan ini merupakan nilai pendekatan, sehingga tidak dapat dihindari jika pada kenyataannya dibutuhkan nilai kapasitor yang lebih besar lagi. Perhitungan seperti ini cukup akurat untuk mesin dengan rating dibawah 5 kW.

2.2.4 Motor Induksi Sebagai Generator

Pengoperasian motor induksi untuk dapat dijadikan sebagai generator adalah dengan memutar motor melalui sebuah penggerak mula (*prime mover*) melebihi dari kecepatan sinkron motor (kecepatan medan putar) dan juga tersedianya suatu sumber daya reaktif untuk memenuhi kebutuhan arus eksitasi. Motor induksi sebagai generator saat ini telah luas penggunaannya pada

pembangkit-pembangkit listrik energi terbarukan seperti pada PLT Mikrohidro dan PLT Angin. Motor induksi jenis rotor sangkar sangat umum digunakan pada pembangkit-pembangkit listrik di atas. Penggunaan motor induksi rotor sangkar pada pembangkit-pembangkit listrik tersebut karena banyaknya keuntungan yang dimilikinya dibandingkan dengan generator sinkron dalam penggunaan di daerah-daerah terpencil dan untuk skala tertentu.

2.2.4.1 Syarat Pengoperasian Motor Induksi Sebagai Generator

Ada beberapa persyaratan untuk mengoperasikan motor induksi sebagai generator yaitu berupa kondisi-kondisi yang harus dipenuhi agar diperoleh fungsi generator dari motor tersebut. Berikut ini adalah kondisi-kondisi yang harus dipenuhi tersebut.

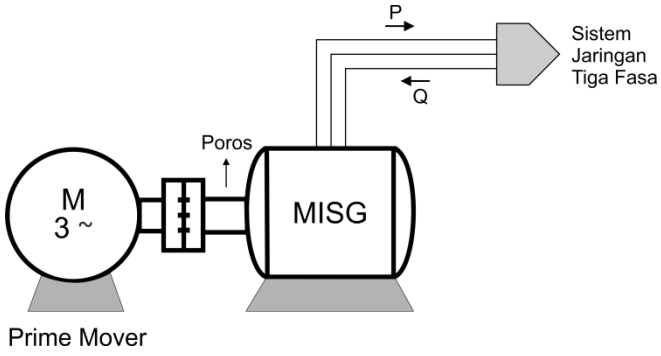
1. Slip Negatif (s < 0)

Untuk mengoperasikan motor induksi sebagai generator diperlukan daya mekanis yang berasal dari penggerak mula (*prime mover*) untuk memutar rotor diatas kecepatan sinkronnya (nr>ns), dimana daya mekanis ini diperoleh dari tenaga air (mikro hidro), tenaga angin atau penggerak lainnya sehingga mesin bekerja pada slip negatif (s<0) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10.

2. Adanya Sumber Daya Reaktif

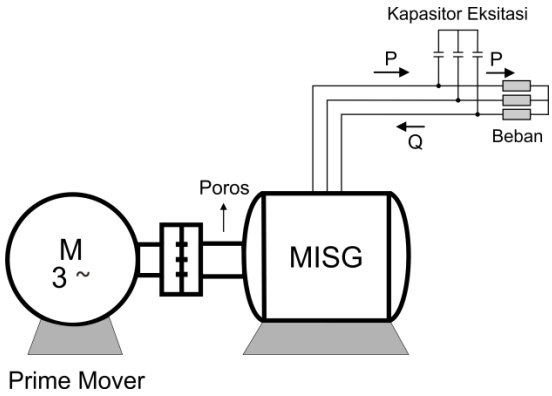
Pada umumnya, ada dua jenis kondisi pengoperasian motor induksi sebagai generator (MISG), yang pertama adalah terhubung ke sistem jaringan tiga fasa (*grid connected*) dan yang kedua adalah beroperasi sendiri (*stand alone*). Pada kondisi generator induksi yang terhubung ke sistem jaringan tiga fasa, maka

yang terjadi adalah generator induksi menyuplai daya aktif (P), akan tetapi juga menyerap daya reaktif (Q) dari sistem tersebut.



