

**PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA
MENGUNAKAN *MATRIX CONVERTER* DENGAN METODE
*VECTOR CONTROL***

(Skripsi)

Oleh

BAGUS PRASOJO



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

ABSTRAK

PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA MENGUNAKAN *MATRIX CONVERTER* DENGAN METODE *VECTOR CONTROL*

Oleh

BAGUS PRASOJO

Penelitian tugas akhir ini membuat sistem *matrix converter* dalam pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *vector control*. *Matrix converter* adalah konverter yang mengubah tegangan AC menjadi tegangan AC dengan parameter berbeda. Penggunaan metode *vector control* dengan pengendali PI dipilih untuk mendapatkan pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa yang baik. Metode *vector control* akan membuat motor induksi tiga fasa dapat dikendalikan seperti motor DC penguatan terpisah. Pengujian sistem disimulasikan menggunakan perangkat lunak *Simulink* MATLAB dengan memvariasikan nilai kecepatan serta nilai frekuensi masukan 50 Hz dan 60 Hz untuk kondisi berbeban dan tidak berbeban. Dari hasil pengujian yang dilakukan respon kecepatan, torsi serta arus (i_q) motor induksi tiga fasa memiliki karakteristik respon yang baik seiring dengan penambahan nilai frekuensi masukan *matrix converter*. Penggunaan pengendali PI mampu mengurangi nilai *overshoot* dan dapat meningkatkan kecepatan aktual menuju kecepatan referensi dengan waktu yang cepat meskipun diberi pembebanan. Hasil harmonisa arus dan tegangan yang dihasilkan oleh keluaran *matrix converter* dengan perubahan frekuensi nilainya dibawah 5%.

Kata kunci: Motor Induksi Tiga Fasa, *Matrix Converter*, *Vector Control*, Pengendali PI, *Simulink* MATLAB.

ABSTRACT

SPEED CONTROL OF THREE PHASE INDUCTION MOTOR USING MATRIX CONVERTER WITH METHOD VECTOR CONTROL

By

BAGUS PRASOJO

This research is to design the system of matrix converter induction motor speed control in three phases with vector control method. Matrix converter is a converter that converts AC voltage into AC voltage with different parameters. The use of the vector control method with the PI controller was chosen to obtain good three phases of induction motor speed setting. The vector control method will make a three phase induction motor can be controlled like a separate reinforced DC motor. System testing is simulated by using Simulink MATLAB software by varying the speed and value of the input frequency of 50 Hz and 60 Hz for loading and not loading conditions. From the test results, the response of speed, torque and current (iq) three phases of induction motor have a good response characteristic along with the addition of the matrix converter input frequency value. The use of PI controllers can reduce the value of overshoot and can increase the actual speed to the reference speed with a fast time despite being given a load. The results of current and voltage harmonics produced by the output of the matrix converter with changes in frequency value below 5%.

Keywords : Three Phase Induction Motor, Matrix Converter, Vector Control, PI Controller, Simulink MATLAB.

**PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI TIGA FASA
MENGUNAKAN *MATRIX CONVERTER* DENGAN METODE
*VECTOR CONTROL***

Oleh

BAGUS PRASOJO

Skripsi

Sebagai salah satu syarat mencapai gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Elektro

Fakultas Teknik Universitas Lampung



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2019**

Judul Skripsi

**: PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR
INDUKSI TIGA FASA MENGGUNAKAN
MATRIX CONVERTER DENGAN METODE
VECTOR CONTROL**

Nama Mahasiswa

: Bagus Prasajo

Nomor Pokok Mahasiswa : 1415031028

Jurusan

: Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing



Dr. Eng. Charles Ronald Harahap, S.T., M.T.
NIP 19691211 199903 1 001



Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.
NIP 19730215 199903 2 003

2. Ketua Jurusan Teknik Elektro

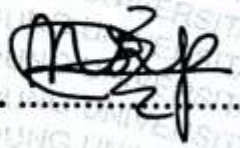


Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T.
NIP 19711130 199903 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Eng. Charles Ronald Harahap, S.T., M.T.**



Sekretaris : **Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T.**



Penguji
Bukan Pembimbing : **Ir. Abdul Haris, M.T.**



2. Dekan Fakultas Teknik



Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **15 Februari 2019**

SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepanjang sepengetahuan saya tidak terdapat atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana yang disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 20 April 2019



Bagus Prasojo
NPM. 1415031028

RIWAYAT HIDUP

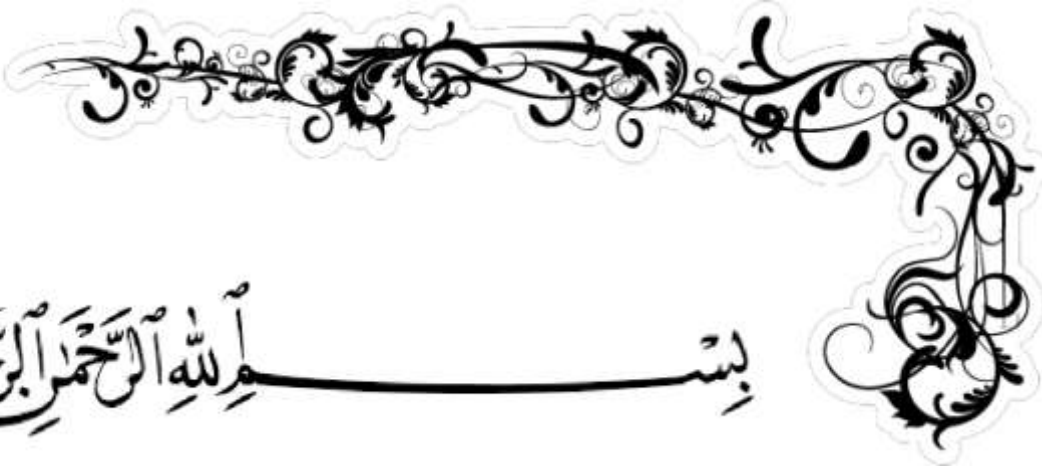


Penulis dilahirkan di Taman Baru pada tanggal 29 September 1996, anak dari bapak Supaijo dan ibu Suminten, anak ke tiga dari tiga bersaudara. Pendidikan formal penulis dimulai dari pendidikan Sekolah Dasar di SDN 4 Wates dari tahun 2002 sampai 2008. Penulis meneruskan pendidikan di SMPN

Padang Cermin dari tahun 2008 sampai 2011 dilanjutkan ke MAN 1 (Model) Bandar Lampung dari tahun 2011 sampai 2014.

Pada tahun 2014 penulis, melanjutkan pendidikan di Universitas Lampung dengan jalur SBMPTN (Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri) 2014. Selama menimba ilmu di Universitas Lampung penulis aktif dalam organisasi kegiatan kemahasiswaan seperti HIMATRO Unila, FOSSI FT UNILA, BEM U KBM Unila, DPM FT Unila dan DPM U KBM Unila. Penulis juga berkesempatan menjadi Asisten Laboratorium Konversi Energi Elektrik (KEE).

Penulis pernah melakukan kerja praktik di PT. Lentera Bumi Nusantara, Jawa Barat Indonesia pada tahun 2017 dengan bahasan ”Sistem *Controller Wind Turbine* TSD-500 Watt pada Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB)” dan melaksanakan Kuliah Kerja Nyata di Desa Subing Karya, Kecamatan Seputih Mataram Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung pada tahun 2017.



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Karya ini Dipersembahkan untuk

Ayah dan Ibu Terkasih

Bapak Supaijo dan Ibu Suminten

Saudara Tercinta

Febriyanto

Teguh Adi Saputro

Keluarga Besar, Dosen, Teman, dan Almamater





Motto

***"Dan bersabarlah kamu sesungguhnya janji
ALLAH adalah benar." (QS. Ar-Rum; 60)***

***"Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada
kemudahan. Sesungguhnya sesudah kesulitan itu
ada kemudahan." (QS. Ash-Sharh; 5-6)***



***"Man Jadda Wa Jadda (Siapa yang
bersungguh-sungguh akan berhasil)***

SANWACANA

Alhamdulillahirobbil'alamin, segala puji bagi Allah Subhanahu wa Ta'ala atas limpahan nikmat kesehatan, kesempatan, rahmat serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Sholawat serta salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad Sallallahu Alaihi wa Sallam sang penutup Nabi dan Rasul, kepada keluarga, sahabat dan pengikutnya yang setia sampai akhir zaman.

Tugas akhir berjudul **“Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan *Matrix Converter* dengan Metode *Vector Control*”** ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung. Masa perkuliahan dan penelitian, penulis mendapatkan banyak hal-hal baik berupa dukungan, semangat, motivasi dan banyak hal lainnya. Maka penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Suharno, M.Sc., Ph.D. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Herman H. Sinaga, S.T., M.T. selaku ketua Jurusan Teknik Elektro, Universitas Lampung.

4. Bapak Dr. Eng. Charles Ronald Harahap, S.T., M.T selaku pembimbing utama skripsi yang telah dengan sabar membimbing, memberikan ilmunya, motivasi dalam hidup dan arahnya dalam menyusun penelitian.
5. Ibu Dr. Eng. Endah Komalasari, S.T., M.T. selaku pembimbing pendamping yang telah membimbing, memberi ilmunya, semangat serta pemahaman ketelitian dalam menyusun penelitian ini.
6. Bapak Ir. Abdul Haris, M.T selaku dosen penguji skripsi yang telah memberikan saran serta kritikan yang sangat membangun dalam pengusungan skripsi.
7. Segenap dosen dan pegawai di Jurusan Teknik Elektro yang telah memberi ilmu dan wawasan yang selalu teringat oleh penulis.
8. Ayah dan ibu tercinta, Supaijo dan Suminten yang tak terhingga jasa yang telah diberikan. Hanya doa dan sedikit usaha meraih prestasi sekarang dan kedepannya serta menyelesaikan kewajiban agar terpancar senyum bangga di wajah kalian yang sangat saya impikan.
9. Kakak-kakak, Febriyanto dan Teguh Adi Saputro yang selama ini telah memberikan kasih sayang, motivasi, semangat, dukungan, nasehat dan do'a dalam segala aspek agar istiqomah dalam menuntut ilmu.
10. Keluarga besar Teknik Elektro Angkatan (ELITE) 2014 terimakasih atas segala yang telah diberikan.
11. Teman-teman seperjuangan di Laboratorium Konversi Energi Elektrik terimakasih atas segala bantuan yang telah diberikan.
12. Keluarga besar DPM U KBM Universitas Lampung Periode 2018 jajaran pimpinan Herwandovika Aulia, Amirudin, Arini Khairah Mujahidah, Ari

Yudha Prasetya, Dinati Syarafina, M. Hadiyan Rasyadi, Diah Ambar Sari, Setiyaningsih, Erssa Fathiah Salsabilla, Anisya Anggraini dan lainnya terimakasih atas segala doa, bantuan, dan semangat yang telah diberikan.

13. Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (Himatro) atas pengalaman, pembelajaran, dan segala rasa yang telah lahir tidak akan terlupakan.
14. Semua pihak yang telah membantu serta mendukung penulis dari awal kuliah hingga terselesaikannya skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga kebersamaan ini membawa kebaikan, keberkahan, kemurahan hati serta bantuan doa yang telah diberikan seluruh pihak akan mendapat balasan yang setimpal dari Allah Subhanahu wa Ta'ala dan semoga kita menjadi manusia yang berguna dan berkembang. Penulis menyadari bahwa masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak demi kemajuan bersama. Penulis berharap sekripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Bandar Lampung, 20 April 2019
Penulis,

Bagus Prasajo

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
LEMBAR JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
SANWACANA	x
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR TABEL	xviii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	3
1.3 Manfaat Penelitian	3
1.4 Rumusan Masalah.....	3
1.5 Batasan Masalah	4
1.6 Hipotesis	4
1.7 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Motor Induksi Tiga Fasa	6
2.2 <i>Vector Control</i>	9
2.3 <i>Matrix Converter</i>	19
2.4 <i>Pulse Width Modulation (PWM)</i>	24
2.5 Sistem Kendali Kalang Tertutup.....	25

2.6	Harmonisa	28
2.7	Deret Fourier	29
BAB III METODE PENELITIAN		31
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	31
3.2	Alat dan Bahan	31
3.3	Spesifikasi Alat	31
3.4	Prosedur Penelitian	32
3.5	Analisa Data Hasil Pengujian dan Kesimpulan	46
3.6	Diagram Alir Penelitian	46
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		48
4.1	Hasil Perancangan Simulasi	48
4.2	Hasil Simulasi dan Analisa	49
4.2.1	Pengujian Sumber Tiga Fasa	50
4.2.2	Pengujian Rangkaian <i>Matrix Converter</i>	51
4.2.3	Pengujian <i>Matrix Converter</i> pada Motor Induksi Tiga Fasa dengan Pengendali PI	54
4.2.4	Pengujian Rangkaian <i>Matrix Converter</i> pada Motor Induksi Tiga Fasa dengan Pengendali PI beban RL (Resistif Induktif)	73
4.2.5	Pengujian Harmonisa <i>Matrix Converter</i>	80
BAB V SIMPULAN DAN SARAN		86
5.1	Simpulan	86
5.2	Saran	87

