

**PENGARUH IMPEDANSI KUMPARAN STATOR  
TERHADAP PENGASUTAN GENERATOR INDUKSI  
SATU FASA PENGUATAN SENDIRI DAYA RENDAH  
PUTARAN RENDAH**

**DISERTASI**

**PROGRAM DOKTOR TEKNIK MESIN  
MINAT KONVERSI ENERGI**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
Memperoleh gelar Doktor Teknik**



**HARI SANTOSO  
NIM. 127060200111029**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG  
2018**

# **DISERTASI**

## **PENGARUH IMPEDANSI KUMPARAN STATOR TERHADAP PENGASUTAN GENERATOR INDUKSI SATU FASA PENGUATAN SENDIRI DAYA RENDAH PUTARAN RENDAH**

**HARI SANTOSO**  
**NIM. 127060200111029**

### **Komisi Pembimbing**

**Pembimbing Utama**

**Pembimbing Pendamping 1**

(Prof. Ir. ING Wardana, M.Eng., Ph.D.)

(Rini Nur Hasanah, S.T.,M.T., Ph.D.)

### **Pembimbing Pendamping 2**

(Prof. Ir. Budiono Mismail, MSEE., Ph.D.)

Malang, .....2018

Universitas Brawijaya  
Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin  
Ketua Program Doktor Teknik Mesin

(Prof. Ir. ING Wardana, M.Eng., Ph.D.)  
NIP. 19590703 1983 1 002

## **DISERTASI**

# **PENGARUH IMPEDANSI KUMPARAN STATOR TERHADAP PENGASUTAN GENERATOR INDUKSI SATU FASA PENGUATAN SENDIRI DAYA RENDAH PUTARAN RENDAH**

Nama Mahasiswa : Hari Santoso  
NIM : 127060200111029  
Program Studi : Doktor Teknik Mesin  
Minat : Konversi Energi

### **KOMISI PEMBIMBING:**

Pembimbing Utama : Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M.Eng., Ph.D.  
Pembimbing Pendamping 1 : Rini Nur Hasanah, S.T., MSc., Ph.D.  
Pembimbing Pendamping 2 : Prof. Ir. Budiono Mismail, MSEE., Ph.D.

### **TIM DOSEN PENGUJI**

Dosen Penguji 1 : Prof. Dr. Ir. Rudy Sunoko, M.Eng.  
Dosen Penguji 2 : Ir. Wijono, M.T., Ph.D.  
Dosen Penguji Tamu : Prof. Dr.Eng. Ir. Abrham Lomi, MSEE.

Sidang Seminar Hasil : 2 November 2016  
Sidang Ujian Tertutup : 24 November 2017  
Sidang Ujian Terbuka : 22 Januari 2018

## **PERNYATAAN ORISINALITAS DISERTASI**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, ide/gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas dalam disertasi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia disertasi ini dibatalkan dan diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Januari 2018  
Mahasiswa,

Materai

Hari Santoso  
NIM. 127060200111029

## **RIWAYAT HIDUP**

Hari Santoso, Malang, 05 Desember 1953 anak dari ayah H. Kaprawi (almarhum) dan ibu Hj. Kastoen (almarhumah). Ia menempuh Program Sarjana Teknik Listrik Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan lulus tahun 1984. Selanjutnya menempuh Program Pasca Sarjana Strata Dua (S<sub>2</sub>) bidang Energi Elektrik Institut Teknologi Bandung dan lulus tahun 1990.

Pengalaman kerja sebagai staf pengajar di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tahun 1984 hingga sekarang. Sebagai Kepala Laboratorium Listrik Dasar dan Pengukuran tahun 1984 sampai dengan 1987, sebagai Wakil Kepala Laboratorium Mesin-mesin Elektrik tahun 1990 sampai dengan 1992, Kepala Laboratorium Elektronika Daya tahun 1992 sampai dengan 1995, Kepala Laboratorium Tegangan Tinggi tahun 1995 sampai dengan 1998, Kepala Laboratorium Mesin-mesin Elektrik & Konversi Energi tahun 1998 sampai dengan 2007, Kepala Laboratorium Elektronika Daya tahun 2010 sampai dengan 2013.