Gambar 2.20 Generator Induksi Terhubung ke Jaringan Tiga Fasa

Untuk operasi *stand alone*, kebutuhan daya reaktif tidak dapat lagi diperoleh dari jala-jala sehingga dibutuhkan daya reaktif dapat diperoleh dari suatu unit kapasitor. Kapasitor tersebut dihubungkan pararel dengan terminal keluaran generator. Kapasitor yang terpasang harus mampu memenuhi kebutuhan daya reaktif yang dibutuhkan untuk menghasilkan fluksi di celah udara. Ketika generator dapat melakukan eksitasi sendiri tanpa memerlukan sumber eksternal dari jala-jala, maka disebut juga generator induksi penguatan sendiri (Sibuea, 2010).



Gambar 2.21 Generator Induksi Beroperasi Sendiri

2.2.5 Jenis Pembebanan

Beban pada sistem tenaga listrik sangat banyak dan bervariasi jenisnya. Secara umum permodelan pembebanan dibagi menjadi dua, yaitu model beban statis dan model beban dinamis (Winanti, 2011).

1. Pembebanan Statis

Karakteristik beban menunjukan hubungan antara besar daya yang diserap beban dengan tegangan (Winanti, 2011). Dalam penelitian ini yang dimaksud dengan pembebanan statis adalah kondisi beban menuju ke keadaan tunak atau *steady state* ketika sudah disambungkan dengan terminal keluaran generator.

2. Pembebanan Dinamik

Beban gabungan (*composite load*) mengakibatkan perubahan tegangan yang cepat dan mencapai keadaan tunak dengan sangat cepat pula (Winanti, 2011). Dalam penelitian ini yang dimaksud dengan pembebanan dinamik adalah beban yang disambungkan secara bertahap sampai beban penuh ke terminal keluaran-generator.

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasakan analisis dan pembahasan yang telah peneliti lakukan, terdapat beberapa kesimpulan antara lain:

1. *Output* dari motor induksi yang difungsikan sebagai generator seperti pada tabel dibawah ini.

Tabel 5.1 *Nameplate* Motor Induksi Sebagai Generator

V	276 Volt
P	441,6 Watt
I	1,6 A
f	35 Hz
n	1116 rpm

2. Nilai kapasitansi kapasitor berpengaruh terhadap tegangan keluaran dan putaran generator.
3. Besarnya beban berpengaruh terhadap tegangan keluaran yang dihasilkan oleh generator.
4. Pengujian dengan beban bersifat resistif, induktif dan kapasitif berpengaruh terhadap perubahan tegangan dan putaran generator.
5. Nilai kapasitor lebih baik menggunakan kapasitor sebesar 30 μF.

5.2. Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, ada beberapa saran untuk pengembang dan penelitian selanjutnya antara lain:

1. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, tegangan keluaran yang dihasilkan generator belum stabil dikarenakan perubahan beban. Diharapkan untuk penelitian selanjutnya agar bisa menstabilkan tegangan keluaran generator menggunakan penyeimbang beban.
2. Pada penelitian yang dilakukan, frekuensi yang dihasilkan masih dibawah standar kelistrikan di Indonesia atau belum mencapai 50 Hz. Diharapkan untuk penelitian selanjutnya bisa menaikkan dan menstabilkan frekuensi dengan nilai konstan sesuai standar kelistrikan di Indonesia. Untuk meningkatkan frekuensi operasi bisa dilakukan dengan memperbesar atau mempercepat putaran generator atau dengan memakai motor dengan kutub lebih banyak.
3. Disarankan untuk penelitian berikutnya menggunakan *prime over* dengan kecepatan putaran lebih besar.

DAFTAR PUSTAKA

Bagia, I Nyoman dan I Made Parsa. 2018. *Motor-Motor Listrik*. Kupang: CV. Rasi Terbit.

Berlianti, Rahmi. (2015). Analisis Motor Induksi Fasa Tiga Tipe Rotor Sangkar Sebagai Generator Induksi Dengan Variasi Hubungan Kapasitor Untuk Eksitasi. *Jurnal Nasional Teknik Elektro.* Vol: 4. No. 1.

Chapman, Stephen J. 2005. *ELECTRIC MACHINERY FUNDAMENTALS.* New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Fitzgerald, A. E. dkk. 2003. *Electric Machinery*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc.

Hakim, Wan Fadhli. (2017). Motor Induksi 3 Fasa Sebagai Generator. *Laporan Proyek Akhir.* Politeknik Negeri Batam. Batam.