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Kontruksi Motor Induksi Tiga Fasa	7
2.2 Kumparan Stator dan Rotor Motor Induksi Tiga Fasa dalam Model dq.....	10
2.3 Model d-q Motor Induksi Tiga Fasa	12
2.4 Transformasi <i>Clarke</i>	15
2.5 Perubahan Arus dengan Transformasi <i>Clarke</i>	15
2.6 Grafik Transformasi <i>Clarke</i>	16
2.7 Transformasi <i>Park</i>	18
2.8 Perubahan Arus dengan Transformasi <i>Park</i>	18
2.9 Grafik Transformasi <i>Park</i>	18
2.10 Rangkaian <i>Matrix Converter</i>	20
2.11 Gelombang <i>Switching Matrix Converter</i>	22
2.12 Tegangan Masukan <i>Matrix Converter</i>	23
2.13 Tegangan Keluaran <i>Matrix Converter</i>	23
2.14 Sinyal PWM.....	24
2.15 Sistem Kendali Kalang Tertutup	25
2.16 Sistem <i>Disturbance</i> Kendali Kalang Tertutup	26
2.17 Spektrum Harmonisa	29
3.1 Tampilan Awal <i>Simulink</i> MATLAB.....	33
3.2 Rangkaian Sumber Tiga Fasa pada <i>Simulink</i> MATLAB	34
3.3 Blok Parameter Sumber Tiga Fasa.....	34
3.4 Blok Parameter IGBT dan Dioda	35
3.5 Rangkaian <i>Matrix Converter</i>	36
3.6 Blok Model <i>abc to dq Conversion</i>	37
3.7 Blok Model <i>dq to abc Conversion</i>	37

3.8	Pengendali PI	38
3.9	Blok Parameter Pengendali PI	39
3.10	Blok <i>Step Reference</i>	39
3.11	Diagram Proses Pembuatan Sinyal ke IGBT	40
3.12	Blok Pensaklaran untuk Setiap Fasa	40
3.13	Blok Motor Induksi Tiga Fasa	42
3.14	Blok Parameter Motor Induksi Tiga Fasa	43
3.15	Diagram Blok Perancangan Simulasi.....	44
3.16	Diagram Alir Penelitian	47
4.1	Rangkaian Pengendali Motor Induksi Tiga Fasa pada <i>Simulink</i> MATLAB (<i>Matrix Laboratory</i>)	49
4.2	Gelombang Sumber Tiga Fasa	50
4.3	Gelombang Masukan Tegangan <i>Matrix Converter</i>	52
4.4	Gelombang Keluaran Tegangan <i>Matrix Converter</i>	52
4.5	Gelombang Masukan Arus <i>Matrix Converter</i>	53
4.6	Gelombang Keluaran Arus <i>Matrix Converter</i>	53
4.7	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-100 rpm dengan Frekuensi 50 Hz	55
4.8	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-500 rpm dengan Frekuensi 50 Hz	56
4.9	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-1000 rpm dengan Frekuensi 50 Hz.....	57
4.10	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-100 rpm dengan Frekuensi 60 Hz	58
4.11	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-500 rpm dengan Frekuensi 60 Hz	59
4.12	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-1000 rpm dengan Frekuensi 60 Hz	60
4.13	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-100 rpm ke 300 rpm dengan Frekuensi 50 Hz	64
4.14	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-500 rpm ke 800 rpm dengan Frekuensi 50 Hz	65
4.15	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-1000 rpm ke 1440 rpm dengan Frekuensi 50 Hz	66
4.16	Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-100 rpm ke 300 rpm dengan Frekuensi 60 Hz	67

4.17 Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-500 rpm ke 800 rpm dengan Frekuensi 60 Hz	68
4.18 Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-1000 rpm ke 1440 rpm dengan Frekuensi 60 Hz	69
4.19 Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-800 rpm, Frekuensi 50 Hz dengan Beban RL	74
4.20 Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-1440 rpm, Frekuensi 50 Hz dengan Beban RL	75
4.21 Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-800 rpm, Frekuensi 60 Hz dengan Beban RL	76
4.22 Hasil Simulasi untuk ω_{ref} 0-1440 rpm, Frekuensi 60 Hz dengan Beban RL	77
4.23 THDv Keluaran <i>Matrix Converter</i> Frekuensi 50 Hz	81
4.24 THDv Keluaran <i>Matrix Converter</i> Frekuensi 60 Hz	82
4.25 THDi Keluaran <i>Matrix Converter</i> Frekuensi 50 Hz	84
4.26 THDi Keluaran <i>Matrix Converter</i> Frekuensi 60 Hz	84

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Kondisi <i>Switching Matrix Converter</i>	41
4.1 Data Hasil Respon Kecepatan Saat Frekuensi 50 Hz dan 60 Hz	61
4.2 Data Hasil Respon Kecepatan Saat Frekuensi 50 Hz dan 60 Hz dengan Perubahan Kecepatan Referensi	70
4.3 Parameter Pengujian dengan Beban RL	73
4.4 Data Hasil Respon Kecepatan Saat Frekuensi 50 dan 60 Hz dengan Beban RL (Resistif Induktif).....	78
4.5 Hasil Pengujian Harmonisa Tegangan yang Timbul pada Keluaran <i>Matrix Converter</i>	82
4.6 Hasil Pengujian Harmonisa Arus yang Timbul pada Keluaran <i>Matrix Converter</i>	85

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak-balik (AC) yang bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotor. Motor induksi banyak digunakan dalam dunia industri. Hal ini dikarenakan motor induksi mempunyai konstruksi yang lebih sederhana, kokoh, harganya relatif murah serta perawatannya yang mudah [1]. Pada prinsipnya motor induksi dioperasikan pada kecepatan yang konstan, bila beban berubah kecepatan motor juga akan berubah.

Salah satu teknik pengendalian kecepatan pada motor induksi yang mempunyai sumber tegangan AC umumnya menggunakan sistem *rectifier* dan *inverter*, dimana dalam prosesnya sumber tegangan AC dirubah menjadi tegangan DC menggunakan *rectifier* selanjutnya diubah kembali menjadi AC menggunakan *inverter*. Hal ini membuat sistem pengendalian motor induksi tidak ekonomis dan kurang efisien, untuk mengatasi tersebut dibuatlah suatu teknik pengendalian kecepatan motor induksi dengan *matrix converter*.

Matrix converter mengkonversi secara langsung sumber tegangan AC menjadi tegangan AC sehingga memiliki bentuk gelombang masukan dan

keluaran berupa sinusoidal dan lebih sederhana karena tidak lagi menggunakan *rectifier* dan *inverter* [2], menyediakan aliran daya dua arah kemudian, memiliki nilai harmonisa yang rendah [3]. Oleh karena itu, *matrix converter* dipilih pada penelitian ini.

Pada penelitian ini, akan dibahas mengenai sistem *matrix converter* dalam pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa dengan menggunakan metode *vector control*. *Vector control* adalah suatu metode yang memberikan kontrol *decoupling* terhadap fluks dan torsi pada motor induksi. Pada sistem ini arus penguatan dan arus beban motor dapat dikontrol secara terpisah, sehingga torsi dan fluks juga dapat diatur secara terpisah [4]. Selanjutnya, pada penelitian ini juga sistem yang dibuat akan diujikan dengan memvariasikan nilai kecepatan serta nilai frekuensi masukan yaitu sebesar 50 Hz dan 60 Hz untuk kondisi berbeban dan tidak berbeban sehingga akan didapatkan perbedaan unjuk kerja pada motor induksi tiga fasa, yang kemudian dianalisa hasilnya. Dengan demikian, penelitian ini dapat menjadi rujukan dalam mendesain pengendalian motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control*.

1.2 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Membuat simulasi pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control*.
2. Menganalisa unjuk kerja motor induksi tiga fasa berupa tegangan, arus, kecepatan putar, dan torsi menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control*.
3. Menganalisa karakteristik *step response* dan *disturbance response* dari pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control*.

1.3 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapatkan setelah melakukan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mendapatkan desain pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control*.
2. Mendapatkan kinerja motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control*.
3. Mendapatkan karakteristik *step response* dan *disturbance response* dari kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control*.

1.4 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang pengendalian motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control* ?
2. Bagaimana unjuk kerja motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control* ?
3. Bagaimana karakteristik *step response* dan *disturbance response* dari kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan oleh *matrix converter* dengan metode *vector control* ?

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian ini membahas mengenai *matrix converter* dalam pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *vector control*.
2. Penelitian ini menggunakan simulasi pada *software Simulink Matlab*.
3. Penelitian ini membahas unjuk kerja motor dengan mengatur kecepatan menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control*.

1.6 Hipotesis

Matrix converter dapat digunakan untuk pengendalian kecepatan motor induksi tiga fasa dengan metode *vector control*, dimana motor induksi tiga fasa dapat dikendalikan seperti motor DC.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika pada penulisan tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan, manfaat, rumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan mengenai landasan teori secara garis besar yang berhubungan dengan penelitian yang dilakukan.

BAB III. METODE PENELITIAN

Pada bab ini menjelaskan tentang langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi mengenai hasil pengujian dan pembahasan terhadap hasil penelitian yang diperoleh.

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian serta saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa merupakan motor listrik arus bolak-balik yang paling banyak digunakan dalam dunia industri. Dinamakan motor induksi karena pada kenyataannya arus rotor motor ini bukan diperoleh dari suatu sumber listrik, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar [5].

Motor induksi dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan fasanya, yaitu motor induksi tiga fasa dan motor induksi satu fasa. Motor induksi tiga fasa biasanya dioperasikan di bidang industri yang memiliki sistem tenaga tiga fasa, sedangkan pada motor induksi satu fasa biasanya digunakan pada peralatan rumah tangga.

2.1.1 Kontruksi Motor Induksi Tiga Fasa

Motor induksi tiga fasa memiliki konstruksi yang hampir sama dengan motor listrik jenis lainnya. Motor ini memiliki dua bagian utama, yaitu stator yang merupakan bagian yang diam, dan rotor sebagai bagian yang berputar sebagaimana diperlihatkan pada gambar 2.1 bagian

stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara yang sempit, dengan jarak berkisar dari 0,4 mm sampai 4 mm.



Gambar 2.1 Kontruksi Motor Induksi Tiga Fasa [6]

2.1.2 Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga Fasa

Prinsip kerja dari sebuah motor adalah mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi bekerja berdasarkan dari induksi elektromagnetik yang berasal dari kumparan stator kepada kumparan rotor. Kumparan stator akan menginduksikan garis-garis gaya fluks sehingga akan memotong kumparan rotor yang menyebabkan timbulnya gaya gerak listrik (GGL) atau juga disebut dengan tegangan induksi.

Arus pada kumparan rotor akan mengalir disebabkan kumparan pada rotor merupakan rangkaian tertutup. Kumparan (penghantar) rotor yang dialiri oleh arus akan berada dalam garis gaya fluks dari kumparan stator sehingga kumparan pada rotor akan mengalami gaya Lorentz, rotor akan bergerak sesuai dengan arah dari pergerakan medan induksi dari stator akibat torsi yang ditimbulkan oleh gaya Lorentz. Berikut persamaan dari gaya Lorentz:

$$F = B \cdot i \cdot l \quad (2.1)$$

dimana

F = Gaya Lorentz (Newton)

B = Kerapatan fluks magnet (Tesla)

i = Arus yang mengalir dikawat (Ampere)

l = Panjang konduktor (Meter)

Selain itu, pada motor induksi juga mengenal adanya istilah *slip*. Slip adalah perbedaan kecepatan putaran sinkron dengan kecepatan pada rotor. Karena adanya rugi-rugi, baik rugi-rugi pada lilitan, rugi-rugi mekanik, dan bahkan rugi-rugi dari magnetik, oleh karena itu slip menjadi pertimbangan dalam motor induksi. Slip dinyatakan dengan persentase dari 0% hingga 100%. Persamaan untuk menghitung slip adalah sebagai berikut :

$$\% \text{ slip} \quad s = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \quad (2.2)$$

Dimana,

N_s adalah kecepatan sinkron dan,

$N_s - N$ adalah kecepatan slip

2.2 Vector Control

Vector control adalah suatu metode pengaturan kumparan medan pada motor AC, dimana dari sistem *coupling* dirubah menjadi sistem *decoupling*. Sistem ini arus penguatan dan arus beban motor dapat dikendalikan secara terpisah, sehingga torsi dan fluks juga dapat diatur secara terpisah, seperti halnya motor DC. Implementasi fluks vektor pada motor membutuhkan perhitungan dan simulasi pada orientasi stator, rotor dan torsi.