Anggota Tim Uji Kompetensi (Asesor) bagi Tenaga Teknisi dan Operator Pembangkit Tenaga Listrik, Ikatan Ahli Ketenagalistrikan Indonesia (IATKI) Bandung tahun 2004 sampai dengan sekarang. Instruktur tenaga operator dan teknisi Pembangkit Listrik Tenaga Air PT. Pembangkitan Jawa Bali (PT.PJB UP Brantas), tahun 2005 sampai dengan 2007.

Malang, Januari 2018

Penulis

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Tuhan Yang Maha Esa atas curahan rahmat dan hidayahNya sehingga penulis dapat menyelesaikan buku laporan disertasi yang berjudul: “Pengaruh Impedansi Kumparan Stator terhadap Pengasutan Generator Induksi Satu Fasa Penguatan Sendiri Daya Rendah Putaran Rendah”.

Penulis menyadari banyak pihak yang terlibat dalam memberikan dukungan dan bantuan yang sangat bermanfaat. Oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyamlkiupaikan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat:

1. Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M.Eng., Ph.D. sebagai pembimbing utama dan Ketua Program Studi Doktor Teknik Mesin dan Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. Ph.D. sebagai pembimbing pendamping 1 serta Prof. Ir. Budiono Mismail, MSEE., Ph.D. sebagai pembimbing pendamping 2 yang telah memberikan dorongan, bimbingan, saran dan masukan selama penulis menyelesaikan disertasi ini.
2. Prof. Dr. Ir. Mohammad Bisri, MS. sebagai Rektor Universitas Brawijaya atas ijin mengikuti pendidikan dan bantuan biaya pendidikan yang telah diberikan kepada penulis.
3. Dr. Ir. Pitojo Tri Juwono, M.T. sebagai Dekan Fakultas Teknik atas ijin dan bantuan biaya pendidikan.
4. Dr. Ir. Muhammad Ruslin Anwar, M.Si. Sebagai Wakil Dekan Bidang Adminitrasi Umum dan Keuangan yang juga memberikan ijin dan tambahan biaya pendidikan.
5. Tim penguji sidang komisi proposal disertasi Program Doktor Teknik Mesin: Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M.Eng., Ph.D., Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. Ph.D., Prof. Ir. Budiono Mismail, MSEE., Ph.D., Prof. Dr. Ir. Rudy Sunoko, M. Eng dan Ir. Wijono, M.T., Ph.D. atas segala koreksi, usulan dan saran perbaikan.
6. Hadi Sujono S.T., M.T., Ph.D. sebagai Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan dorongan dan bantuan menyelesaikan pendidikan S3.
7. Ir. Djarot B. Darmadi, MT.,Ph.D. sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan dorongan dan bantuan menyelesaikan pendidikan S3.
8. Ir. Nurussa’adah, M.T., sebagai Sekretaris Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah memberikan dorongan dan bantuan menyelesaikan pendidikan S3.
9. Ir. Hery Purnomo, M.T., sebagai kepala Laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya atas ijin tempat dan bantuan pinjaman peralatan sehingga penelitian dapat berjalan dengan lancar dan baik.
10. Ir. D. J. Djoko H. Santjojo, M.Phil., Ph.D. yang telah memberikan dorongan dan bantuan menyelesaikan pendidikan S3.

11. Bapak dan ibu keluarga besar dosen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang nama-namanya tidak saya tuliskan satu persatu yang telah memberikan dorongan dan bantuan menyelesaikan pendidikan S3.
12. Teman-teman seperjuangan, mahasiswa Program Doktor Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya angkatan 2012 atas kerja sama yang baik, saling membantu memberi semangat untuk menyelesaikan disertasi tanpa mengharap imbalan dari penulis.
13. Indra Setyawan, S.ST sebagai tenaga pranata laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membantu pelaksanaan penelitian dari awal hingga selesai.
14. Para asisten laboratorium Mesin Elektrik Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang telah membantu pelaksanaan penelitian dari awal hingga selesai.
15. Istri saya tercinta Nyami Winarti yang telah mendampingi, mendo'akan, dan memberikan semangat agar penelitian dan penulisan disertasi dapat selesai dalam waktu yang tidak lama dengan hasil yang memuaskan.
16. Putri dan putra saya tersayang Winda Harsanti dan Asfari Hariz Santoso yang senantiasa membantu sekuat tenaga mulai dari mencari kepustakaan, pelaksanaan penelitian sampai pada penulisan disertasi.
17. Para sahabat saya, Alimin, Wienarso dan Muryono alm. yang telah membantu mempersiapkan mesin-mesin sebagai bahan penelitian mulai dari awal hingga selesai penelitian.
18. Semua pihak yang namanya tidak dapat saya tulis satu persatu yang telah membantu dalam penyelesaian disertasi ini.