Hutagaol, Julius. 2010. Analisis Karakteristik Tegangan Dan Efisiensi Motor Induksi Tiga Fasa Sebagai Generator Induksi Dengan Keluaran Satu Fasa. *Tugas Akhir.* Universitas Sumatera Utara. Medan.

Ion, Catalin Petrea dan Corneliu Marinescu. 2013. Three-phase induction generators for single-phase power generation: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* Vol: 22 No 73-80.

Jakni. 2016. *Metodologi Penelitian Eksperimen Bidang Pendidikan*. Bandung: Alfabeta.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM). 2016. Media Komunikasi Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. *Jurnal Energi.*

Khan, M. Faisal dan M. Rizwan Khan. 2014. Evaluation of Excitation Capacitance for a Single-Phase Two Winding Self Excited Induction Generator. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES).*

Kholiq, Imam. 2015. Pemanfaatan Energi Alternatif Sebagai Energi Terbarukan Untuk Mendukung Subtitusi BBM. *Jurnal IPTEK.* Vol: 19 No. 2.

Kim, Sang-Hoon. 2017. *Electric Motor Control*. Elsevier Science: Elsevier Inc.

Mehta, V. K. *Principles of Electrical Machines.* https://nemasumit.files.wordpress.com/2017/08/246613252-principles-of-electric-machines-and-power-electronics.pdf 18 Maret 2019 (10:42).

Parastiwi, Andriani. 2014. Pengaturan Tegangan Dan Frekuensi Pada Motor Induksi Sebagai Generator. *Jurnal ELTEK.* Vol: 12 No. 02.

PSGC Mechatronic Department. *Three Phase Motor Induction.* https://www.academia.edu/26275174/Motor_Induksi_Tiga_Fasa 23 April 2019 (19:26).

Ridwansyah, Iwan dkk. Potensi Sumber Daya Air Untuk Pengembangan Pltmh Di DAS Cisadane Hulu Berdasarkan Pemodelan Hidrologi SWAT. *LIMNOTEK.* 22 (1) : 1 – 111.

Rosi, Aliflah Felen Diana. 2016. Analisis Kinerja Mesin Induksi Tiga Fasa sebagai Generator Induksi Satu Fasa dengan Variasi Beban. *Skripsi.* Universitas Jember. Jember.

Sibuea, Joseph E. 2011. Analisis Karakteristik Motor Induksi Tiga Phasa Sebagai Generator (Aplikasi Pada P4TK Medan). *Tugas Akhir*. Universitas Sumaterat Utara. Medan.

Singh, G. K. 2017. Self-Excited Induction Generator for Renewable Applications. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*. Volume 4.

Smith, Nigel. 1994. *MOTORS AS GENERATORS FOR MICRO-HYDRO POWER*. London: Intermediate Technology Development Group.

Sofia Dan Imam Sucahyo. 2017. Pengukuran Kapasitansi Kapasitor Dengan Memanfaatkan Elektrometer Hasil Rancangan Berbasis Mikrokontroler. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*. Vol: 6 No. 01.

Sugiyono, 2016. *Metode Penelitian Pendidikan*. Edisi ke-23. Bandung: CV. Alfabeta.

Sugiyono. 2015. *Metode Penelitian Pendidikan (Pendekatan kuantitatif, kualitatif dan R&D).* Alfabeta: Bandung.

Supardi, Agus dkk. 2015. Karakteristik Keluaran Generator Induksi 1 Fase Pada Sistem Pembangkit Pikohidro. *Simposium Nasional Teknologi Terapan (SNTT) 3.*

Suprihardi dkk. 2018. Pengaturan Kapasitor Pada Generator Induksi Untuk Mendapatkan Tegangan dan Frekuensi Tetap. *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*. Vol: 2 No.1

Triyono, Budi dkk. 2014. Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) Head Rendah dan Portable. IRWNS.

Utama, Handry Setya dan Medilla Kusriyanto. 2018. Prototype Pembangkit Mikrohidro Terintegrasi Beban Komplemen. *Teknoin*. Vol: 24 No. 1.

Winanti, Chairy Wahyu. 2011. Analisis Statis Dan Dinamis Stabilitas Tegangan Sistem Tenaga Listrik Cnooc Ses Ltd. *Skripsi*. Universitas Indonesia. Depok.