Untuk pengaturan secara terpisah (*decoupling control*), diinginkan $\lambda_{qr} = 0$.

$$\lambda_r = \frac{l_m}{T_{rs} + 1} i_{ds} \quad (2.3)$$

atau jika fluks $\lambda_r =$ konstan maka:

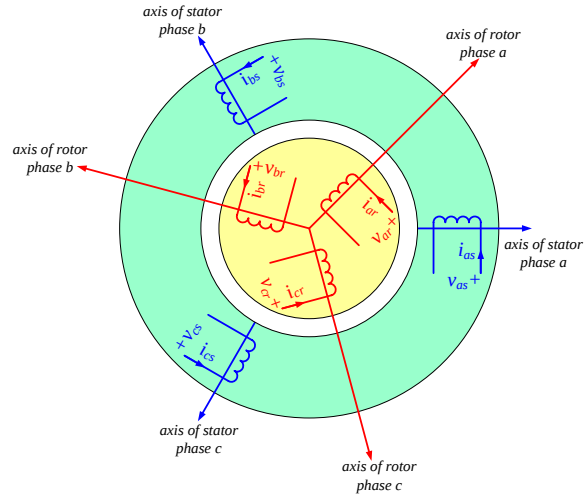
$$\lambda_r = l_m \cdot i_{ds} \quad (2.4)$$

Nilai kecepatan slip (ω_s):

$$\omega_{sl} = \frac{l_m R_r}{\lambda_r L_r} \quad (2.5)$$

2.2.1 Pemodelan dinamik motor induksi tiga fasa

Vector control pada motor induksi tiga fasa digunakan untuk menganalisis karakteristik dinamis dari motor induksi tiga fasa. Motor induksi tiga fasa dapat digambarkan dengan motor induksi dua fasa. Penggambaran motor induksi dua fasa banyak digunakan dengan model kerangka referensi dq (*direct-quadrature*). Diagram ekivalen motor induksi tiga fasa dalam model dq ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kumparan Stator dan Rotor Motor Induksi Tiga Fasa dalam Model dq [7]

Persamaan tegangan stator:

$$v_{as} = i_{as} r_s + \frac{d}{dt} \lambda_{as} \quad (2.6)$$

$$v_{bs} = i_{bs} r_s + \frac{d}{dt} \lambda_{bs} \quad (2.7)$$

$$v_{cs} = i_{cs} r_s + \frac{d}{dt} \lambda_{cs} \quad (2.8)$$

Kemudian, tegangan rotor mempunyai persamaan:

$$v_{ar} = i_{ar} r_r + \frac{d}{dt} \lambda_{ar} \quad (2.9)$$

$$v_{br} = i_{br} r_r + \frac{d}{dt} \lambda_{br} \quad (2.10)$$

$$v_{cr} = i_{cr} r_r + \frac{d}{dt} \lambda_{cr} \quad (2.11)$$

Persamaan *fluks linkage*:

$$\begin{aligned} \lambda_{as} = & L_s i_{as} + M_s i_{bs} + M_s i_{cs} + M_{sr} i_{ar} \cos(\theta_r) + M_{sr} i_{br} \cos(\theta_r + 120^\circ) + \\ & M_{sr} i_{cr} \cos(\theta_r - 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{bs} = & M_s i_{as} + L_s i_{bs} + M_s i_{cs} + M_{sr} i_{ar} \cos(\theta_r - 120^\circ) + M_{sr} i_{br} \cos(\theta_r) + \\ & M_{sr} i_{cr} \cos(\theta_r + 120^\circ) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Secara umum, persamaan diatas dapat diasumsikan $i_a + i_b + i_c = 0$

dan $L_{ss} = L_s - M_s$ sehingga diperoleh persamaan *fluks linkage*,

pada stator:

$$\lambda_{as} = L_{ss} i_{ss} + M_{sr} [i_{ar} \cos(\theta_r) + i_{br} \cos(\theta_r + 120^\circ) + i_{cr} \cos(\theta_r - 120^\circ)] \quad (2.14)$$

$$\lambda_{bs} = L_{ss} i_{bs} + M_{sr} [i_{ar} \cos(\theta_r - 120^\circ) + i_{br} \cos(\theta_r) + i_{cr} \cos(\theta_r + 120^\circ)] \quad (2.15)$$

$$\lambda_{cs} = L_{ss} i_{cs} + M_{sr} [i_{ar} \cos(\theta_r + 120^\circ) + i_{br} \cos(\theta_r - 120^\circ) + i_{cr} \cos(\theta_r)] \quad (2.16)$$

Kemudian $L_{rr} = L_r - M_r$ sehingga diperoleh persamaan *fluks linkage*

pada rotor:

$$\lambda_{ar} = M_{sr} [i_{as} \cos(\theta_r) + i_{bs} \cos(\theta_r - 120^\circ) + i_{cs} \cos(\theta_r + 120^\circ)] + L_{rr} i_{ar} \quad (2.17)$$

$$\lambda_{br} = M_{sr} [i_{as} \cos(\theta_r + 120^\circ) + i_{bs} \cos(\theta_r) + i_{cs} \cos(\theta_r - 120^\circ)] + L_{rr} i_{br} \quad (2.18)$$

$$\lambda_{cr} = M_{sr} [i_{as} \cos(\theta_r - 120^\circ) + i_{bs} \cos(\theta_r + 120^\circ) + i_{cs} \cos(\theta_r)] + L_{rr} i_{cr} \quad (2.19)$$

Keterangan dari persamaan diatas v_{as}, v_{bs}, v_{cs} menunjukkan tegangan

stator sumbu-a,b,c. Arus i_{as}, i_{bs}, i_{cs} menunjukkan arus stator sumbu-

a,b,c, kemudian $\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs}$ adalah fluks belitan stator sumbu-a,b,c.

Pada bagian rotor v_{ar}, v_{br}, v_{cr} menunjukkan tegangan rotor sumbu-

a,b,c. Arus i_{ar}, i_{br}, i_{cr} adalah arus rotor sumbu-a,b,c, dan $\lambda_{ar}, \lambda_{br},$

λ_{cr} adalah fluks belitan rotor sumbu-a,b,c. Kemudian dengan melihat

persamaan L_{ss} adalah induktansi *self* stator, L_s induktansi stator dan

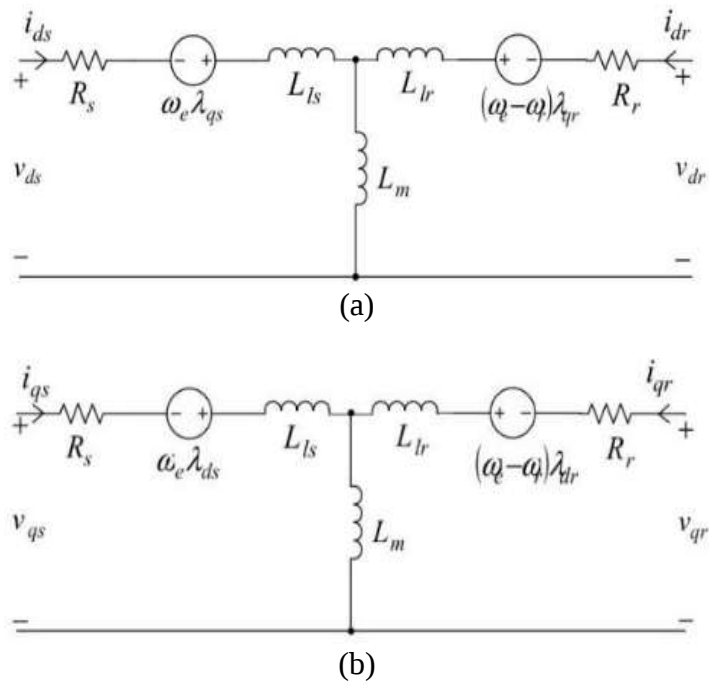
M_s mutual stator. Pada bagian rotor L_{rr} adalah induktansi *self* rotor,

L_r induktansi rotor dan M_r mutual rotor.

Transformasi dari persamaan stator dan rotor diatas dapat ditulis dalam persamaan matriks, yaitu :

$$L_{sr} = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) & \cos(\theta_r - 120^\circ) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Gambar 2.3 dibawah ini merupakan rangkaian ekivalen motor induksi tiga fasa dalam model dq.



Gambar 2.3 Model d-q Motor Induksi Tiga Fasa (a) Rangkaian Ekivalen Sumbu-d (b) Rangkaian Ekivalen Sumbu-q [8]

Keterangan untuk gambar 2.3 di atas adalah d menunjukkan *direct axis* (sumbu-d), q dinamakan *quadrature axis* (sumbu-q), v_{ds} tegangan stator sumbu-d, v_{qs} tegangan stator sumbu-q, v_{dr} tegangan rotor sumbu-d, v_{qr} tegangan rotor sumbu-q, i_{ds} arus stator sumbu-d, i_{qs} arus stator sumbu-q, i_{dr} arus rotor sumbu-d, i_{qr} arus rotor sumbu-

ω_e kecepatan angular kerangka referensi, ω_r kecepatan angular rotor, dan λ_{ds} adalah fluks belitan pada motor. R_e dan L_{is} menunjukkan resistansi dan induktansi *linkage* pada belitan stator, sedangkan R_r , dan L_{ir} merepresentasikan resistansi dan induktansi *linkage* pada belitan rotor. Notasi L_m digunakan untuk menunjukkan induktansi mutual antara belitan stator dan rotor.

Model mesin dinamis dalam sumbu stasioner bisa diturunkan hanya dengan mengganti $\omega_e = 0$. Persamaan dibawah ini menyatakan tegangan stator dan rotor:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (2.21)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (2.22)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} - \omega_r \lambda_{dr} \quad (2.23)$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} + \omega_r \lambda_{qr} \quad (2.24)$$

Dimana,

$$v_{dr} = v_{qr} = 0 \quad (2.25)$$

Fluks digabungkan dengan arus sesuai dengan persamaan berikut berikut:

$$\lambda_{ds} = L_{is} i_{ds} + L_m (i_{is} + i_{dr}) = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (2.26)$$

$$\lambda_{qs} = L_{is} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_s i_{ds} + L_m i_{qr} \quad (2.27)$$

$$\lambda_{dr} = L_{ir} i_{dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_r i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (2.28)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_M (i_{qs} + i_{qr}) = L_r i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (2.29)$$

Persamaan torsi terbentuk akibat interaksi fluks celah udara dan arus rotor. Oleh karena itu, torsi bisa dinyatakan dalam bentuk vektor dengan persamaan sebagai berikut:

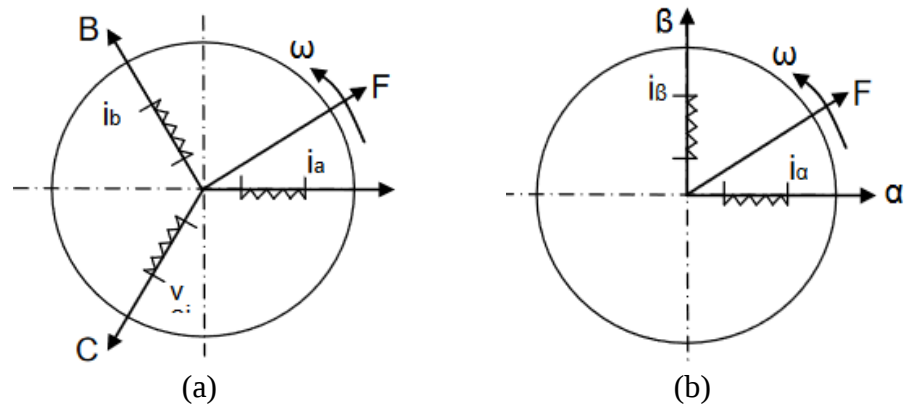
$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \lambda_{ds} \times I_r \quad (2.30)$$

$$T_e - T_L = \left(\frac{2}{p} \right) J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (2.31)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\lambda_{dm} i_{qs} - \lambda_{qm} i_{ds}) \quad (2.32)$$

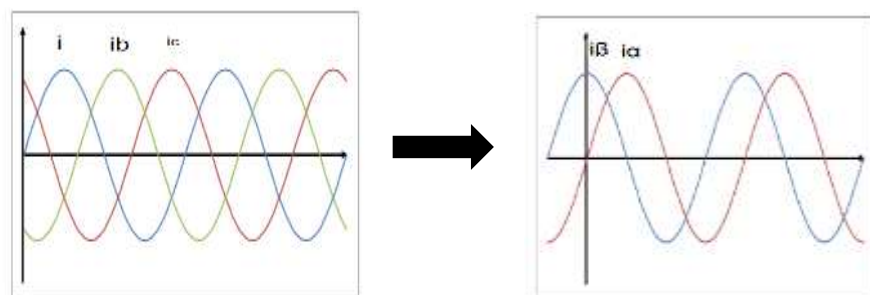
2.2.2 Transformasi *Clarke*

Transformasi *Clarke* pertama kali dikembangkan oleh E. Clarke. Transformasi *Clarke* merupakan transformasi yang mengkonversi koordinat tiga fasa (i_a, i_b, i_c) seimbang menjadi koordinat stasioner dua fasa (i_α, i_β). Variabel dua fasa koordinat pada Transformasi *Clarke* dilambangkan dengan α (alpha) dan β (beta). Dalam teori motor, motor AC tiga fasa yang seimbang memiliki 3 lilitan tetap. Melalui tiga fasa seimbang arus i_a, i_b, i_c akan membawa medan magnet berputar (Φ) dengan kecepatan (ω).

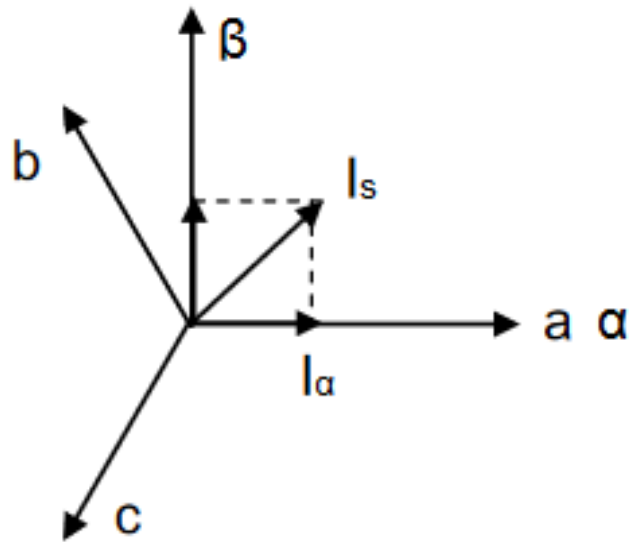


Gambar 2.4 Transformasi *Clarke* (a) Arus dengan Sumbu a, b, c
(b) Arus dengan Sumbu α, β [9]

Gambar 2.4 a merupakan tiga fasa seimbang, belitan tetap dapat membuat medan magnet berputar, kemudian dua fasa belitan simetri ($\Delta \text{fasa} = 90^\circ$) melalui dua fasa seimbang AC i_α , i_β juga dapat membuat medan magnet berputar. Lilitan tiga fasa seimbang dan dua fasa simetris dapat membuat berputar medan magnet Φ dan memiliki nilai kecepatan yang setara, yaitu dimana belitan 3 fasa setara dengan belitan 2 fasa.