Pepatah menyatakan tidak ada gading yang tak retak, penulis menyadari kemampuan yang terbatas, maka pasti ada kekurangan pada disertasi ini. Untuk itu kritik dan saran yang sifatnya membangun sangat penulis harapkan.

## RINGKASAN

Hari Santoso, Program Doktor Teknik Mesin, Minat Konversi Energi, Januari 2018. *Pengaruh Impedansi Kumbaran Stator terhadap Pengasutan Generator Induksi Satu Fasa Penguatan Sendiri Daya Rendah Putaran Rendah*. Pembimbing utama: Prof. Ir. I.N.G. Wardana, M.Eng., Ph.D., Pembimbing pendamping 1: Rini Nur Hasanah, S.T., M.Sc. Ph.D., Pembimbing pendamping 2: Prof. Ir. Budiono Mismail, MSEE., Ph.D.

Masih banyak rumah tangga di Indonesia yang belum mendapatkan akses ke fasilitas energi listrik, terutama yang tinggal di pedesaan terpencil di luar pulau Jawa. Mengingat lokasinya, perluasan akses menggunakan jaringan listrik nasional yang terdekat menjadi cukup mahal. Jika di daerah tersebut tersedia sumber energi terbarukan, angin atau air, pembangunan pembangkit listrik skala kecil menjadi salah satu pilihan. Pembangkit listrik skala kecil seperti pembangkit listrik tenaga angin/bayu (PLTB) atau pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH) cukup menjanjikan.

Kebanyakan pembangkit listrik skala kecil menggunakan generator sinkron yang harganya relatif mahal. Beban listrik di daerah pedesaan umumnya beban satu fasa. Penggunaan generator induksi satu fasa penguatan sendiri putaran rendah dapat menjadi alternatif pilihan karena lebih sederhana, murah dan kuat. Penggunaan generator induksi satu fasa pada pembangkit listrik skala kecil seperti pembangkit listrik tenaga mikrohidro (PLTMH), pembangkit listrik tenaga angin/bayu (PLTB) untuk daerah terpencil menjadi salah satu pilihan yang menjanjikan

Generator induksi satu fasa putaran rendah dapat diperoleh dengan cara merekonstruksi susunan dan lilit ulang kumparan stator motor induksi satu fasa. Dalam disertasi ini, rekonstruksi dilakukan dari mesin kutub 4, 36 alur, 20 kumparan menjadi generator induksi kutub 12, 18 kumparan. Pembagian jumlah kumparan dan kisar alur dilakukan agar dapat memenuhi kebutuhan pergeseran fasa  $90^{\circ}$  listrik dan  $180^{\circ}$  listrik. Dampak dari perubahan susunan kumparan menjadikan impedansi kumparan berubah, yaitu nilai resistansi dan induktansi kumparan berubah.

Pengasutan generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah tidak selalu berhasil. Untuk ini diperlukan arus picu yang dapat mengatasi ketidakpastian remanensi magnet akibat histerisis. Dalam penelitian ini, di samping pengasutan dengan putaran di sekitar kecepatan sinkron juga dipicu dengan arus dari pelepasan energi kapasitor penguat yang bertegangan awal. Pelepasan energi kapasitor harus dapat mengalirkan arus awal yang cukup besar.

Hasil penelitian menunjukkan, keberhasilan proses pengasutan generator induksi satu fasa daya rendah putaran rendah ditentukan oleh nilai impedansi kumparan, putaran generator, besar amplitudo awal arus picu yang nilainya mendekati nilai arus generator tanpa beban, dan energi tersimpan dalam kapasitor lebih besar dari energi dalam kumparan stator pada kondisi generator tanpa beban.



Kata kunci: generator induksi, putaran rendah, impedansi kumparan, arus picu, pengasutan

## SUMMARY

Hari Santoso, Doctoral Program in Mechanical Engineering - Area of Interest: Energy Conversion, Departement of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, January 2018. *The Influence of Stator Winding Impedance on the Starting-Up of Low-Power Low-Speed Self-Excited Single-Phase Induction Generator*. Promotor: I.N.G. Wardana, Co-promotors: 1. Rini Nur Hasanah, 2. Budiono Mismal.