Gambar 2.5 Perubahan Arus dengan Transformasi *Clarke* [9]



Gambar 2.6 Grafik Transformasi *Clarke* [9]

Dengan nilai sumbu nol:

$$I_0 = k_1 \cdot k_2 (i_a + i_b + i_c) \quad (2.33)$$

Selanjutnya merubah persamaan 2.33 ke dalam aplikasi motor, didapatkan persamaan 2.34.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ k_2 & k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = C_t \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Kemudian persamaan 2.34 menjadi:

$$C_t^{-1} = k_1 \begin{bmatrix} 1 & 0 & k_2 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & k_2 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & k_2 \end{bmatrix}$$

$$C_t^{-1} C_t = k_1^2 k_2 \begin{bmatrix} 1 & 0 & k_2 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & k_2 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ k_2 & k_2 & k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Selanjutnya diberikan nilai variabel k, maka:

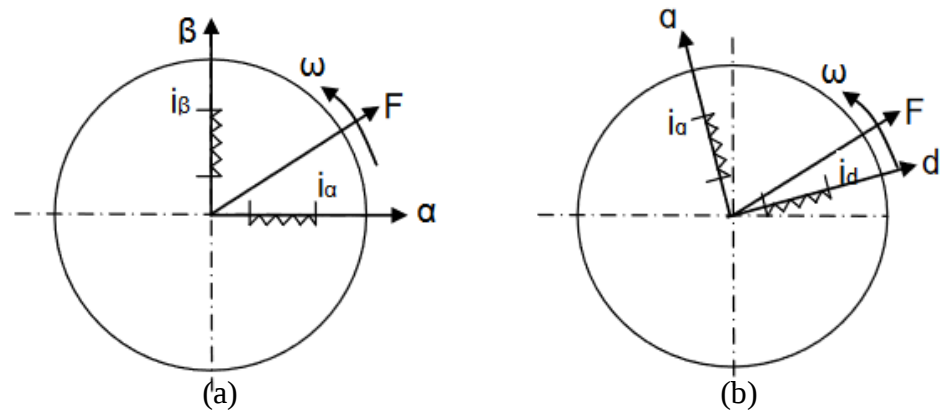
$$k_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad k_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (2.36)$$

Dengan memasukkan k_2, k_1 ke C_t didapat persamaan akhir sebagai berikut:

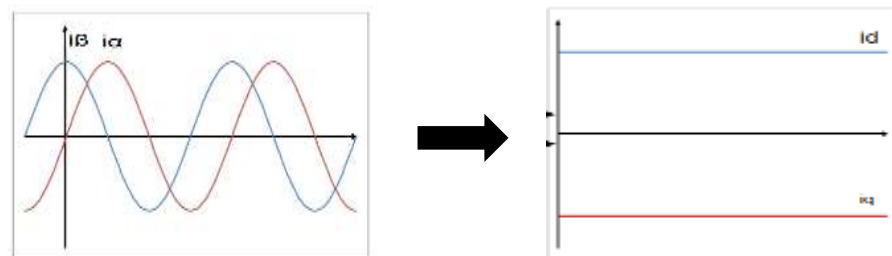
$$C_t = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

2.2.3 Transformasi *Park*

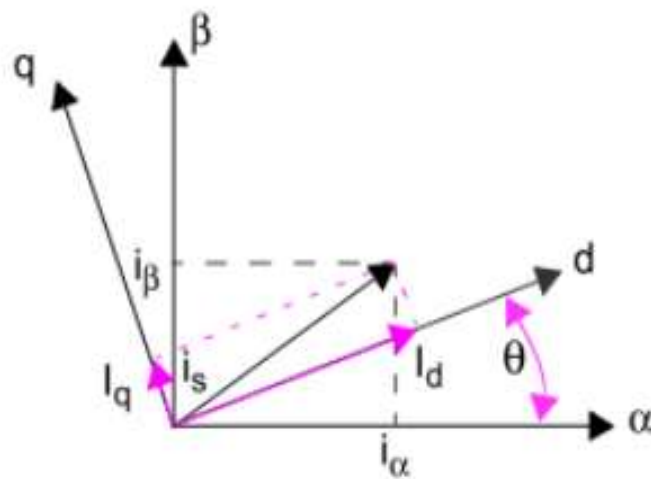
Transformasi *Park* adalah transformasi tiga fasa yang terkenal dengan transformasi dua fasa dalam analisis mesin sinkron. Transformasi *Park* digunakan untuk mengubah koordinat dua fasa stasioner α (alpha) dan β (beta) ke dalam koordinat *Synchronously rotating frame* (dq). Seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.7 Transformasi *Park* (a) Arus dengan Sumbu α, β
(b) Arus dengan Sumbu d, q [10]



Gambar 2.8 Perubahan Arus dengan Transformasi *Park* [10]



Gambar 2.9 Grafik Transformasi *Park* [10]

Dengan melihat grafik dapat ditulis persamaan:

$$i_d = i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta)$$

$$i_q = -i_\alpha \sin(\theta) + i_\beta \cos(\theta) \quad (2.38)$$

Pada grafik diatas sumbu i_d dan i_q adalah arus 2 fasa yang berputar, i_α dan i_β adalah arus 2 fasa stasioner, θ adalah sudut antara i_α dan i_β , sehingga menjadi persamaan:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_p \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

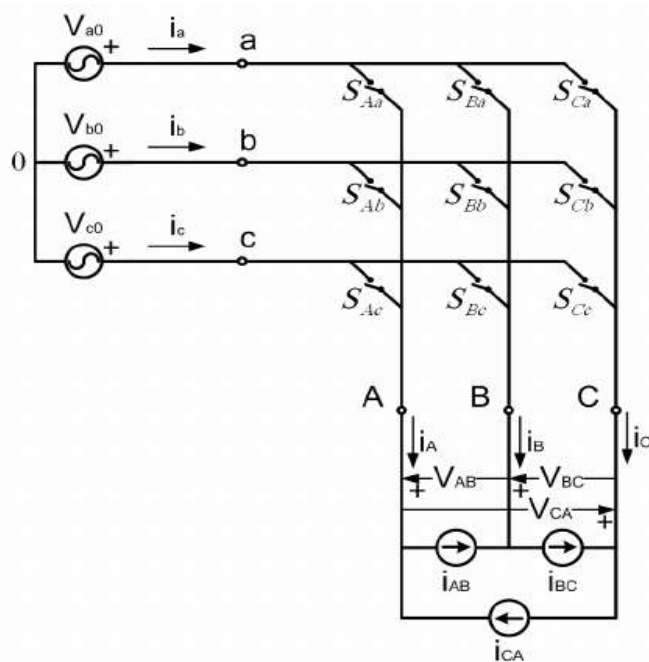
Didapatkan persamaan akhir menjadi:

$$C_p = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

2.3 *Matrix Converter*

Matrix converter adalah konverter yang mengubah listrik AC menjadi listrik AC dengan parameter berbeda. *Matrix converter* banyak dimanfaatkan oleh industri dan pabrik yang untuk mengendalikan kecepatan motor induksi. *matrix converter* mempunyai kelebihan yaitu lebih sederhana dalam aplikasinya untuk mengendalikan, namun lebih membutuhkan banyak komponen semikonduktor. *Matrix converter* memiliki beberapa keunggulan dibandingkan konverter frekuensi daya *rectifier-inverter*. *Matrix converter* menyediakan bentuk gelombang masukan dan gelombang keluaran berupa gelombang sinusoidal dengan harmonisa yang memiliki nilai yang rendah dan hampir tidak ada subharmonik, faktor daya masukan dapat dikendalikan

sepenuhnya, memiliki kemampuan penyimpanan energi minimal, yang memungkinkan untuk dapat menggantikan kapasitor sebagai penyimpanan energi yang besar dan hemat energi [11]. *Matrix converter* juga memiliki beberapa kelemahan yaitu memiliki rasio *transfer* tegangan keluaran maksimum yang terbatas pada 87% untuk bentuk gelombang masukan dan keluaran sinusoidal. Pada dasarnya, *matrix converter* disusun oleh 9 saklar dua arah, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 dimana setiap titik *grid* mempresentasikan hubungan antara terminal keluaran dan terminal masukan. Konverter biasanya diberi tegangan di sisi masukan oleh sumber tegangan tiga fasa dan terhubung ke beban induktif pada sisi keluaran.



Gambar 2.10 Rangkaian *Matrix Converter* [12]

Sumber tegangan digunakan untuk memberi masukan ke *matrix converter*, karena alasan ini, terminal sisi masukan tidak pernah terjadi hubung singkat. Jika terminal sisi masukan menjadi hubung singkat pada sirkuit kemudian

arus besar mengalir melalui *switch* maka *switch* akan menyebabkan kerusakan karena arus lebih yang mengalir. Sama seperti beban induktif pada motor induksi yang digunakan, terminal keluaran pada sisi samping tidak boleh terbuka. Jika ada terminal keluaran yang dibiarkan terbuka kemudian tegangan lebih mengalir di *switch* maka dapat menyebabkan kerusakan pada *switch*. *Matrix converter* dapat ditulis dengan bentuk persamaan matriks 3x3. Hasil keluaran tegangan pada *matrix converter* ditulis dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_A(t) \\ V_B(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

$$V_0 = S \times V_i$$

Dimana V_0 tegangan fasa keluaran dan V_i merupakan tegangan fasa masukan. S adalah *matrix transfer switching*. Arus masukan pada *matrix converter* diberikan dengan persamaan:

$$\begin{bmatrix} I_A(t) \\ I_B(t) \\ I_C(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$I_i = S \times I_0$$

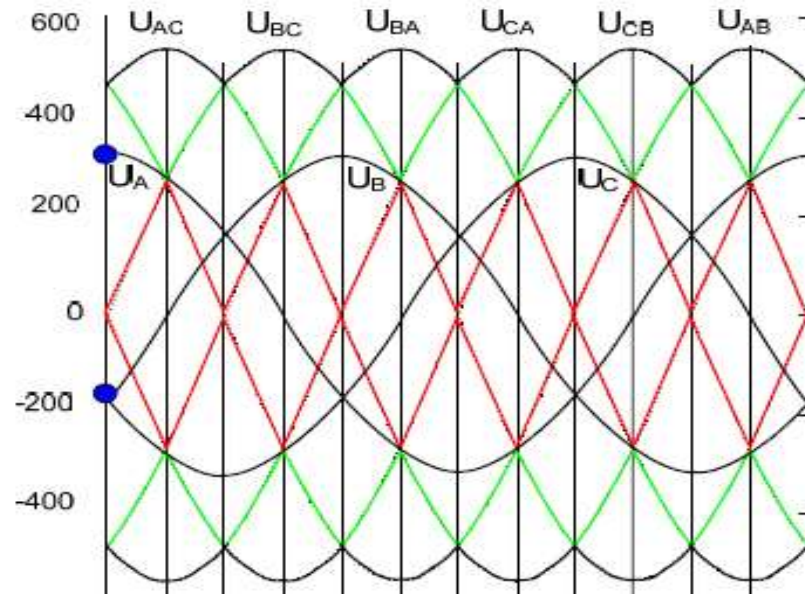
Di mana I_0 adalah arus fasa keluaran dan merupakan I_i arus fasa masukan. S adalah *matrix transfer switching*. Pada setiap tegangan fasa keluaran akan membentuk persamaan:

$$[V_i(t)] = V_m \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad [V_o(t)] = q V_m \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

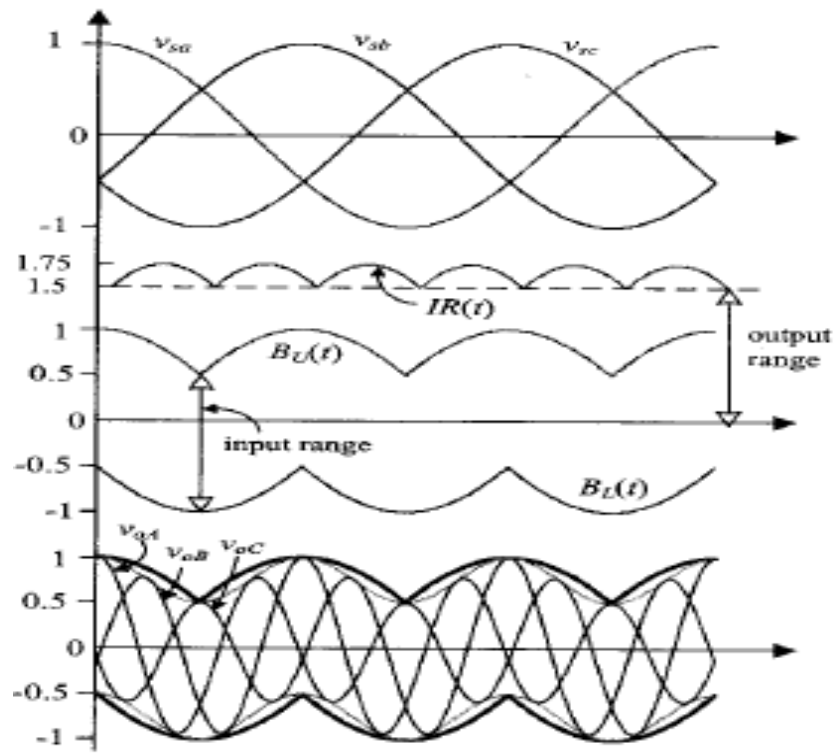
dimana q = rasio tegangan. Kemudian pada arus ditulis dengan persamaan:

$$[i_o(t)] = I_m \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad [i_i(t)] = q I_m \frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\theta_0)} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

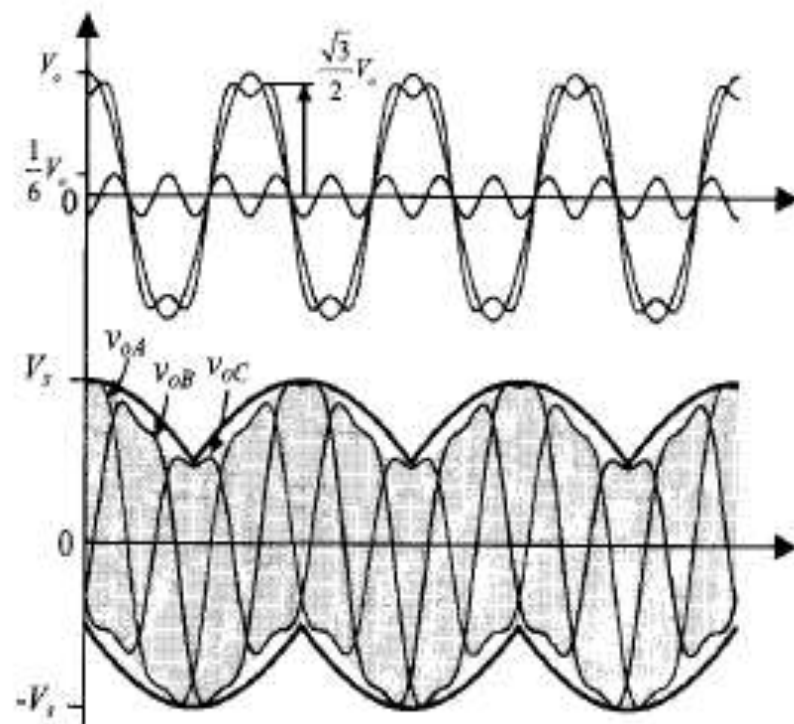
\



Gambar 2.11 Gelombang Switching Matrix Converter [13]



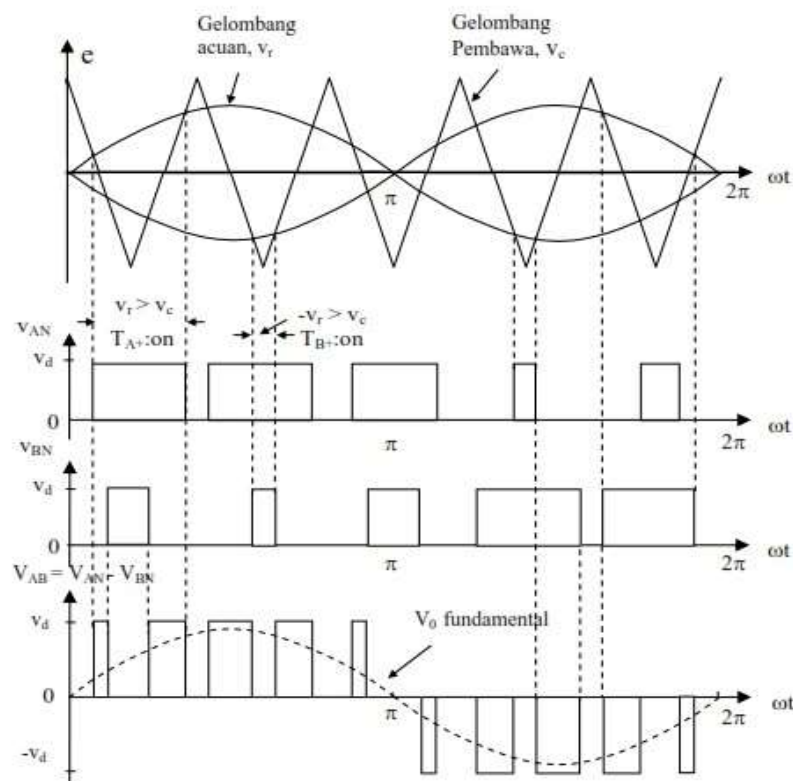
Gambar 2.12 Tegangan Masukan *Matrix Converter* [13]



Gambar 2.13 Tegangan Keluaran *Matrix Converter* [13]

2.4 Pulse Width Modulation (PWM)

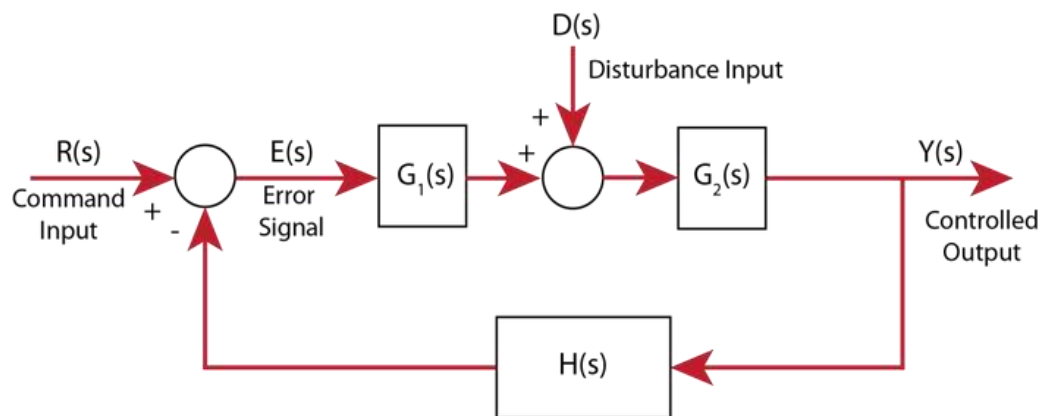
Modulasi lebar pulsa atau yang lebih dikenal dengan PWM (*Pulse Width Modulation*) merupakan suatu teknik yang membandingkan sinyal referensi (V_r) dengan sinyal *Carrier* (V_c). Sinyal *carrier* yang biasa digunakan berupa gelombang segitiga ataupun gelombang gigi gergaji. Prinsip dasar dari teknik PWM adalah ketika besarnya amplitudo sinyal referensi (V_r) lebih besar dari amplitudo sinyal *carrier* (V_c) maka dihasilkan sinyal *high* atau *on* dan jika besar amplitudo sinyal referensi (V_r) berada lebih kecil dari amplitudo sinyal *carrier* (V_c) maka dihasilkan sinyal *low* atau *off*. Presentase periode sinyal *high* dan sinyal *low* disebut dengan *duty cycle*. Pada umumnya sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi (antara 0% hingga 100%).



Gambar 2.14 Sinyal PWM [14]

2.5 Sistem Kendali Kalang Tertutup

Sistem kendali kalang tertutup adalah sistem kendali yang sinyal keluarannya memberikan pengaruh terhadap sistem pengontrolan. Pada sistem kendali kalang tertutup selisih nilai masukan dengan keluaran (*error*) akan menjadi perbandingan dan akan diproses kembali oleh elemen pengendali. Pada sistem kendali kalang tertutup terdapat tambahan berupa elemen pembanding dan elemen pengukuran atau umpan balik (*feedback*) [15].



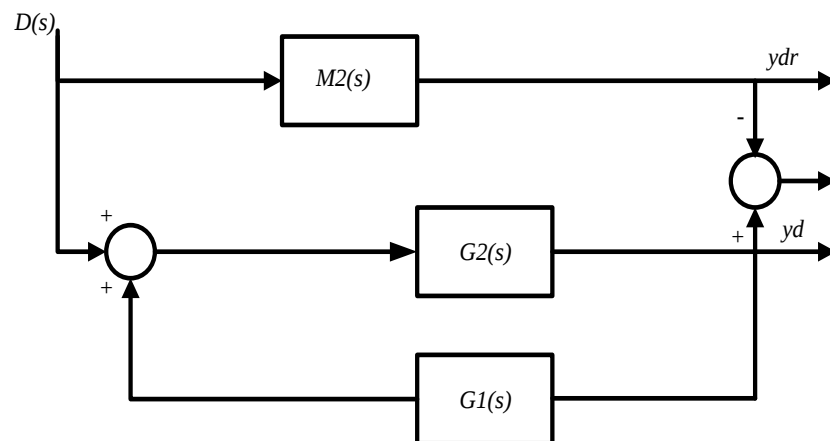
Gambar 2.15 Sistem Kendali Kalang Tertutup [16]

Sistem kendali ditunjukkan seperti pada gambar 2.15 dimana sistem tunduk pada gangguan. Pada gambar dijelaskan ada *step response* dan *disturbance response*. *Step response* adalah tanggapan dari variabel terkontrol $Y(s)$ ke variabel *set-point* $R(s)$ dan *disturbance response* adalah tanggapan dari variabel yang dikendalikan $Y(s)$ ke unit *step disturbance* $D(s)$. $G_2(s)$ adalah transfer fungsi dari *plant* dan $G_1(s)$ adalah fungsi transfer dari pengendali di mana q adalah parameter vektor yang akan diatur dalam pengendali. Kemudian $H(s)$ adalah elemen pengukuran atau umpan balik (*feedback*) dari

nilai yang terukur. Selanjutnya $R(s)$ adalah sinyal referensi, $E(s)$ adalah kesalahan antara sinyal referensi dan sinyal keluaran *plant*, $D(s)$ dan $Y(s)$ gangguan dan keluaran *plant*, masing-masing. $G_1(s)$ adalah pengendali dalam bentuk pengendali PI, yaitu:

$$G_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (2.45)$$

Dimana K_p adalah pengendali proporsional dan K_i adalah pengendali integral [16].



Gambar 2.16 Sistem *Disturbance* Kendali Kalang Tertutup [17]

Untuk mendapatkan referensi gangguan, gangguan diterapkan pada sebuah sistem. Respon loop tertutup pada *step* masukan *disturbance* ($D(s) = 1$ dan $r(k) = 0$) dengan dipertimbangkan nilainya. Gambar 2.16 menunjukkan sistem kontrol loop tertutup ketika gangguan diberikan ke sistem. Referensi *disturbance* dimodelkan dengan $M2(s)$ diberikan dari model referensi $G_2(s)$ sebagaimana ditampilkan dalam persamaan:

$$M_2(s) = \frac{G_2(s)}{G_{PI}(q,s)} \quad (2.46)$$

$G_{PI}(q, s)$ dapat ditulis dengan persamaan:

$$G_{PI}(q, s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (2.47)$$

Berdasarkan persamaan (2.47), model referensi *disturbance* $M_2(s)$ ditulis dengan:

$$M_2(s) = T(s).s \quad (2.48)$$

$$T(s) = \frac{G_2(s)}{K_p s + K_i} \quad (2.49)$$

Catatan untuk $G_2(0) = 1$ dan $T(0) = \frac{1}{K_I}$, jadi $T(s)$ ditulis dalam persamaan:

$$T(s) = \frac{1}{K_I} \frac{1}{(\gamma s + 1)^{i+1}} \quad (2.50)$$

Model *referensi disturbance* didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$M_2(s) = \frac{1}{K_I} \frac{s}{(\gamma s + 1)^{i+1}} \quad (2.51)$$

Dimana I adalah tingkat relatif dari pengendali *plant* dan γ adalah waktu konstan [17]-[18].

2.6 Harmonisa

Harmonisa merupakan suatu distorsi periodik dari gelombang sinusoidal tegangan, arus, maupun daya pada sistem energi listrik. Bentuk gelombang harmonisa yaitu gelombang yang frekuensinya merupakan kelipatan di luar bilangan satu terhadap frekuensi fundamental (frekuensi 50 Hz atau 60 Hz). Nilai frekuensi dari gelombang harmonisa yang terbentuk merupakan hasil kali antara frekuensi fundamental dengan bilangan harmonisanya (f , $2f$, $3f$, dan seterusnya). Bentuk gelombang yang terdistorsi merupakan penjumlahan dari gelombang fundamental dan gelombang harmonisa (h_1 , h_2 , dan seterusnya) pada frekuensi kelipatannya.

Tolak ukur pengukuran harmonisa pada suatu sistem dinyatakan dengan THD (*Total Harmonic Distortion*). THD adalah satuan ukur dalam harmonisa yang dinyatakan dengan persentase (0% - 100%). Nilai THD sendiri mencakup kedua aspek pada kelistrikan, yaitu tegangan dan arus. Masing-masing tegangan dan arus memiliki nilai THD-nya masing-masing pada sistem dengan beban non-linear. THD juga memiliki standarisasi yang diperbolehkan ada pada sistem, dengan ketentuan lebih lanjut yang dibahas pada IEEE-519. Persamaan untuk menghitung besarnya harmonisa adalah sebagai berikut:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{maks}} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.52)$$

Dengan keterangan,

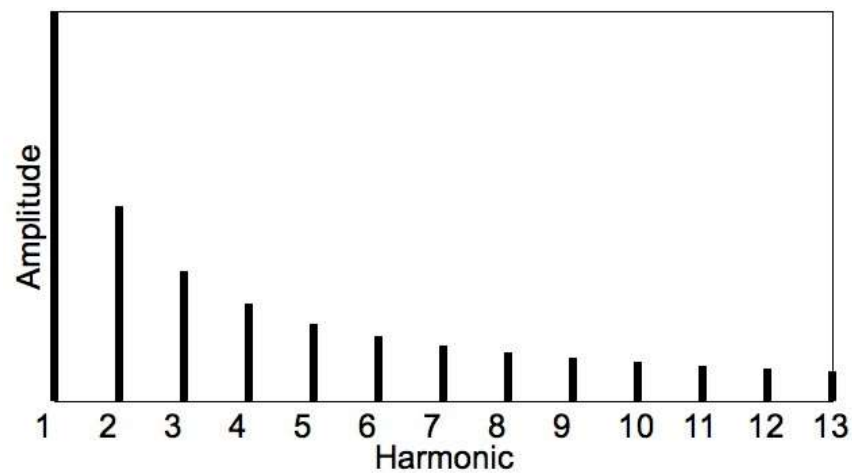
THD = Distorsi Harmonisa Total (%)

I_1 = Arus frekuensi dasar (A)

I_h = Arus harmonisa ke-h (A)

h = Bilangan integer 2, 3, 4, 5, dst

Bagian dari harmonisa juga ada spektrum harmonisa, spektrum harmonisa merupakan rentang semua nilai harmonisa yang terjadi pada sebuah gelombang yang dihasilkan. Spektrum harmonisa dapat dijelaskan dalam panjang gelombang, frekuensi, waktu dll. Spektrum harmonisa dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.17 Spektrum Harmonisa [19]

2.7 Deret Fourier

Deret fourier adalah salah satu bagian dari transformasi fourier yang dapat digunakan untuk menjelaskan suatu fungsi periodik ke sebuah sinyal. Deret fourier digunakan dalam pencarian koefisien suatu harmonisa atau gangguan harmonik yang terdapat pada suatu sinyal, baik itu tegangan ataupun arus.