There are still many households with no access to electricity in Indonesia, particularly in remote rural areas outside the Java island. Expansion of the existing nearby electricity grids requires high investment. If there are available some renewable energy sources such as low-speed wind power and low flow-rate water energy, small-scale wind power generation or micro-hydro power plants (MHP) could be promising.

Synchronous generators are commonly used in small-scale power generation. However, it is a relatively expensive choice for application in rural areas with single-phase load types. The use of single-phase induction generator could become an alternative option

In this research, a low-speed single-phase induction generator has been obtained by modifying the stator winding of a 4-pole, 36-slot, 20-winding single phase induction motor to form a 12-pole, 18-winding induction generator. Number of lot and slot-pitch was designed to produce an electrical phase-shifting of  $90^{\circ}$  and  $180^{\circ}$ . The winding modification brings a consequence on the stator winding impedance. The winding impedance is the key factor to determine the required value of exciting capacitor as well as to determine the required shape and magnitude of the transient triggering current to ensure the successful starting-up process.

The starting an induction generator is not always guaranteed do to uncertainty of magnetic remain in the machine, the hysteresis is responsible for this uncertainty. The research shows that the starting of the induction generator can be obtained by rotating the rotor around the synchronous speed, triggering the current produced by the charge from the capacitor. The current from the capacitor should be roundabout to no load current of the generator, storage energy in the capacitor should be more than energy in the stator winding on no loud condition.

Keywords: induction generator, low speed, winding impedance, trigger, starting-up

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah Tuhan Yang Maha Esa atas curahan rahmat dan hidayahNya, penulis dapat melaksanakan penelitian dan penulisan disertasi yang berjudul “Pengaruh Impedansi Kumparan Stator terhadap Pengasutan Generator Induksi Satu Fasa Penguatan Sendiri Daya Rendah Putaran Rendah”. Dalam penulisan disertasi ini, penulis telah banyak mendapatkan bantuan dan masukan, terutama pembimbing utama, pembimbing pendamping 1 dan 2 serta tim penguji. Oleh karena itu pada kesempatan yang baik ini penulis menyampaikan terima kasih yang tak terhingga atas segala bantuan, saran dan dorongan untuk memecahkan masalah yang penulis hadapi.

Penulis menyadari kemampuan diri yang terbatas, maka pasti ada kekurangan pada disertasi ini. Untuk itu dengan segala kerendahan hati penulis mohon maaf dan sangat mengharapkan kritik serta saran yang sifatnya membangun.

Akhir kata, penulis sampaikan terima kasih dan berharap semoga disertasi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca, untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi generator induksi satu fasa penguatan sendiri daya rendah putaran rendah, khususnya dalam hal pengasutan.

Malang, Januari 2018

Penulis

## DAFTAR ISI

Halaman

LEMBAR JUDUL .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	ii
LEMBAR IDENTITAS TIM PENGUJI .....	iii
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS .....	iv
LEMBAR RIWAYAT HIDUP .....	v
LEMBAR UCAPAN TERIMA KASIH .....	vi
LEMBAR RINGKASAN .....	viii
LEMBAR SUMMARY .....	ix
KATA PENGANTAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR GAMBAR .....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xix
DAFTAR SIMBOL .....	xx