Fungsi gelombang harmonisa sesuai dengan deret fourier, dan dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} (a_h \cos h\omega t + b_h \sin h\omega t) \quad (2.53)$$

Dimana, a_0 adalah amplitudo gelombang sinyal asli dan komponen setelahnya adalah gelombang sinyal harmonisa yang terdapat pada suatu gelombang. Nilai h adalah nilai harmonik ke- h , dimana dari 1 (gelombang asli) sampai tak terhingga nilainya. Karenanya, gelombang yang berharmonisa adalah penjumlahan dari sebuah gelombang asli dan gelombang periodik kelipatan dari gelombang asli. Nilai a dapat berupa tegangan atau arus, sesuai dengan fungsi sebuah sinyal yang akan diuraikan. Untuk mencari nilai harmonisa total, digunakan juga persamaan berdasarkan persamaan deret fourier pada persamaan 2.54, yaitu sebagai berikut:

$$\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} a_h^2} \quad (2.54)$$

Dimana a adalah amplitudo sinyal harmonisa dan h adalah orde harmonisa

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dimulai pada bulan April 2018 sampai Desember 2018 bertempat di Laboratorium Konversi Energi Elektrik Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu:

1. Satu unit Laptop dengan spesifikasi Intel Core i3, prosesor 2.00GHz, dan sistem operasi Windows 8 Premium 64 bit.
2. Perangkat lunak MATLAB (Matrix Laboratory) R2015a.
3. Microsoft Office 2013.

3.3 Spesifikasi Alat

1. Menggunakan laptop ACER sebagai media perancangan simulasi dan untuk mengerjakan laporan tugas akhir.
2. Perangkat lunak *MATLAB (Matrix Laboratory)* R2015a sebagai perangkat lunak utama untuk perancangan dan perhitungan.

3. Menggunakan Microsoft Office 2013 untuk membuat laporan penelitian, power point untuk presentasi, dan pengolah data penelitian.

3.4 Prosedur Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini akan dilakukan beberapa tahapan, yaitu:

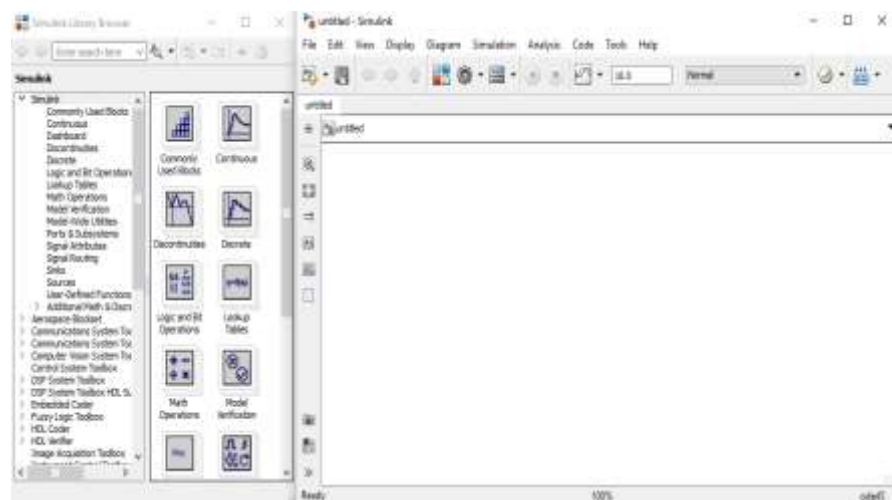
3.1.1 Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini untuk mendapatkan gambaran tentang penelitian yang akan dilakukan yaitu dengan cara mengumpulkan beberapa referensi. Referensi-referensi yang didapat akan dipelajari tentang bagaimana cara mengerjakannya, dan seberapa berbeda penelitian yang akan dilakukan, sehingga mendapatkan hasil yang sesuai dengan yang diharapkan.

3.1.2 Perancangan Simulasi

Tahapan ini dilakukan setelah mendapatkan seluruh referensi yang tepat. Referensi tadi digunakan untuk dasar acuan dalam membuat model pengendalian motor induksi tiga fasa berbasis *matrix converter*. Perancangan simulasi dilakukan pada *software Simulink* MATLAB (*Matrix Laboratory*). Berikut adalah beberapa tahapan yang akan dilakukan pada perancangan simulasi, yaitu pembuatan desain sumber tiga fasa, rangkaian *matrix converter*, rangkaian *vector control*, rangkaian motor induksi tiga fasa kemudian pemasangan beban pada sistem keseluruhan.

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik yang merupakan bahasa pemrograman matematika lanjutan dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matrik. MATLAB (*Matrix Laboratory*) digunakan untuk merancang simulasi dengan menggunakan beberapa macam komponen yang dimodelkan untuk menghasilkan sistem yang sesuai.



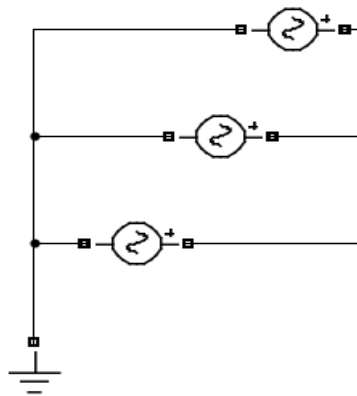
Gambar 3.1 Tampilan Awal *Simulink* MATLAB

Berikut adalah tahap perancangan simulasi pada perangkat lunak Simulink MATLAB:

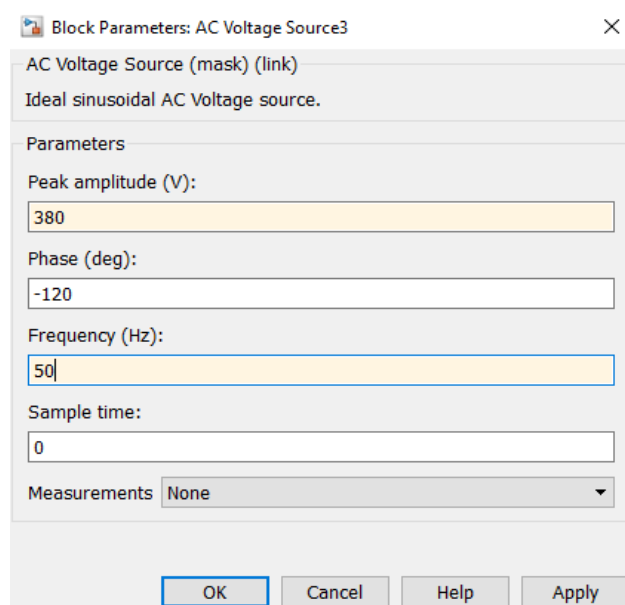
a. Rangkaian Sumber Tiga Fasa

Rangkaian sumber tiga fasa merupakan rangkaian yang menghasilkan sumber tegangan dan arus untuk dialirkan ke seluruh bagian sistem. Rangkaian sumber tiga fasa memiliki tiga buah fasa dengan perbedaan sudut fasa sebesar 120° . Sumber

dihubungkan dengan *ground*, dan ketiga fasa akan dinetralkan di bagian sisi negatif dari rangkaian. Parameter yang dimodelkan pada simulasi ini mempunyai nilai amplitudo sebesar 380 V, dengan sudut fasa sebesar 120° , dan frekuensi sebesar 50Hz, serta daya aktif sebesar 10 kW. Berikut ini adalah rangkaian dan parameter dari sumber tiga fasa yang digunakan pada simulasi.



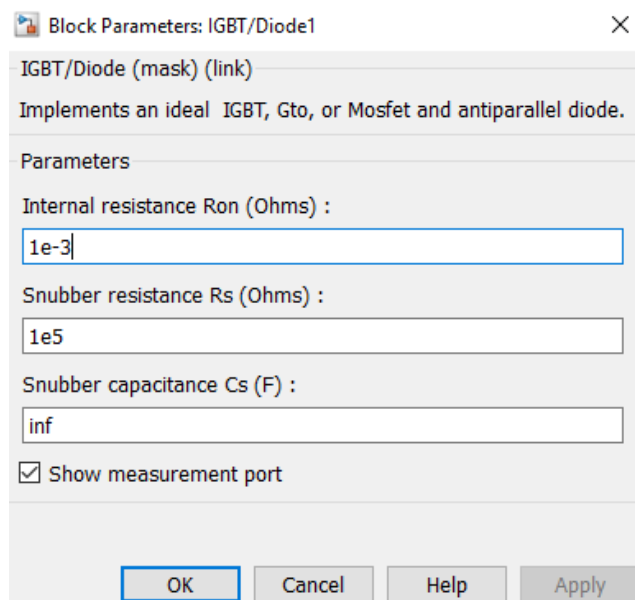
Gambar 3.2 Rangkaian Sumber Tiga Fasa pada *Simulink* MATLAB



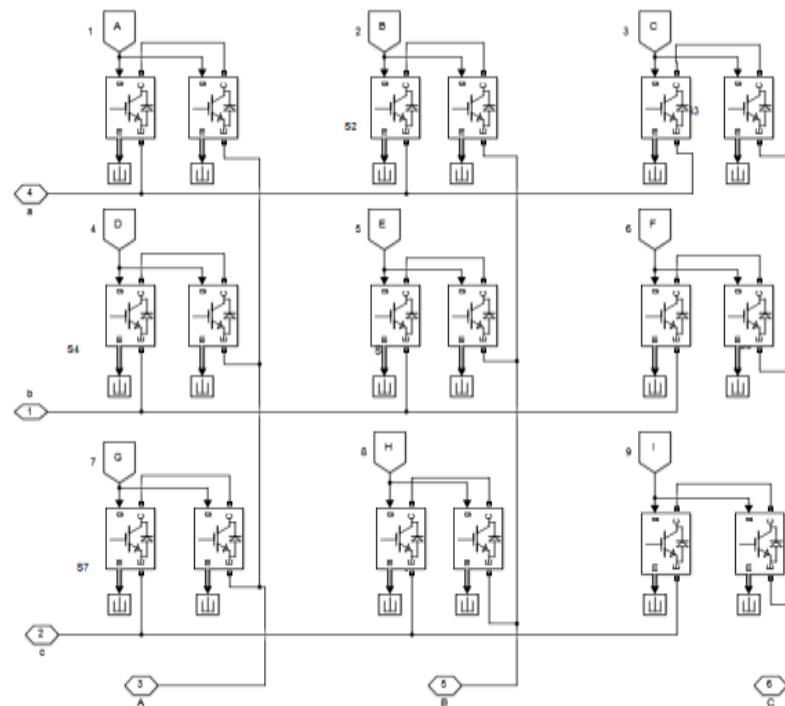
Gambar 3.3 Blok Parameter Sumber Tiga Fasa

b. Rangkaian *Matrix Converter*

Rangkaian *matrix converter* tiga fasa pada perancangan ini terdiri dari n dan p *switch* dua arah yang menghubungkan jalur n -*input* ke jalur p -*output*. Rangkaian *matrix converter* menggunakan komponen IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) dan dioda dengan jumlah 6 buah pada masing-masing fasa. Rangkaian tersebut memiliki total 9 buah *switch* dua arah, yang terhubung menjadi tiga bagian. Setiap satu bagian berisi 3 *switch* dan masing-masing *switch* dua arah terhubung ke kedua tegangan masukan dan tegangan keluaran. Total keseluruhan IGBT dan dioda yang digunakan pada rangkaian ini sebanyak 18 buah dan disusun secara matriks 3×3 dan menjadi sebuah rangkaian *matrix converter*.



Gambar 3.4 Blok Parameter IGBT dan Dioda

Gambar 3.5 Rangkaian *Matrix Converter*

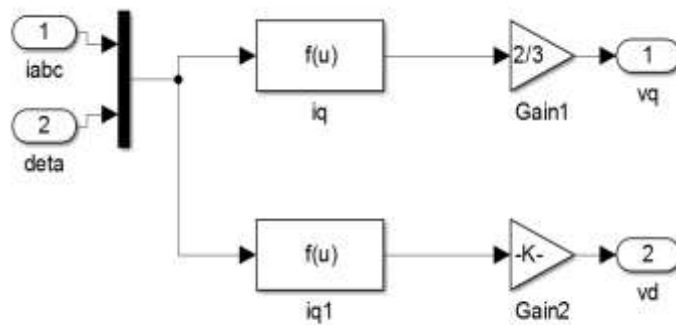
c. Rangkaian *Vector Control*

Rangkaian *vector control* pada penelitian ini digunakan untuk mengendalikan kecepatan motor berupa kontrol arus dan torsi. *Vector control* dirancang dengan sistem *closed loop*. Sistem *vector control* ini terdiri dari koordinat transformasi, PWM (*Pulse Width Modulation*), dan pengendali PI. Berikut dijelaskan dari masing-masing sistem dalam *vector control*.

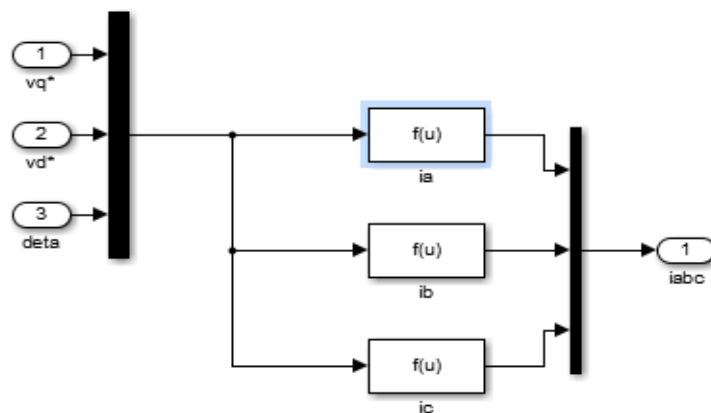
1. Koordinat transformasi dari motor induksi tiga fasa

Perancangan ini membuat pemodelan merubah arus i_a , i_b , i_c ke bentuk d,q atau *ABC to dq conversion*. Arus i_a , i_b , i_c diperoleh dari keluaran arus motor induksi. Dalam pengendaliannya dibutuhkan suatu transformasi yaitu

Transformasi *Clarke* dan Transformasi *Park*. Transformasi *Clarke* merupakan transformasi yang mengkonversi koordinat tiga fasa (i_a, i_b, i_c) seimbang menjadi koordinat stasioner dua fasa (i_α, i_β). Kemudian setelah itu proses merubah arus d,q ke bentuk arus α, β dengan menggunakan Transformasi *Park*. Keluaran dari arus α, β selanjutnya diubah menjadi arus i_a, i_b, i_c , lalu arus i_a, i_b, i_c akan di masukkan kedalam PWM (*Pulse Width Modulation*).



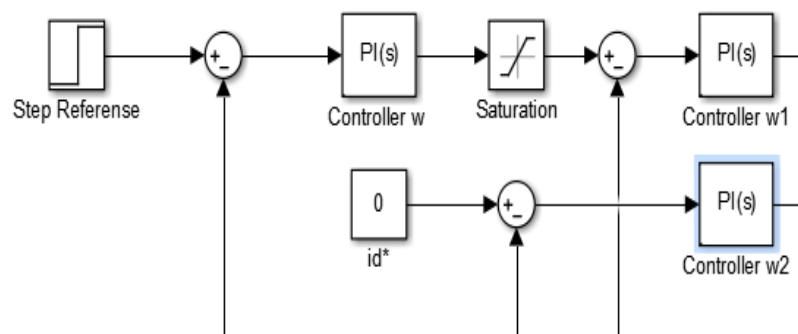
Gambar 3.6 Blok Model *abc to dq Conversion*



Gambar 3.7 Blok Model *dq to abc Conversion*

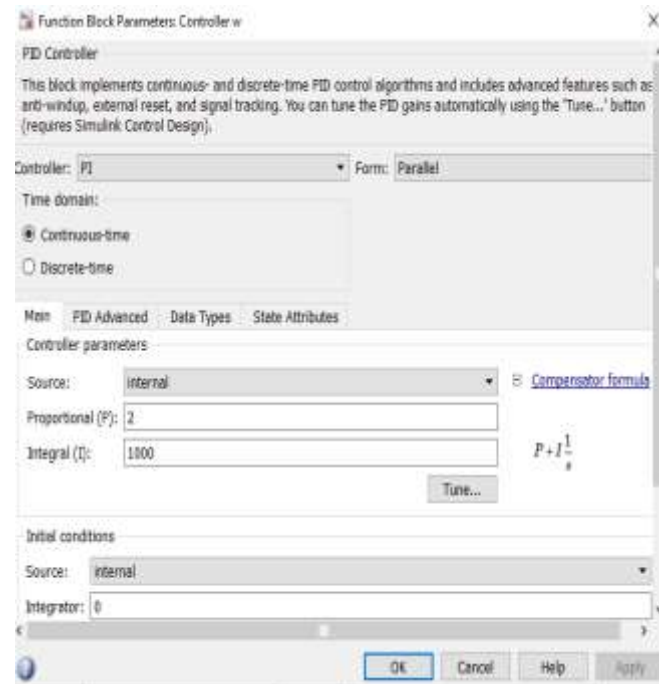
2. Pengendali PI

Pengendali PI adalah gabungan antara kontroler proposional dan kontroler integral. Pengendali PI digunakan untuk mengatur kecepatan motor induksi tiga fasa, pengendali mempunyai 2 sisi masukan yaitu *speed feedback* (w) yang didapatkan dari keluaran kecepatan motor dan arus d,q. Sudut rotor fluks dan kecepatan diperkirakan menggunakan dq model motor induksi. i_d dan i_q dibandingkan dengan referensi fluks dan torsi referensi nilai masing-masing. Nilai torsi referensi i_{sdr} diperoleh dari pengendali kecepatan PI yang membandingkan kecepatan referensi dengan kecepatan motor. Fluks i_{sd} dibandingkan dengan fluks referensi i_{sdr} dan dikendalikan menggunakan pengendali PI fluks (arus). Keluaran dari dua pengendali PI saat ini V_{sdr} dan V_{sqr} kemudian diubah menjadi V_s menggunakan Transformasi *Park Inverse*.



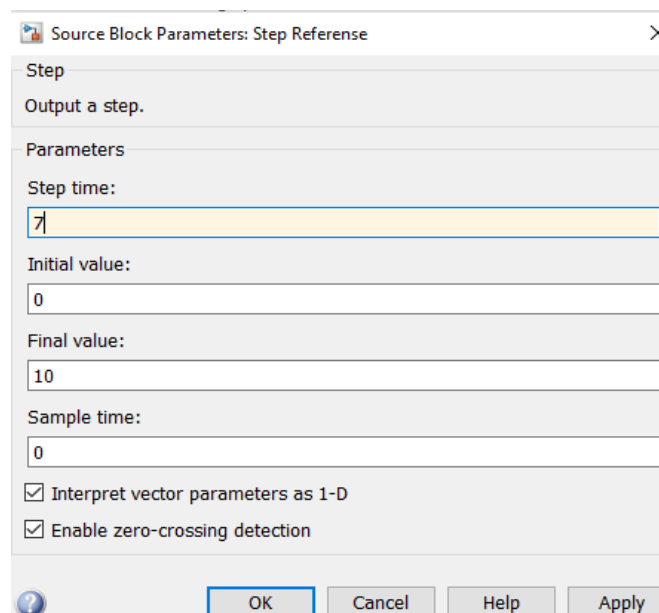
Gambar 3.8 Pengendali PI

Berikut blok parameter dari Pengendali PI :



Gambar 3.9 Blok Parameter Pengendali PI

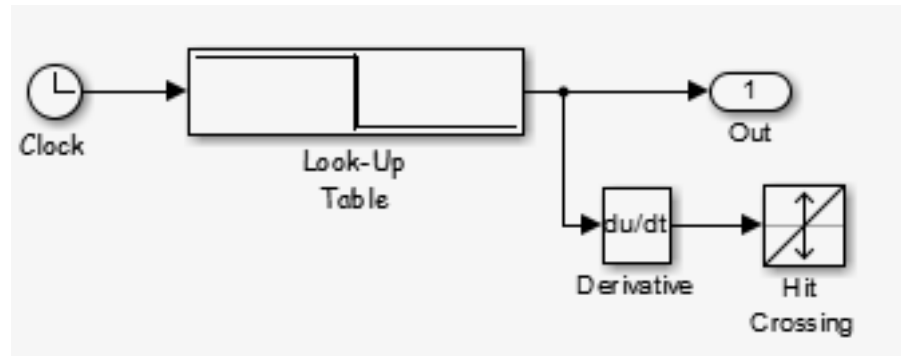
Kemudian *step reference* mempunyai paramater sebagai berikut :



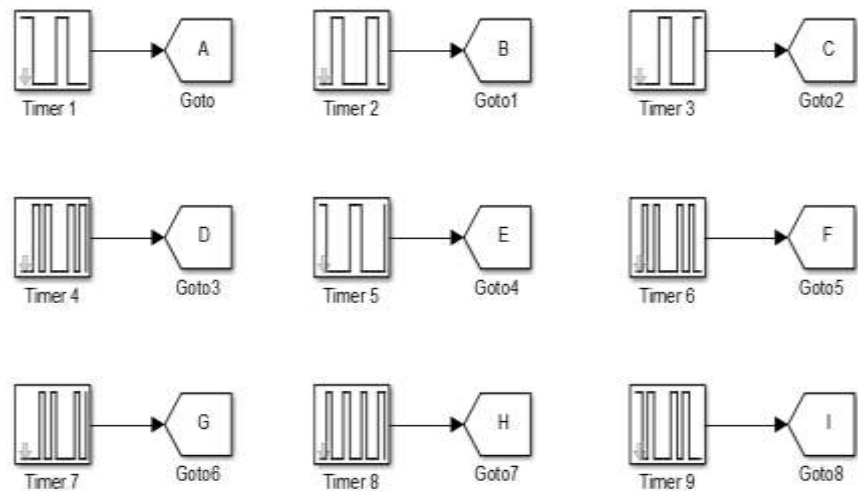
Gambar 3.10 Blok Step Reference

d. Rangkaian Pensaklaran (*Switching*)

Pada perancangan ini, rangkaian pensaklaran menggunakan pembangkit pulsa dengan sebuah sinyal kotak yang waktunya dapat diatur dan ditentukan dari frekuensi sumber.



Gambar 3.11 Diagram Proses Pembuatan Sinyal ke IGBT



Gambar 3.12 Blok Pensaklaran untuk Setiap Fasa

Gambar 3.12 merupakan blok pensaklaran yang digunakan pada setiap fasa pada *matrix converter*. Masing-masing fasa memiliki

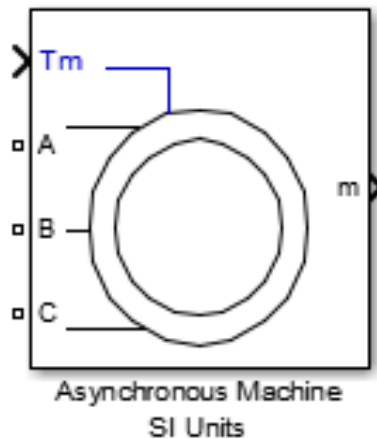
rangkaian pensaklaran sendiri, *timer 1*, *timer 2* *timer 3* untuk mengatur gelombang keluaran fasa 1, kemudian *timer 4*, *timer 5* *timer 6* untuk mengatur gelombang keluaran fasa 2, dan *timer 7*, *timer 8* dan *timer 9* untuk mengatur gelombang keluaran fasa tiga. Masing-masing fasa memiliki perbedaan waktu yang diatur untuk membentuk gelombang keluaran 3 fasa sesuai dengan yang diinginkan. Pada pensaklaran dibuatkan 2 buah parameter, yaitu *time* dan *amplitude*.

Tabel 3.1 Kondisi *Switching Matrix Converter*

NO	FASA A			FASA B			FASA C		
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
1	1	0	0	0	1	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0	1	0	1	0
3	0	1	0	1	0	0	0	0	1
4	0	1	0	0	0	1	1	0	0
5	0	0	1	1	0	0	0	1	0
6	0	0	1	0	1	0	1	0	0
7	1	0	0	0	1	0	0	0	1
8	1	0	0	0	0	1	0	1	0
9	0	1	0	1	0	0	0	0	1
10	0	1	0	0	0	1	1	0	0
11	0	0	1	1	0	0	0	1	0
12	0	0	1	0	1	0	1	0	0

e. Rangkaian Motor Induksi Tiga Fasa

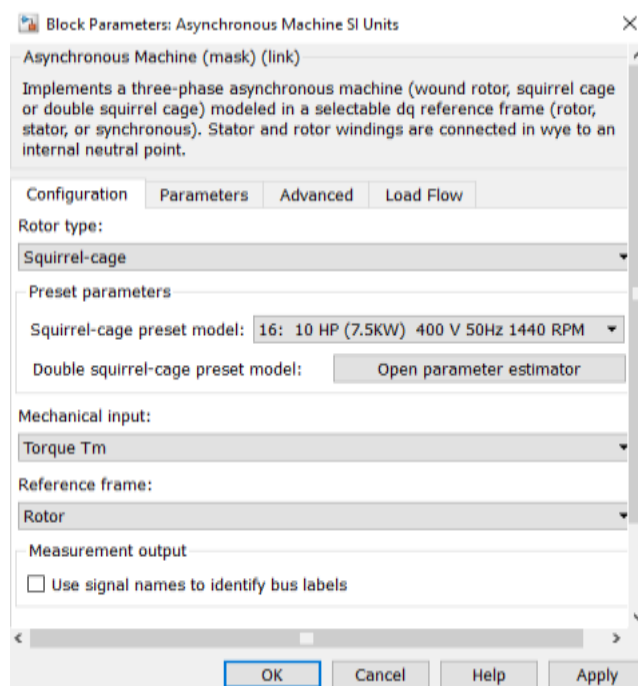
Motor tiga fasa yang digunakan adalah motor asinkron yang memiliki satuan pu (*per unit*). Motor ini memiliki sumber tiga fasa dan memiliki masukan torsi dengan nilai masukan berupa sinyal, parameter pada motor ini dapat diubah sesuai dengan kebutuhan, frekuensi masukan dapat diubah sesuai dengan yang diinginkan, tegangan sumber sebesar 360 V. Gambar motor induksi tiga fasa ditunjukkan pada gambar 3.13.



Gambar 3.13 Blok Motor Induksi Tiga Fasa

Pada simulasi ini motor menggunakan masukan fasa A, B, dan C yang berasal dari keluaran *matrix converter*. T_m adalah torsi mekanik yang dapat diberikan pada motor ini. Pada masukan sinyal T_m dibuat 2 variasi sinyal yaitu *constant torque* dan *step torque*. Kemudian, keluaran motor terminal m adalah keluaran yang berupa sinyal gelombang, yang memiliki beberapa parameter yang dapat digunakan untuk kepentingan pengamatan

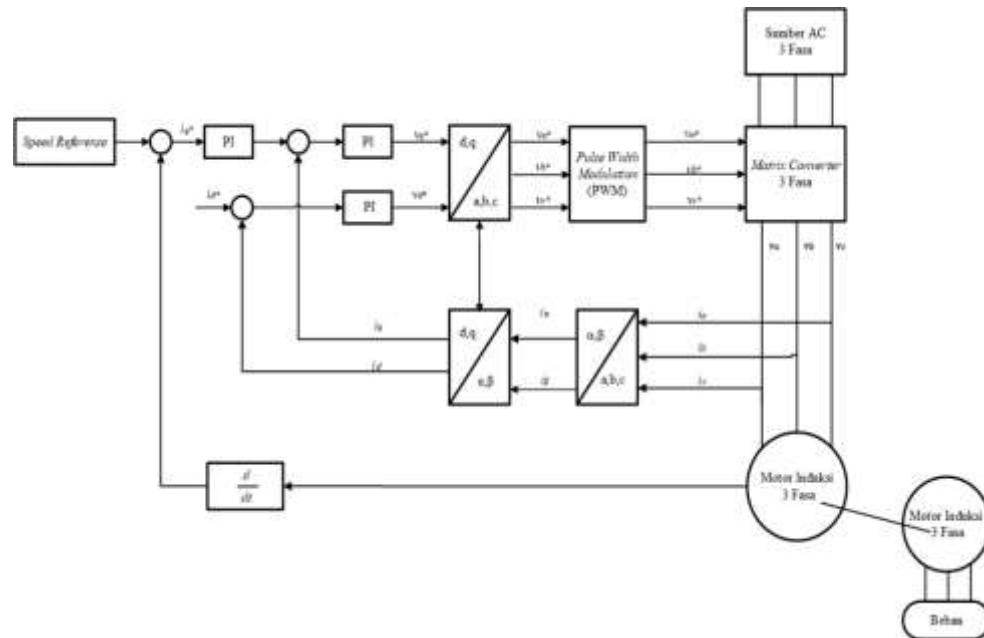
respon motor. Keluaran terminal m dimasukkan pada osiloskop untuk dapat diamati. Beberapa parameter keluaran motor yang dapat diamati diantaranya adalah kecepatan putar motor, torsi elektromagnetik dan tegangan, arus pada stator yang dihasilkan dari motor induksi tiga fasa saat bekerja.