**BAB I PENDAHULUAN** .....

1

1.1 Latar Belakang .....

1

1.1.1 Sumber energi .....

1

1.1.2 Jaringan listrik di Indonesia .....

4

1.1.3 Pembangkit listrik skala kecil .....

4

1.1.4 Generator induksi .....

5

1.1.5 Impedansi kumparan generator .....

6

1.1.6 Pengasutan generator induksi .....

6

1.1.7 Pengasutan generator induksi putaran rendah .....

8

1.1.8 Pelepasan energi kapasitor sebagai pemicu .....

8

1.2 Rumusan Masalah .....

9

1.3 Tujuan Penelitian .....

10

**BAB II TINJAUAN PUSTAKA** .....

11

2.1 Generator Listrik .....

11

2.2 Hubungan Dimensi dan Putaran terhadap Daya .....

12

2.3 Hubungan Putaran dengan Frekuensi dan Jumlah Pasang Kutub .....

12

2.4	Hubungan Tegangan, Putaran, Jumlah Lilit, dan Fluks Magnet .....	13
2.5	Hubungan Fluks Magnet dengan Induktansi .....	13
2.6	Kumparan Fasa Stator .....	14
2.7	Generator Induksi .....	16
2.8	Inti Besi Stator .....	17
2.9	Hubungan Putaran terhadap Operasi Generator Induksi .....	18
2.10	Pembangkitan Tegangan Generator Induksi .....	19
2.11	Generator Induksi Satu Fasa .....	19
	2.11.1 Impedansi kumparan .....	20
	2.11.2 Induktansi kumparan .....	21
	2.11.3 Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa .....	22
2.12	Kapasitor Penguat .....	24
2.13	Pengasutan Generator Induksi Satu Fasa Penguatan Sendiri Putaran Rendah .....	25
	2.13.1 Arus pemicu .....	26
	2.13.2 Arus Pengasutan generator .....	28
	2.13.3 Induktansi kemagnetan sebagai fungsi arus .....	30

2.14 Tegangan Pengasutan Generator Induksi Putaran Rendah .....	
31	
2.15 Rangkaian Pencatu Kapasitor Penguat .....	
32	
2.16 Prosedur Pengasutan Generator Induksi Putaran Rendah .....	
32	
<b>BAB III KERANGKA KONSEP DAN HIPOTESIS .....</b>	
34	
3.1 Kerangka Konsep .....	
34	
3.2 Hipotesis .....	
37	
<b>BAB IV METODE PENELITIAN .....</b>	
38	
4.1 Pemilihan Mesin Sebagai Bahan Penelitian .....	38
4.2 Kumparan Fasa Stator Motor Induksi .....	40
4.3 Rekonstruksi Kumparan Stator .....	41
4.4 Penentuan Jumlah Lilit Kumparan Fasa .....	42
4.5 Analisis Nilai Impedansi Stator .....	42
4.5.1 Analisis nilai resistansi kumparan stator .....	
43	
4.5.2 Analisis nilai reaktansi kumparan stator .....	
43	
4.6 Pengukuran Impedansi Generator .....	44
4.6.1 Pengukuran resistansi stator .....	
44	
4.6.2 Pengukuran resistansi inti besi mesin .....	
45	
4.6.3 Pengukuran resistansi rotor dan reaktansi bocor rotor .....	
46	
4.7 Induktansi Kemagnetan pada Fungsi Arus .....	47

4.8 Penentuan Kapasitor Penguat .....	49
4.9 Simulasi Pengasutan .....	50
4.10 Eksperimen Arus Picu .....	52
4.11 Eksperimen Pengasutan dengan Kapasitor Bertegangan Awal .....	52
4.12 Tempat Penelitian .....	53
4.13 Variabel Penelitian .....	53
4.14 Prosedur Eksperimen .....	54

## **BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN .....**

56

5.1 Rekonstruksi Kumparan Stator Mesin Induksi .....	
--	--

56

5.1.1 Jumlah lilit kumparan .....	
-----------------------------------	--

57

5.1.2 Analisis resistansi kumparan stator mesin hasil rekonstruksi .....	59
--	----

5.1.3 Analisis reaktansi kumparan stator .....	60
--	----

5.1.4 Perbandingan nilai impedansi kumparan stator hasil analisis dan pengukuran .....	61
--	----

5.1.5 Nilai resistansi beban dan nilai slip nominal .....	
---	--

62

5.1.6 Pengukuran resistansi rotor dan reaktansi bocor rotor .....	
---	--

62

5.1.7 Induktansi kemagnetan sebagai fungsi arus .....	
---	--

66

5.1.8 Kapasitor penguat .....	
-------------------------------	--

69

5.2 Arus Picu dan Proses Pengasutan .....	
---	--

71

5.2.1 Arus picu .....	
-----------------------	--

72

5.2.2 Proses pengasutan .....	
-------------------------------	--

79

5.3 Eksperimen Arus Picu dan Proses Pengasutan .....	
--	--

85

5.3.1 Perbandingan gelombang arus picu hasil simulasi dengan hasil eksperimen .....	87
5.3.2 Perbandingan gelombang tegangan hasil simulasi dengan hasil eksperimen .....	88

**BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN** .....

92

6.1 Kesimpulan .....	
----------------------	--

93

6.2 Saran .....	
-----------------	--

93

**DAFTAR PUSTAKA** .....

95

**LAMPIRAN** .....

101



## DAFTAR TABEL

<b>No.</b>	<b>Judul</b>	<b>Halaman</b>
Tabel 5.1	Data Fisik Mesin Induksi Satu Fasa Sebelum dan Setelah Rekonstruksi	59
Tabel 5.2	Nilai Impedansi Kumparan Stator Mesin Hasil Rekonstruksi .....	61
Tabel 5.3	Data Hasil Pengukuran dan Perhitungan Uji Motor Rotor Ditahan Kumparan Utama .....	64
Tabel 5.4	Data Hasil Pengukuran dan Perhitungan Uji Motor Rotor Ditahan Kumparan Bantu .....	65
Tabel 5.5	Data Hasil Pengukuran dan Pengukuran Motor Tanpa Beban Kumparan Utama .....	67
Tabel 5.6	Data Resistansi dan Reaktansi Generator Induksi Hasil Rekonstruksi .....	69
Tabel 5.7	Hubungan Nilai Kapasitor Terhadap Frekuensi Sudut Alamiah dan Amplitudo Awal Arus Picu .....	75
Tabel 5.8	Hubungan Tegangan Awal Kapasitor Terhadap Frekuensi Sudut Alamiah dan Amplitudo Awal Arus Picu .....	76

## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 1.1	Pembangkit listrik tenaga bayu modern .....	2
Gambar 1.2	Pembangkit listrik tenaga mikrohidro .....	3
Gambar 1.3	Diesel generator set .....	3
Gambar 1.4	Susunan sistem jaringan listrik .....	4
Gambar 1.5	Histerisis pada inti besi .....	7
Gambar 1.6	Gelombang tegangan proses pengasutan generator induksi .....	8
Gambar 2.1	Stator dan rotor generator arus bolak-balik dengan 4 kutub .....	11
Gambar 2.2	Aliran fluks bersama pada inti besi stator dan rotor .....	13
Gambar 2.3	Fluks bocor kumparan .....	14
Gambar 2.4	Bagan susunan kumparan kutub motor induksi .....	15
Gambar 2.5	Susunan kumparan stator motor induksi satu fasa .....	15
Gambar 2.6	Mesin induksi rotor sangkar .....	16
Gambar 2.7	Laminasi plat besi stator motor induksi dengan jumlah alur 36 .....	17
Gambar 2.8	Karakteristik mesin induksi .....	18
Gambar 2.9	Hubungan putaran rotor dengan medan putar stator .....	18
Gambar 2.10	Kedudukan kumparan stator mesin induksi satu fasa .....	19
Gambar 2.11	Konduktor rotor sangkar mesin induksi .....	20
Gambar 2.12	Hubungan generator induksi satu fasa .....	20