Gambar 3.14 Blok Parameter Motor Induksi Tiga Fasa

Blok parameter pada motor induksi tiga fasa mempunyai spesifikasi diantaranya menggunakan tipe rotor *squirrel-cage*, kemudian model *squirrel cage* yang dipakai pada rotor ini adalah 10 HP dengan daya aktif 7,5 KW dan mempunyai spesifikasi kecepatan 1440 rpm. Kemudian model *doubel squirrel cage* yang digunakan adalah *open* parameter estimator.

Berikut ini diagram blok untuk perancangan alat pada penelitian ini.



Gambar 3.15 Diagram Blok Perancangan Simulasi

3.1.3 Pengujian

Tahap pengujian dilakukan pada simulasi rangkaian yang telah dibuat dengan menggunakan *Simulink* MATLAB apakah simulasi yang dibuat berhasil atau tidak. Pada tahap ini, akan dilakukan pengujian terhadap sistem. Bagian-bagian rangkaian yang akan diuji yaitu sebagai berikut.

a. Pengujian *Matrix Converter*

Pada tahap pengujian ini sistem ini menggunakan persamaan matematis dengan beberapa parameter masukan yang digunakan yaitu tegangan dan sudut penyalaan *matrix converter*. Tegangan

masukan *matrix converter* berupa tegangan AC serta tegangan referensi sebagai *setpoint* yang diinginkan sehingga akan diperoleh *pulse* pada sinyal PWM (*Pulse Width Modulation*) sebagai pemicu pada IGBT dan dioda yang membuat keluaran *matrix converter* akan sesuai dengan yang diinginkan.

b. Pengujian *Matrix Converter* pada Motor Induksi Tiga Fasa

Pengujian ini dilakukan untuk melihat kinerja motor induksi tiga fasa menggunakan *matrix converter* dengan metode *vector control*. Pengamatan yang dilakukan dengan melihat respon kecepatan, respon torsi serta respon arus (i_q).

c. Pengujian *Matrix Converter* pada Motor Induksi Tiga Fasa dengan Beban RL (Resistif Induktif)

Pengujian ini dilakukan untuk melihat efek pemasangan beban RL (Resistif Induktif) pada *matrix converter* yang dihubungkan dengan motor induksi tiga fasa. Pengujian ini juga untuk melihat unjuk kerja motor induksi tiga fasa apabila diberi beban, beban tersebut berupa beban RL (Resistif Induktif) yang digunakan.

d. Pengujian Gelombang Harmonisa

Pada tahap pengujian ini dilakukan analisa mengenai gelombang harmonisa pada sisi keluaran *matrix converter* berupa THD gelombang tegangan dan arus. Pengujian menggunakan rangkaian *matrix converter* dengan frekuensi masukan 50 Hz dan 60 Hz.

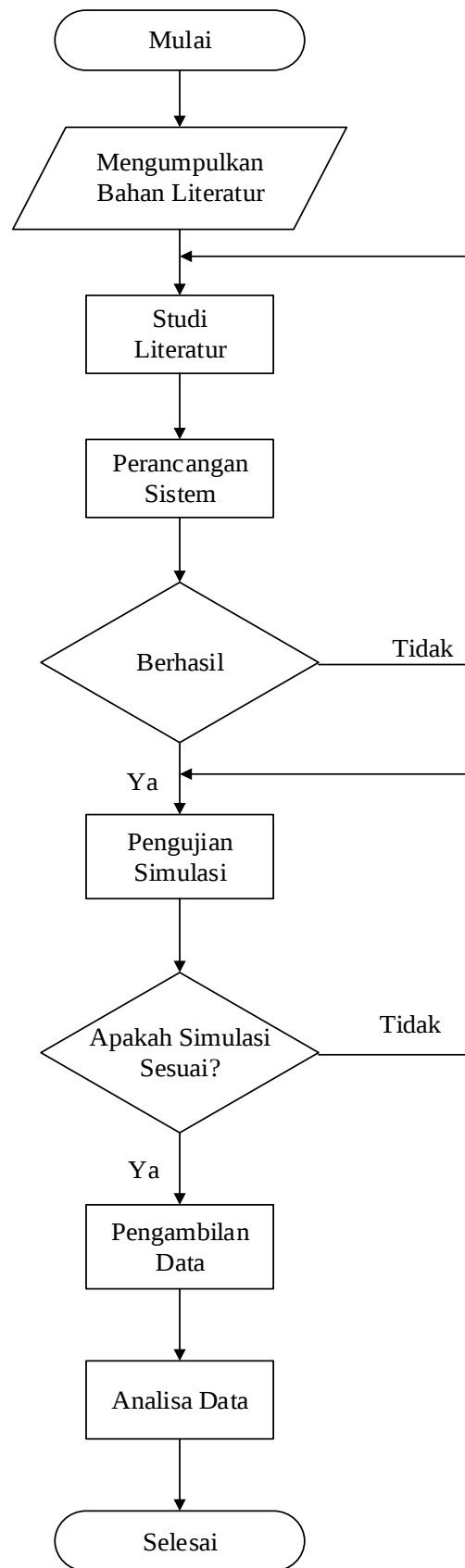
3.5 Analisa Data Hasil Pengujian dan Kesimpulan

Setelah dilakukan pengujian dan pengambilan data, tahap selanjutnya adalah menganalisa hasil pengujian simulasi dan perhitungan. Data-data yang telah didapat ini akan dianalisa dan dibandingkan dengan teori yang ada sehingga penelitian ini dapat dikatakan berhasil atau tidak. Kemudian pada akhirnya dari penelitian ini dapat diambil kesimpulan yang sesuai dengan teori yang ada.

3.6 Diagram Alir Penelitian

Tahapan dari penelitian yang dilakukan yaitu dimulai dari studi literatur, perancangan model simulasi, pengujian simulasi, dan diakhiri dengan analisa hasil dari pengambilan data. Semua tahapan ini dilakukan agar penelitian berjalan dengan teratur sesuai dengan tahapan yang telah dibuat sehingga meminimalisir terjadinya kesalahan dikemudian hari.

Adapun *flowchart* dari diagram alir pada penelitian tugas akhir ini adalah :



Gambar 3.16 Diagram Alir Penelitian

BAB V

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Dari serangkaian penelitian, pengujian dan analisa yang telah dilakukan pada tugas akhir ini dapat diambil kesimpulan bahwa:

1. Berdasarkan hasil pengujian *matrix converter* dengan motor induksi tiga fasa penambahan nilai kecepatan menghasilkan nilai *overshoot* yang semakin menurun yaitu nilai *overshoot* 2% pada kecepatan 100 rpm, 1,2% pada kecepatan 500 rpm, dan 1,15% pada kecepatan 1000 rpm.
2. Berdasarkan hasil pengujian *matrix converter* dengan motor induksi tiga fasa nilai torsi mencapai titik tertinggi sebesar 2,86 N.m pada frekuensi 50 Hz, dan 2,66 N.m pada frekuensi 60 Hz saat kecepatan 1000 rpm.
3. Saat frekuensi masukan sebesar 60 Hz memberikan performansi respon kecepatan dan respon torsi lebih baik dari frekuensi 50 Hz, dimana respon kecepatan frekuensi 60 Hz memiliki respon yang cepat dan lonjakan titik tertinggi pada respon torsi memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan frekuensi 50 Hz.
4. Penggunaan beban RL (resistif induktif) mempengaruhi manuver kecepatan motor, dimana beban RL (resistif induktif) jika dihubungkan

dengan motor akan menyebabkan *undershoot* dan terjadi *disturbance response*.

5. Dari analisa *overshoot* pada implementasi dengan pengendali PI, diperoleh nilai *overshoot* yang rendah pada masing-masing pengujian dengan rata rata sebesar 1,46 %, 1,16 % dan 0,77 %.
6. Hasil *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan dan arus pada keluaran *matrix converter* saat frekuensi 50 Hz dan 60 Hz menghasilkan nilai persentase THD dibawah 5%.

5.2 Saran

Sebagai masukan dan memudahkan dalam penelitian yang akan dilakukan selanjutnya, berikut ini saran-saran yang perlu diperhatikan:

1. Oleh karena dalam penelitian ini berupa simulasi, jadi untuk lebih memperjelas kehandalan pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa dan juga untuk lebih memahami penggunaan *vector control* dapat dilakukan dengan percobaan langsung di lapangan.
2. Untuk mengaplikasikannya masih perlu adanya penambahan *filter* pada keluaran *matrix converter* untuk meredam gelombang harmonisa yang dihasilkan agar tidak merusak peralatan listrik yang digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Arindya, Radita. 2013. *"Penggunaan dan Pengaturan Motor Listrik"*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- [2] Hongwu She, Hua Lin, Xingwei Wang, Limin Yue. *"Vector control of induction motor based on output voltage compensation"*. IEEE 1037 Luoyu Road, Wuhan, 430074, Hubei Province, China.
- [3] D. Casadei, G. Serra, A. Trentin, L. Zarri, M. Calvini. *"Experimental analysis of a matrix converter prototype based on new IGBT modules"*. IEEE ISIE 2005, June 20-23, 2005, Dubrovnik, Croatia, Vol. II, pp. 559-564.
- [4] J. Holtz. *"Sensorless control of induction machines - with or without signal injection "*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 53, no. 1, pp. 7–30, Feb. 2006.
- [5] Theraja, B.L., dan Theraja, A.K. 2005. *"Electrical Technology Volume I: Basic Electrcal Engineering"*. New Delhi: S. Chand & Company.
- [6] Wildi, Theodore. 2002. *"Electrical Machines, Drives, and Power Systems: Fifth Edition"*. New Jersey: Prentice Hall.
- [7] Lee R. J., Pillay P. dan Harley R.G. 1984. *"D, Q Reference Frames for the Simulation of Induction Motors"*. University of Natal.
- [8] Dal Y. Ohm. *"Dynamic Model Of Induction Motors For Vector Control"*. Drivetech, Inc., Blacksburg : Virginia.

- [9] E. Clarke, *Circuit Analysis of AC Power Systems*, Vol. I- Symmetrical and Related Components, John Wiley and Sons, New York, 1943.
- [10] R. H. Park. "*Two-reaction theory of synchronous machines – Generalized method of analysis- Part I*, " *AIEE Trans.*, Vol. 48 , pp.716-727, 1929.
- [11] P. Tenti, L. Malesani, L. Rossetto. "*Optimum Control of N-Input K-Output Matrix Converters*". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 7, no. 4, pp. 707-713, 1992.
- [12] A. Alesina, M. Venturini. "*Analysis and Design of Optimum-Amplitude Nine-Switch Direct AC-AC Converters*". *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 4, no. 1, pp. 101-112, January 1989.
- [13] D. Casadei, G. Grandi, G. Serra, A. Tani. "*Space vector control of matrix converters with unity input power factor and sinusoidal input/output waveforms*". *Proceedings of IEEE PE' 93*, Vol. 7, pp. 170-175, 1993.
- [14] Kocalmis Bilham. A, Akbal. E. "*Modeling and Simulation of Two-Level Space Vector PWM Inverter Using Photovoltaic Cells As DC Source*," *International Journal Of Electronic*. Vol. 2, No. 4, pp. 311-317.
- [15] Sri Ratna Sulistiyanti, F.X. Arinto Setyawan. 2006. "*Dasar Sistem Kendali*". Bandar Lampung: Universitas Lampung.
- [16] C Harahap, T Hanamoto. "*Fictitious Reference Iterative Tuning-Based Two-Degrees-of-Freedom Method for Permanent Magnet Synchronous Motor Speed Control Using FPGA for a High-Frequency SiC MOSFET Inverter*". *Applied Sciences* 6 (12), 387.

- [17] CR Harahap, T Hanamoto. 2005. *“FRIT Based PI Tuning for Speed Control of PMSM using FPGA for High Frequency SiC MOSFET Inverter”*. International Conference on Informatics, Electronics & Vision (ICIEV), 1-6.
- [18] C.R.Harahap, R. Saito, H.Yamada, T.Hanamoto. *"Speed control of permanent magnet synchronous motor using FPGA for high frequency SiC MOSFET Inverter"*. Journal Engineering Science and Technology, pp. 1 I - 20, 2014.
- [19] Priliasari, Fika. Gusmedi, H. 2007. *“Studi pengaruh harmonisa pada arus listrik terhadap besarnya penurunan kapasitas daya terpasang transformator distribusi (Studi kasus: Trafo distribusi PT. PLN (Persero) wilayah Bekasi Raya)”*. Bandar Lampung: Universitas Lampung.