Gambar 2.13	Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa berbeban .....	22
Gambar 2.14	Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa tanpa beban .....	23
Gambar 2.15	Rangkaian ekuivalen generator induksi penguatan sendiri .....	23
Gambar 2.16	Rangkaian pengganti untuk mencari nilai kapasitor penguat .....	24
Gambar 2.17	Bagan hubungan kapasitor penguat dengan generator induksi .....	26
Gambar 2.18	Rangkaian $R$ , $L$ , dan $C$ seri, dengan $C$ bertegangan awal .....	26
Gambar 2.19	Bentuk Gelombang arus kurang teredam .....	28
Gambar 2.20	Rangkaian pengganti generator induksi satu tanpa beban .....	29
Gambar 2.21	Rangkaian pencatu kapasitor penguat .....	32
Gambar 3.1	Bagan alir kerangka konsep penelitian .....	36
Gambar 4.1	Motor induksi satu fasa rotor sangkar 4 kutub .....	39
Gambar 4.2	Susunan kumparan stator motor induksi satu fasa .....	40
Gambar 4.3	Bagan susunan kumparan stator motor induksi satu fasa 4 kutub .....	40
Gambar 4.4	Bagan susunan kumparan generator induksi hasil rekonstruksi .....	42
Gambar 4.5	Rangkaian pengukuran resistansi kumparan stator .....	44
Gambar 4.6	Rangkaian pengukuran motor induksi tanpa beban .....	45
Gambar 4.7	Rangkaian pengukuran motor induksi rotor ditahan .....	46
Gambar 4.8	Rangkaian pengukuran induktansi kemagnetan .....	47
Gambar 4.9	Karakteristik induktansi kemagnetan sebagai fungsi arus .....	48
Gambar 4.10	Rangkaian pengganti generator induksi berbeban .....	49
Gambar 4.11	Rangkaian pengganti generator induksi tanpa beban .....	50
Gambar 4.12	Bagan alir program simulasi pengasutan .....	51
Gambar 4.13	Hubungan rangkaian eksperimen arus picu .....	52
Gambar 4.14	Rangkaian eksperimen pengasutan dengan kapasitor bertegangan awal .....	53
Gambar 4.15	Diagram alir eksperimen proses pengasutan .....	55
Gambar 5.1	Kumparan stator mesin induksi sebelum dan setelah direkonstruksi ....	57
Gambar 5.2	Bagan susunan kumparan generator induksi hasil rekonstruksi .....,.....	57
Gambar 5.3	Rangkaian uji mesin rotor ditahan .....	63
Gambar 5.4	Rangkaian uji motor tanpa beban .....	66
Gambar 5.5	Kurva hubungan induktansi kemagnetan terhadap arus .....	68
Gambar 5.6	Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa dengan beban nominal untuk kumparan utama .....	69
Gambar 5.7	Rangkaian pengganti generator induksi penguatan sendiri tanpa beban untuk kumparan utama .....	70
Gambar 5.8	Rangkaian pengganti generator induksi satu fasa dengan beban nominal untuk kumparan bantu .....	70
Gambar 5.9	Rangkaian pengganti generator induksi penguatan sendiri tanpa beban untuk kumparan bantu .....	71
Gambar 5.10	Rangkaian eksperimen untuk mendapatkan arus picu .....	72
Gambar 5.11	Rangkaian pengganti proses pelepasan muatan tersimpan pada kapasitor .....	73
Gambar 5.12	Rangkaian ekuivalen saat pelepasan muatan dalam kapasitor .....	73
Gambar 5.13	Rangkaian ekuivalen kondisi awal pelepasan muatan kapasitor .....	74

Gambar 5.14	Bagan alir program simulasi arus picu .....	76
Gambar 5.15	Hasil simulasi pengaruh nilai kapasitor penguat $C_M$ terhadap gelombang arus picu dengan tegangan awal kapasitor 160 volt .....	77
Gambar 5.16	Hasil simulasi pengaruh nilai tegangan awal terhadap gelombang arus picu dengan nilai kapasitor $68 \mu F$ .....	78
Gambar 5.17	Rangkaian uji pengasutan generator induksi penguatan sendiri .....	80
Gambar 5.18	Rangkaian pengganti generator induksi tanpa beban .....	80
Gambar 5.19	Bagan alir program simulasi proses pengasutan .....	83
Gambar 5.20	Bentuk gelombang tegangan proses pengasutan hasil simulasi .....	84
Gambar 5.21	Skema hubungan peralatan untuk arus picu dan proses pengasutan .....	85
Gambar 5.22	Bagan alir urutan kerja eksperimen proses pengasutan .....	86
Gambar 5.23	Gelombang arus picu dengan $C_M = 68 \mu F$ dan tegangan awal kapasitor $V_C = 140 V$ .....	87
Gambar 5.24	Gelombang arus picu dengan $C_M = 68 \mu F$ dan tegangan awal kapasitor $V_C = 160 V$ .....	88
Gambar 5.25	Gelombang tegangan pengasutan putaran rotor 500 rpm, tegangan awal kapasitor 140 V .....	88
Gambar 5.26	Gelombang tegangan pengasutan, putaran 500 rpm, tegangan awal kapasitor 160 V .....	89
Gambar 5.27	Gelombang tegangan pengasutan, putaran 505 rpm, tegangan awal kapasitor 160 V .....	89
Gambar 5.28	Gelombang tegangan pengasutan, putaran 510 rpm, tegangan awal kapasitor 160 V .....	89
Gambar L1.1	Hubungan kumparan stator hasil rekonstruksi .....	102
Gambar L1.2	Kumparan individual stator satu sama lain kondisi terlepas .....	102
Gambar L1.3	Posisi kumparan individu 1 .....	103
Gambar L1.4	Posisi kumparan individu 2 .....	104
Gambar L1.5	Posisi kumparan individu 3 .....	104
Gambar L1.6	Hubungan kumparan fasa .....	107

## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Analisis Reaktansi Kumparan Metode Tensor
Lampiran 2	Analisis Penentuan Kapasitor Penguat
Lampiran 3	Foto Copy Penentuan Konstanta Kemagnetan Metode Quasi-Newthon
Lampiran 4	Simulasi Pengasutan Program MATLAB
Lampiran 5	Jurnal 1, <i>Applied Mechanics and Materials</i> , 2015
Lampiran 6	Jurnal 2, <i>ARPJ Journal of Engineering and Applied Science</i> , 2015
Lampiran 7	Jurnal 3, <i>ARPJ Journal of Engineering and Applied Science</i> , 2016
Lampiran 8	Fotocopy Dokumen pengiriman naskah Jurnal IJASEIT
Lampiran 9	Foto Penelitian

## DAFTAR SIMBOL

<b>Besaran / Sebutan</b>	<b>Satuan dan singkatan</b>	<b>Simbol</b>
Admitansi beban	mho	$Y_L$
Admitansi generator	mho	$Y_G$
Admitansi kapasitor	mho	$Y_C$
Arus alamiah	ampere (A)	$i_N$
Arus kemagnetan	ampere (A)	$I_m$
Arus beban	ampere (A)	$I_L$
Arus generator	ampere (A)	$I_G$
Arus kapasitor	ampere (A)	$I_C$
Arus paksa	ampere (A)	$i_F$
Arus transien	ampere (A)	$i_T$
Daya Beban	watt (W)	$P_L$
Daya Generator	watt (W)	$P_G$
Diameter lubang stator	mm	D
Frekuensi gelombang	hertz (Hz)	$f$
Fluks magnet	weber (Wb)	$\phi$
Impedansi beban	ohm ( $\Omega$ )	$Z_L$
Impedansi generator	ohm ( $\Omega$ )	$Z_G$

Induktansi	henry (H)	<b>L</b>
Jumlah lilit kumparan	lilit	<b>N</b>
Jumlah pasang kutub		<b>p</b>
Kapasitor kumparan utama	farad (F)	<b>C<sub>M</sub></b>
Kapasitor kumparan bantu	farad (F)	<b>C<sub>A</sub></b>
Kumparan Utama		<b>M</b>
Kumparan Bantu		<b>A</b>
Luas penampang konduktor	milimeter kwadrat (mm <sup>2</sup> )	<b>A</b>
Panjang inti besi stator	milimeter (mm)	<b>L</b>
Panjang konduktor	meter (m)	<b>l</b>
Permeabilitas bahan konduktor	henry/meter (H/m)	<b>μ</b>
Putaran medan sinkron	putaran/second (rps)	<b>n<sub>s</sub></b>
Putaran rotor	putaran/second (rps)	<b>n<sub>r</sub></b>
Resistansi stator	ohm (Ω)	<b>R<sub>1</sub></b>
Reaktansi bocor stator	ohm (Ω)	<b>X<sub>1</sub></b>
Reaktansi bocor rotor (acuan stator)	ohm (Ω)	<b>X<sub>2</sub></b>
Reaktansi kemagnetan	ohm (Ω)	<b>X<sub>m</sub></b>
Reaktansi sendiri individu	ohm (Ω)	<b>x<sub>11</sub>, x<sub>22</sub>, ...</b>
Reaktansi bersama individu	ohm (Ω)	<b>x<sub>12</sub>, x<sub>23</sub>, ...</b>
Resistansi rotor (acuan stator)	ohm (Ω)	<b>R<sub>2</sub></b>
Slip	prosen atau unit (% atau pu)	<b>S</b>
Tahanan jenis bahan konduktor	ohm-meter (Ωm)	<b>ρ</b>
Tegangan generator	volt (V)	<b>V<sub>G</sub></b>
Tegangan kapasitor	volt (V)	<b>V<sub>C</sub></b>
Tegangan beban	volt (V)	<b>V<sub>L</sub></b>
Tensor transformasi		<b>C</b>
Tensor reaktansi		<b>X</b>
Tensor admitansi		<b>Y</b>